

PRINCIPLES OF GUIDED MISSILE DESIGN

EDITED BY GRAYSON MERRILL, CAPTAIN, U. S. N.

GRAYSON MERRILL

Navy Technical Director
Jupiter Ballistic Missile Project
Bureau of Ordnance

OPERATIONS RESEARCH

HAROLD GOLDBERG

Vice-President for Research
Emerson Radio and Phonograph Corp.

ARMAMENT

ROBERT H. HELMHOLZ

Director of Tests Staff,
U. S. Naval Air Missile Test Center
Pt. Mugu, California

LAUNCHING

D. VAN NOSTRAND COMPANY, INC.

PRINCETON, NEW JERSEY — TORONTO — NEW YORK — LONDON

1956

ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
УПРАВЛЯЕМЫХ СНАРЯДОВ

Г. МЕРИЛЛ

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЕРАЦИЙ

Г. ГОЛЬДБЕРГ

БОЕВЫЕ ЧАСТИ

Р. ГЕЛЬМГОЛЬЦ

ПУСК СНАРЯДОВ

Перевод с английского
В. И. ВАРФОЛОМЕЕВА и Б. И. НАЗАРОВА

Под редакцией
профессора доктора технических наук
В. Ф. ЗАМКОВЦА

ИЗДАТЕЛЬСТВО
ИНОСТРАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
МОСКВА, 1959

АННОТАЦИЯ

Настоящая книга является третьей в выпускаемой в США серии книг «Основы проектирования управляемых снарядов».

В первой части книги освещается порядок разработки управляемых снарядов вооруженными силами США; разбираются такие вопросы, как определение необходимости разработки новых образцов и выработка тактико-технических требований к комплексу управляемого снаряда; дается математическая основа для решения ряда проблем, связанных с созданием новых образцов УРС.

Вторая часть посвящена описанию различных типов боевых зарядов, взрывателей и предохранительных устройств и выработке требований к ним с учетом характеристик целей и систем наведения и управления.

В третьей части рассматриваются средства для запуска управляемых снарядов (стартовые двигатели, пусковые установки), их конструктивные особенности и специфика их проектирования.

Русское издание книги рассчитано на читателя, интересующегося развитием ракетной техники.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Успешное испытание в Советском Союзе межконтинентальной баллистической ракеты и запуск первых в мире искусственных спутников Земли показали, что наша страна занимает ведущее положение в области ракетной техники.

Однако и в капиталистических странах развитию ракетной техники уделяется самое серьезное внимание. Особенно большую работу в этой области ведут США, которым также удалось запустить искусственные спутники Земли, правда, далеко уступающие по размерам советским спутникам. Придавая в своих военных планах огромное значение управляемым реактивным снарядам, правящие круги США не жалеют средств на развитие этого вида оружия. Журнал «Юнайтед Стейс ньюс энд Уорлд рипорт» от 31 января 1958 г. сообщает, что если в 1947 г. ассигнования на реактивное оружие в США составляли 70 млн. долларов, то в 1957 г. они достигли уже цифры 4470 млн. долларов, причем **только на баллистические межконтинентальные ракеты и снаряды** среднего радиуса действия ассигнования увеличились с 515 млн. долларов в 1956 г. до 1365 млн. долларов в 1957 г. По сообщению того же журнала, к концу 1958 г. на вооружении американских вооруженных сил будет находиться 21 тип реактивных снарядов различных классов. Американцы с агрессивными целями оснащают реактивным оружием, пригодным для доставки атомных зарядов, армии стран — участниц НАТО, строят на их территории стартовые площадки для запуска УРС.

В США производится реорганизация целого ряда органов и учреждений, занимающихся созданием реактивного оружия, с целью усилить работу в этой области. Так, в марте 1958 г. министерство армии США создало на базе бывшего управления баллистических снарядов артиллерийско-техническое командование, которое будет заниматься не только разработкой и испытанием новых образцов реактивных снарядов для сухопутных войск, но и принимать участие в разработке искусственных спутников Земли и противоракетных снарядов. Создаются также и новые органы, занимающиеся этими вопросами. В частности,

при министерстве обороны США создано научно-исследовательское бюро для выполнения программ в области противоракетных снарядов и спутников Земли, предназначенных для военного использования, а при министерстве ВВС США с этой же целью организовано «управление астронавтики». Усиленная работа в области управляемых снарядов ведется и по линии ВМС США.

В США готовится значительное количество специалистов по ракетной технике, издается много журналов и книг, посвященных различным вопросам этой быстро развивающейся отрасли знания.

Предлагаемая нашему читателю третья книга из серии «Основы проектирования управляемых реактивных снарядов» посвящена самым разнообразным вопросам: методам исследования операций (автор Мерилл), боевым частям управляемых реактивных снарядов (автор Гольдберг), пусковым установкам и запуску управляемых снарядов (автор Гельмгольц).

В предисловии к книге указывается — и это, по-видимому, правильно, — что она окажется полезной студентам высших учебных заведений, инженерам промышленности и военным инженерам вооруженных сил. Так как книга является несекретной, то, естественно, не приходится ожидать от нее серьезной научной постановки теоретических проблем и достаточно глубокой и точной трактовки отдельных военных и технических вопросов, к чему привык наш советский читатель. Сами авторы признают, что инженер, изучивший настоящую книгу, не сможет еще вести практическую работу в области управляемых снарядов.

Подготовить читателя к чтению секретной литературы, в которой изложены практические приемы расчета, проектирования и производства управляемых реактивных снарядов, — вот одно из назначений этой книги.

Тем не менее некоторые вопросы, касающиеся управляемых реактивных снарядов, излагаются со знанием дела, и хотя специалисты, по всей вероятности, не смогут повысить свои знания или почерпнуть здесь что-либо новое, в целом книга расширит их кругозор в области смежных вопросов.

При написании настоящей книги авторы прежде всего стремились соблюсти секретность. Они нигде не приводят действительных количественных данных, заменяя их фиктивными, о чем заранее предупреждают читателя. Поэтому некоторые из приводимых расчетов выглядят малоубедительно.

Целый ряд возникающих вопросов авторы обходят не очень умело, вызывая недоумение читателя. Например, когда встает вопрос о стоимости одного реактивного снаряда, просто принимается, что если стоимость 10 снарядов равна 100 000 долларов, то один снаряд стоит 10 000 долларов.

Естественно, что выводы и рекомендации авторов не должны приниматься на веру, так как некоторые из них неточны из-за недостаточно полных исследований, а в некоторых могут иметь место элементы дезинформации.

Рассмотрим основные достоинства и недостатки предлагаемой книги. Прежде всего достоинством книги является то, что она знакомит читателя с такими вопросами, которые обычно освещались ранее только в секретной литературе. При этом излагаемый материал достаточно качественный, а методическое изложение его дается на довольно высоком уровне. К безусловным достоинствам книги следует отнести также и то, что в ней устанавливается тесная связь между оперативно-тактическими и техническими вопросами. Последнее, правда, делается не всегда и в ряде случаев довольно примитивно.

В книге ясно и четко сформулированы основные тактико-технические требования к реактивным снарядам, оказывающие решающее влияние на общую техническую направленность в области проектирования и производства управляемых реактивных снарядов. Авторы неоднократно подчеркивают, что для выработки и обоснования тактико-технических требований нужно применять так называемые методы исследования операций (хотя следует отметить, что, на наш взгляд, авторам не удалось наглядно показать сущность этих методов).

Заслуживает внимания излагаемый в книге порядок проектирования, производства и испытания образцов управляемых реактивных снарядов.

Представляет безусловный интерес формулировка тактико-технических требований как ко всей системе, так и отдельно к снаряду.

Как уже указывалось, книга имеет и другие достоинства, а именно: ясные, простые (правда, иногда за счет глубины) доказательства формулируемых положений; методическую стройность в написании отдельных частей; довольно полное изложение ряда вопросов.

Просто и доступно изложены, например, такие теоретические разделы, как теория вероятностей, основы расчета взрывателей и др.

Примером правильного методического построения может служить раздел о вооружении управляемых снарядов, в котором рассмотрены в логической последовательности такие вопросы, как требования к вооружению, цели, уязвимость целей, устройство и проектирование боевых частей и взрывателей, требования безопасности, методы испытаний.

О полноте изложения ряда вопросов можно судить, например, по тому факту, что в разделе о боевых частях рассматриваются более полутора десятков различных конструкций боевых

частей реактивных снарядов, включая такие, как боевые части для целеуказания. В разделе о пусковых установках излагаются как технические требования к ним, так и варианты конструкции отдельных узлов пусковых установок для запуска снарядов с земли, с самолета, с кораблей.

Среди недостатков книги, помимо уже указанных, отметим следующие.

Прежде всего следует подчеркнуть, что, хотя книга освещает в основном технические вопросы, в тексте имеются отдельные высказывания и по общественно-политическим вопросам. Тенденциозность и невежественность этих высказываний столь очевидна, что читатель без труда установит, что они инспирированы поборниками «холодной» войны.

Понимая, что ряд вопросов изложен легковесно, авторы пытаются придать им наукообразный вид, облекая нехитрые мысли и положения в форму теорем (см., например, теорему о повреждениях — гл. V раздела «Боевые части»), постулатов, классификаций и т. д., в которых порой нет никакой необходимости. Правда, такое «глубокомыслие» встречается на страницах книги не так уж часто.

Поскольку ряд вопросов проанализирован и изложен неглубоко, элементарно, часто количественные значения отдельных величин не обоснованы и не заслуживают доверия.

Некоторые вопросы решены чересчур однобоко, узко, а потому и неправильно. Например, принятый коэффициент эффективности оружия как отношение стоимости нанесенного ущерба к стоимости использованного вооружения не является верным. Мы уже не говорим о чисто торгашеском подходе к этому вопросу, когда даже человеческая жизнь оценивается определенной суммой долларов.

Существенным недостатком книги является и то, что способ построения некоторых диаграмм, приведенных в тексте, полностью не объяснен и поэтому является непонятным. Ряд параграфов, содержащих сведения из общетехнических наук (например, из теоретической механики, сопротивления материалов и др.), впоследствии нигде не используется.

Кроме того, нередко приводятся такие сведения, которые для большинства наших читателей представляют весьма незначительный интерес. При редактировании настоящего тома такого рода материал не сокращался, так как это вызвало бы опасность различного перевода отдельных книг всей серии.

Поскольку настоящая книга переводилась после выхода предыдущих, то оказалось возможным использовать некоторую терминологию, применявшуюся ранее. Все примеры приведены с использованием американской системы мер, поскольку при переводе мер в метрическую систему цифры получаются некруг-

лыми и наглядность пропадает (таблица перевода мер помещена в конце книги). Обозначения в формулах приняты такие же, как и в оригинале. Необходимо отметить, что по целому ряду вопросов нет еще установившейся терминологии, поэтому иногда приходилось даже вводить новые термины.

В целом следует отметить, что авторам книги удалось показать, что управляемый реактивный снаряд является такой сложной машиной, к тому же быстро прогрессирующей, для разработки которой требуется небывалая ранее кооперация ученых, конструкторов и производителей различных специальностей.

Уже после сдачи данной книги в набор стало известно, что вместо шеститомной серии книг «Основы проектирования управляемых снарядов» в США издается девятитомная серия.

Начиная с четвертого тома порядок выпуска книг изменен и является следующим: 4. «Справочник конструктора управляемых снарядов». 5. «Организация производства систем». 6. «Полигонные испытания». 7. «Межпланетные полеты». 8. «Автоматическое управление полетом». 9. «Бортовая радиолокационная аппаратура».

Читатель данной книги должен учесть, что авторы делают ссылки на шеститомную серию, в которой четвертой книгой должна была быть «Организация производства систем» вместе с «Полигонными испытаниями», пятой — «Межпланетные полеты» и шестой — «Справочник конструктора управляемых снарядов».

В. Замковец.

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА АМЕРИКАНСКОГО ИЗДАНИЯ

В управляемом снаряде военная техника достигла своей вершины. Тысячи лет люди уничтожали друг друга и материальные ценности с помощью метательного оружия возрастающей мощи и сложности; но все снаряды были неуправляемыми после бросания. Теперь радиотехника позволяет человеку управлять полетом снарядов и, таким образом, достигать большего эффекта за счет повышения точности стрельбы.

К несчастью, прогресс человечества в области морали и права еще недостаточен, чтобы избавиться от войны, которая является одним из главных факторов, определяющих наш образ жизни; следовательно, сохранение свободного мира¹ зависит отчасти и от овладения техникой управляемых снарядов.

Настоящая книга является третьей в серии, озаглавленной «Основы проектирования управляемых снарядов». Первая книга этой серии, названная «Управление снарядами», посвящена устройствам, используемым для управления полетом снарядов, и способам управления. Во вторую книгу входят разделы: «Аэродинамика», «Теория реактивных двигателей» и «Конструкции и практика проектирования». В настоящую, третью, книгу включены разделы: «Исследование операций», «Боевые части» и «Пуск снарядов». В последующих книгах будут рассмотрены тесно связанные между собой «Организация производства систем», «Полигонные испытания» и «Межпланетные полеты». Завершает всю серию «Справочник конструктора управляемых снарядов».

Эта серия книг должна послужить студентам, инженерам и техническому офицерскому составу вооруженных сил основой для овладения техникой управляемых снарядов. Инженер, усвоивший только изложенный здесь материал, еще не будет подготовлен для того, чтобы проектировать управляемый снаряд или его отдельные части, — для этого необходимо изучить специаль-

¹ Под «свободным миром» автор понимает, очевидно, капиталистический мир. — *Прим. ред.*

ную секретную литературу. Однако он вполне сможет понимать и критически оценивать эту литературу (которая, конечно, мало-доступна и, как правило, не относится к учебной литературе), когда это ему понадобится.

При написании настоящей серии возникли две трудности. Во-первых, стало очевидным, что предмет изложения охватывает такое множество различных отраслей знания, что один автор не справился бы с задачей столь хорошо, как группа специалистов по отдельным отраслям при условии координации их работы. Поэтому различные разделы книг были написаны узкими специалистами. Во-вторых, необходимо было быть очень осторожным, чтобы не разгласить секретных сведений. Открытое издание настоящей книги произведено с разрешения министерства обороны.

В настоящей книге раздел «Исследование операций» написан редактором всей серии капитаном 2 ранга Грейсоном Мериллом, раздел «Боевые части» управляемых снарядов — Гарольдом Гольдбергом, вице-президентом Эмерсоновской исследовательской лаборатории в Вашингтоне, раздел «Пуск снарядов» — Робертом Гельмгольцем, начальником отдела испытаний в испытательном центре управляемых снарядов ВМС в Пойнт-Мугу, Калифорния.

Мы будем приветствовать критику и конструктивные предложения. Мы постараемся учесть все замечания и, принимая во внимание развитие техники управляемых снарядов, надеемся со временем пересмотреть этот том.

Считаем приятным долгом принести благодарность всем, кто помогал нам в нашей работе, а также министерству обороны, чье плодотворное сотрудничество позволило написать содержательную книгу без нарушения секретности.

Мнения и утверждения, высказанные в книге, отражают личные взгляды авторов и не должны рассматриваться как официальные точки зрения министерства военно-морских сил США или военно-морского ведомства в целом.

Грейсон Мерилл,
редактор.

ЧАСТЬ I

ИССЛЕДОВАНИЕ
ОПЕРАЦИЙ

ВСТУПЛЕНИЕ

Несмотря на благородные усилия человечества направить свое развитие в спокойное русло морали и права, война (или ее угроза), по-видимому, будет еще долго оставаться решающим фактором в жизни народов. Поэтому ни одно государство не может позволить себе ослабить свою военную мощь, отказавшись от производства управляемых снарядов — одного из средств усиления военного потенциала. В результате все усилия в области развития управляемых снарядов в настоящее время практически подчинены нуждам обороны. Если когда-нибудь угроза войны уменьшится и ракетная техника станет использоваться в мирных целях, человечество быстрыми шагами пойдет вперед, к завоеванию межпланетных и даже межзвездных пространств. Пока же развитие управляемых снарядов определяется политической государственной и существующими стратегическими и оперативно-тактическими взглядами.

Первое условие, которое должно выдерживаться при проектировании управляемых снарядов, — это выполнение требований заказчика. Этот хорошо известный всем принцип так же важен для ракет, как и для автомобилей. О нем часто забывают в технических учебных заведениях, и тогда инженеру приходится постигать его в суровой школе практики. Единственными заказчиками управляемых снарядов являются вооруженные силы. Поэтому инженеру, проектирующему управляемые снаряды, необходимо знать перспективы развития вооружения и требования, которым оно должно удовлетворять. Без этого совершенно невозможно опередить конкурирующие фирмы.

Однако при проектировании управляемых снарядов нельзя полагаться только на одних военных специалистов. Ракетная техника становится настолько самостоятельной областью, что требует усилий постоянно работающих в этой области гражданских специалистов, как служащих, так и не служащих в вооруженных силах. Больше того, подрядчик, разрабатывающий новый управляемый снаряд, должен глубоко понимать, для выполнения каких задач этот снаряд предназначен. В противном случае ему не избежать напрасных затрат.

Хотя первый раздел настоящей книги назван «Исследование операций», в него включены также главы, освещающие процесс разработки управляемых снарядов в США; здесь же описаны функции различных видов вооруженных сил, от которых зависят требования, предъявляемые к управляемым снарядам.

Необходимость разработки новых образцов управляемых снарядов для вооруженных сил не является чем-то неизбежным, раз и навсегда установленным в Вашингтоне. Целесообразность такой разработки изменяется в зависимости от требований национальной политики, стратегических и оперативно-тактических взглядов, разведывательных данных и уровня развития техники. «Исследование операций» — это инструмент, с помощью которого можно логически проанализировать перечисленные факторы как основу для принятия решения о необходимости создания нового образца. Методы исследования операций дают также возможность оценить, насколько новый снаряд отвечает требованиям обстановки и какое влияние он окажет на стратегию и тактику. Наконец, с помощью методов исследования операций можно определить условия для наиболее эффективного использования управляемых реактивных снарядов.

Г. Мерилл.

ПРОЦЕСС СОЗДАНИЯ УПРАВЛЯЕМЫХ СНАРЯДОВ

1.1. Общие положения

Современные методы разработки вооружения исторически сложились в результате длительной практики. В них отражаются и ассигнования по государственному бюджету, и желание способствовать конкуренции различных фирм, и существующая деловая практика. Процесс создания нового оружия очень сложен. Непонимание этого процесса может вызвать нецелесообразные и разорительные расходы, привести к промедлениям и затруднениям. Лишь правильная организация обеспечивает успех в развитии управляемых снарядов.

**1.2. Основные обязанности вооруженных сил
в области разработки управляемых снарядов**

По принятой в США системе разработка управляемых снарядов совершается в результате совместных усилий правительства и промышленности, или, более точно, определенного вида вооруженных сил и соответствующего исполнителя — подрядчика. Как и в спортивной команде, успех зависит от каждого «игрока», знающего, что должен делать он сам и его товарищи по «команде». Описание организации разработки управляемых снарядов — это не более чем перечисление обязанностей видов вооруженных сил и соответствующих подрядчиков.

Организация и функции. Основные обязанности видов вооруженных сил — армии, флота и авиации — сформулированы в законе о национальной безопасности 1947 г. Этот закон лег в основу подписанного в апреле 1948 г. министром обороны и утвержденного президентом специального документа, так называемого «Ки-Уэстского соглашения», в котором были определены функции всех видов вооруженных сил, а также комитета начальников штабов. Суть этого документа состоит в том, что, как правило, в наземных операциях главная роль отводится армии, в морских операциях — флоту, а в воздушных операциях — авиации. Общее стратегическое руководство всеми тремя видами вооруженных сил возлагается на комитет начальников штабов.

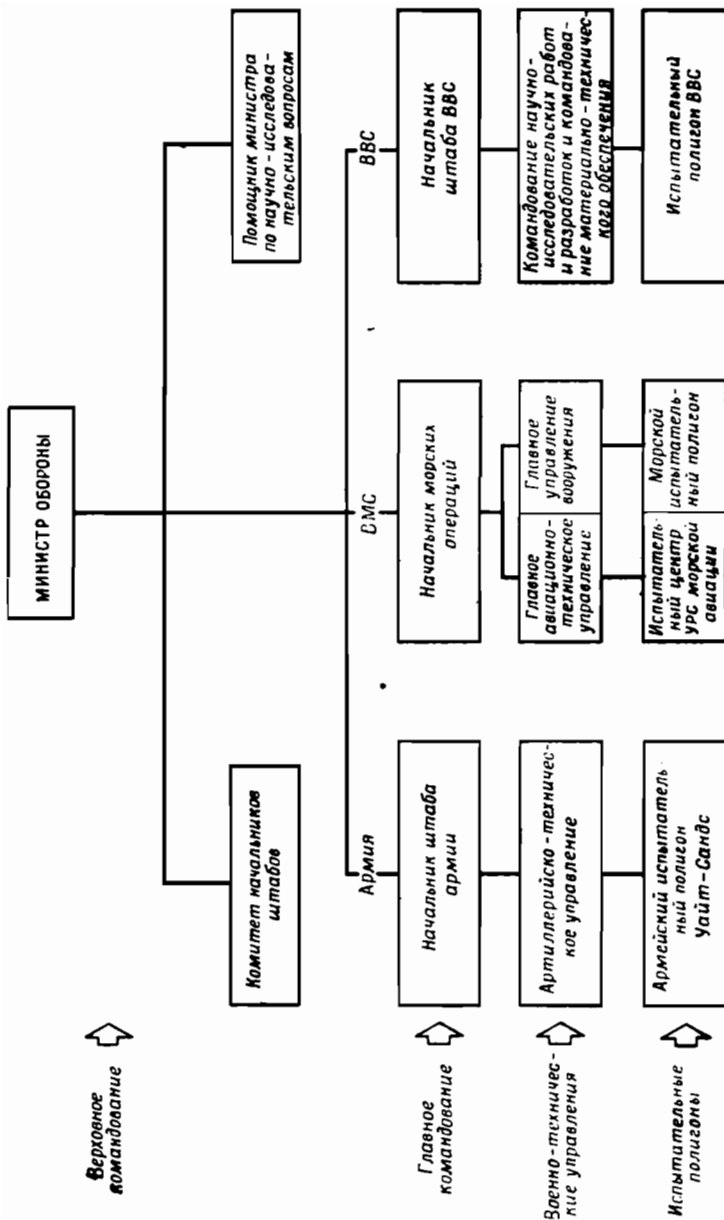


Рис. 1.1. Упрощенная схема организации разработки управляемых снарядов в США.

В указанных выше документах говорилось, что каждый вид вооруженных сил обязан совершенствовать свое вооружение, чтобы успешно выполнять боевые задачи в той сфере, где ему отводится главная роль; координация усилий различных видов вооруженных сил в области развития вооружения осуществляется министерством обороны.

На рис. 1.1 представлена упрощенная схема организации разработки управляемых снарядов министерством обороны. Особенно заслуживает внимания параллелизм в деятельности всех трех видов вооруженных сил. «Заказчик», требования которого должен выполнить подрядчик, в каждом виде вооруженных сил представляет собой как бы три ступени: первая, высшая ступень, определяет потребность в новом образце; вторая осуществляет руководство проектированием и производством в соответствии с договорными условиями и, наконец, третья руководит летными испытаниями готовых образцов.

На рис. 1.2 показаны основные стадии процесса создания нового управляемого снаряда и степень сотрудничества военного ведомства-заказчика с подрядчиком. Изучение этой схемы поможет лучше понять содержание настоящей главы.

Определение потребности в новом образце. Определение необходимости разработки нового образца возложено на главное командование армии, авиации и флота. К выполнению этой задачи привлекаются офицеры, обладающие большим боевым опытом, способные оценить практическую полезность проектируемой системы оружия и в случае необходимости даже сформулировать тактико-технические требования к ней. В распоряжении этих лиц находятся группы технических советников, главным образом гражданских специалистов, в том числе:

а) группа по оценке систем оружия, подчиненная комитету начальников штабов и министру обороны;

б) управление по исследованию боевых действий, подчиненное заместителю начальника штаба по оперативным вопросам (сухопутные войска США);

в) отдел исследования боевых действий, подчиненный заместителю начальника штаба ВВС США;

г) группа исследования боевых действий, подчиненная начальнику морских операций ВМС США.

Именно эти органы используют в своей работе методы исследования операций¹. Кроме того, при составлении оперативно-тактических требований запрашивается мнение соответствующего

¹ «Исследованием операций» в США называют прикладную науку, используемую для исследования различных явлений. Под «операцией» в данном случае понимается всякая организованная планомерная деятельность людей, имеющая характер повторяемости. — *Прим. ред.*



Рис. 1.2. Основные этапы процесса создания нового образца управляемого снаряда.

военно-технического управления относительно технической осуществимости проекта того или иного образца вооружения.

Однако было бы неправильно заключить, что решение о необходимости разработки нового образца принимается исключительно главным командованием. Оно должно приниматься на основе официальных стратегических и оперативно-тактических взглядов, разведывательной информации о развитии вооружения за рубежом и, наконец, на основе современных технических возможностей создания управляемых снарядов. Из перечисленных факторов первые три, очевидно, более доступны главному командованию, тогда как последний зависит главным образом от развития национальной промышленности. Нередко требования к новому снаряду являются результатом творческой мысли подрядчика. При этом конкуренция стимулирует возникновение новых идей и здравый смысл заменяет недостающий боевой опыт. Таким образом, подрядчику необходимо владеть методами исследования операций.

Выработка тактико-технических требований. После определения потребности в новом образце необходимо выработать к нему соответствующие тактико-технические требования. Выработка этих требований, лежащих в основе заключаемого с подрядчиком контракта, — дело военно-технического управления. Однако инициативный подрядчик тоже часто принимает участие в этой работе. ~~Тактико-технические требования основываются на анализе боевого применения проектируемого снаряда и учитывают накопленный опыт создания аналогичных образцов вооружения.~~ Иногда оказывается, что при данном уровне техники невозможно создать образец, полностью удовлетворяющий нуждам вооруженных сил. В таких случаях с согласия главного командования уровень тактико-технических требований снижается и проектируемый снаряд рассматривается как промежуточный образец.

Финансирование и финансовый контроль. Следует помнить, что каждый доллар, истраченный на создание управляемого снаряда, — это доллар налогоплательщика. Вполне понятно, что ~~налогоплательщики~~ хотят, чтобы их деньги расходовались разумно. В результате вооруженные силы имеют дело с такими методами финансирования и финансового контроля, которые не вполне благоприятствуют созданию управляемых снарядов, но зато предотвращают нерациональное использование общественных фондов. При финансировании возникают определенные трудности, связанные с тем, что от первоначального планирования до ассигнования средств проходит почти два года. Кроме того, денежные затраты, необходимые для создания управляемых снарядов, очень трудно заранее определить. Можно только

сказать, что образец будет, вероятно, принят на вооружение и поступит в производство.

Военно-технические управления видов вооруженных сил являются органами, заключающими контракты и ведающими финансированием работ по производству управляемых снарядов. Различают два вида денежных фондов. Для создания и испытания опытных образцов снарядов используются «исследовательские» фонды, а для изготовления опытной партии снарядов, используемой для оценки их качеств, и для серийного выпуска снарядов, направляемых в войска, — так называемые «производственные» фонды.

Проект бюджетных ассигнований рассматривается начальниками штабов и министрами армии, ВВС и ВМС, министром обороны и бюджетным бюро при президенте. К моменту обсуждения конгрессом этого проекта последний должен быть тщательно рассмотрен и приведен в соответствие с требованиями стратегической, экономической и политической обстановки.

Ассигнования выделяются конгрессом ежегодно, обычно к 1 июля — началу нового финансового года. После этого военно-техническое управление может заключать контракты на разработку, в числе прочих видов вооружения, и управляемых снарядов.

Изменяющаяся обстановка часто требует пересмотра первоначально намеченных финансовых планов. Поэтому конгресс благоразумно разрешает вооруженным силам переводить средства с менее важных проектов на такие, которые в данный момент приобретают первостепенное значение. Контроль за этим перераспределением средств осуществляется министерством обороны.

Заключение контракта. Следующим шагом после выработки тактико-технических требований является заключение контракта на разработку управляемого снаряда. Опыт показывает, что для создания управляемого снаряда требуется срок от трех до десяти лет в зависимости от сложности работы. При этом определить заранее стоимость выполнения заказа очень сложно из-за непредвиденных технических трудностей, изменений в уровне финансового обеспечения и т. д. Задача состоит в заключении такого контракта, который, с одной стороны, имел бы достаточно гибкую форму и мог бы приспосабливаться к различным обстоятельствам, а с другой стороны, обеспечивался бы ассигнуемыми ежегодной фондами.

Наиболее удобной формой является контракт с заранее устанавливаемой премиальной оплатой и ежегодным финансированием. В этом случае смета составляется на всю работу в объеме, определяемом представителями данного вида вооруженных сил. К общей сумме добавляется премия, составляющая обычно

5—15% от установленной стоимости работ. Это — прибыль подрядчика. После завершения работ подрядчику оплачиваются все расходы, заверенные правительственным финансовым инспектором, и выдаются премиальные. Если фактическая стоимость работ превысит первоначально установленную, правительство может увеличить общую сумму, выделенную для выполнения заказа, но не увеличивать размеры премии, за исключением случаев, когда объем выполненных работ оказался больше сметного. Для того чтобы финансировать заказ, выполняющийся в течение ряда лет, посредством ежегодных ассигнований, каждый вид вооруженных сил обычно ограничивает расходы на данный год до известных пределов.

Другая форма контракта, которая используется при создании управляемых снарядов, — это так называемый «этапный» контракт. В этом случае вся работа по созданию управляемого снаряда разбивается на ряд последовательных этапов, например: предварительные расчеты, разработка отдельных узлов конструкции, эскизное проектирование и изготовление макета снаряда, составление технического проекта и постройка моделей снаряда и, наконец, проектирование и изготовление опытных образцов. На выполнение каждого этапа заключается отдельный контракт. Эта форма контракта менее удобна, однако она предпочтительна в тех случаях, когда целесообразность дальнейшего продолжения работы над проектом подвергается сомнению, и, прежде чем приступить к очередному этапу работ, необходимо оценить результаты предыдущего этапа.

Контроль за проектированием. Военно-техническое управление осуществляет постоянный контроль за работой подрядчиков, причем надо сказать, что по мере накопления опыта контроль за проектированием со стороны вооруженных сил становится все более эффективным. Составляются более подробные тактико-технические требования, а, кроме того, конструкторов обязывают строго придерживаться заданных проектных параметров при разработке конструкции. При этом учитываются уроки предшествующих проектов. Такой вид контроля не снимает ответственности с подрядчика за выполнение условий контракта, но помогает ему избежать грубых ошибок в работе.

Помощь подрядчикам. Для работы над управляемыми снарядами требуется специальное оборудование, которое так дорого, что его производством и эксплуатацией приходится заниматься в централизованном порядке государственными учреждениями. Подрядчики могут пользоваться всем таким оборудованием, необходимым им в процессе разработки образца управляемого снаряда.

Так, например, для испытания аэродинамических моделей и воздушно-реактивных двигателей нужны аэродинамические

трубы и различные устройства для создания воздушного потока. В распоряжении НАКА (Национального консультативного комитета по авиации) имеются аэродинамические трубы на авиабазе ВМС США «Моффет-филд» в Калифорнии и авиабазе ВВС США «Лэнгли-филд» в штате Виргиния. Большинство установок для испытаний реактивных двигателей находится в Кливленде (штат Огайо). Хотя они предназначены главным образом для исследований, проводимых НАКА, ими можно пользоваться и в процессе работ над управляемыми снарядами, если имеющиеся в высших учебных заведениях, частных фирмах и военных исследовательских учреждениях установки не удовлетворяют требуемым условиям.

Важным средством для ускорения разработки новых образцов управляемых снарядов являются быстросрабатывающие электронные вычислительные машины или моделирующие устройства, имеющиеся в распоряжении вооруженных сил. Эти сложные и дорогостоящие устройства способны рассчитывать траектории снарядов от точки старта до точки встречи с целью; без их помощи производство вычислений, связанных с полным анализом характеристик снаряда, потребовало бы огромного количества времени. При составлении таблиц пространственного полета обычно используются очень крупные моделирующие устройства, позволяющие воспроизводить работу системы стабилизации в натуральном масштабе времени. Небольшие электронные вычислительные машины становятся основным инструментом конструкторов управляемых снарядов.

Для проведения летных испытаний управляемых снарядов требуются обширные районы, в которых должна быть создана сеть контрольно-измерительных пунктов и обеспечена безопасность. Как показано на рис. 1.1, каждый вид вооруженных сил проводит летные испытания в соответствии со своими специфическими нуждами. Детально эти вопросы рассматриваются в четвертой книге настоящей серии, в разделе «Полигонные испытания».

Создание особых условий, необходимых для работы над боевыми частями управляемых снарядов. Разработка боевых частей снарядов требует создания особых условий для работы и осуществляется до сих пор только в государственных лабораториях. Это объясняется наличием там высококвалифицированных специалистов, особой опасностью взрывчатых веществ в обращении и строгим режимом секретности, необходимым для того, чтобы, например, параметры радиовзрывателей не стали известны противнику. Возможно, что в дальнейшем придется отказаться от такой централизации, поскольку боевые части должны так же тщательно увязываться со всем снарядным комплексом, как и другие агрегаты.

Стимулирование развития промышленности. Вооруженные силы несут ответственность за создание благоприятных условий для развития мощной промышленности управляемых снарядов, одного из важных элементов военной мощи страны. С этой целью они организуют обмен технической информацией путем распространения отчетов и издания технических сборников. Подрядчик, работающий добросовестно и успешно, обычно может рассчитывать на изобилие заказов в области управляемых снарядов.

1.3. Основные обязанности подрядчика

Рассмотрим теперь обязанности другого участника процесса создания управляемых снарядов — подрядчика. Кроме патристических чувств, им руководит стремление получить прибыль. Фирма-подрядчик возьмет на себя определенные обязательства и заключит контракт только при том условии, если последний **выгоден** для нее, ибо в противном случае ее капитал вскоре **истощится** и она не сможет больше приносить пользу стране и акционерам.

Способы получения заказов. По мере расширения национальной программы производства управляемых снарядов все большее число подрядчиков стремится принять участие в ее осуществлении. Допустим, что данный подрядчик имеет необходимый управленческий аппарат и инженерный персонал и располагает необходимым капиталом и оборудованием. **Каким образом он может включиться в производство управляемых снарядов?**

При отсутствии опыта в этом деле наиболее эффективный метод состоит в заключении контракта с субподрядчиками на проектирование отдельных агрегатов управляемого снаряда. Обычно субподрядчики разрабатывают такие агрегаты, для создания которых у самого подрядчика нет достаточных технических или производственных возможностей. При этом недостаток опыта в создании управляемых снарядов может быть в значительной мере компенсирован опытом работы в других областях техники, имеющих сходство с ракетостроением. Многие авиационные **компании**, имеющие контракты на проектирование управляемых снарядов, **передают** заказы на изготовление систем управления и реактивных двигателей другим фирмам. И наоборот, многие компании по выпуску аппаратуры управления расширяют поле деятельности и занимаются разработкой комплексов управляемых снарядов.

Вооруженные силы все шире используют «соревнование проектов» как основу для заключения контрактов. Представляемые проекты, как правило, должны базироваться на широких тактико-технических требованиях. Большое значение придается

инженерному подходу к решению проблемы, хотя не оставляются без внимания стоимость и возможность выполнения проекта.

Некоторые проекты поощряются как оригинальные работы, являющиеся настолько многообещающими, что вооруженные силы заинтересованы в дальнейшей работе над ними. Однако неопытный подрядчик может истратить много средств на разработку «новой» идеи только для того, чтобы обнаружить, что она была открыта и отброшена много лет назад. Вооруженные силы должны быть заранее в курсе каждого проекта, разрабатываемого мнимые «новинки». Если идея окажется действительно новой, военное командование отнесется с **должным уважением** к авторским правам изобретателя. В случае же, **если** она является бесперспективной, вооруженные силы предостерегут конструктора от напрасных усилий.

При разработке некоторых простейших снарядов или отдельных их узлов, требующей сравнительно небольших затрат, подрядчики сами финансируют исследовательские работы. Риск, которому они подвергаются, является минимальным, если вооруженные силы интересуются данным проектом. Однако часто вооруженные силы не могут оказать подрядчику **финансовую** поддержку из-за отсутствия фондов. В таких случаях командование поддерживает его морально, а кроме того, проводит бесплатно испытания готовых образцов. Если испытания пройдут успешно, подрядчик окажется в **выгодном положении** как обладатель авторских прав на изобретение. В случае же **неудачи** часть расходов может быть возмещена при налоговых расчетах.

Эскизный проект и макет снаряда. Содержание контракта на проектирование управляемых снарядов может меняться в широких пределах в зависимости от **наличия денежных средств**, результатов предшествующих исследований, **возможностей** данного подрядчика и других факторов. Первый этап работы обычно заключается в разработке эскизного проекта и изготовлении макета снаряда. Эскизный проект предназначен для уточнения основных размеров и характеристик снаряда и его вспомогательного оборудования. Макет помогает зрительно представить готовый управляемый снаряд. Затем определяется **техническая** осуществимость проекта и ценность данного снаряда как боевого средства. Это необходимо для того, чтобы решить, следует ли продолжать работу над данным образцом или нет.

Технический проект и опытный образец. Следующий этап — разработка технического проекта и создание модели-прототипа — **самый трудоемкий**. К этому моменту командование соответствующего вида вооруженных сил убеждается в том, что проектируемый снаряд может и должен быть создан. Тогда заключается контракт на проектирование и изготовление доста-

точного количества опытных образцов снаряда для выявления его пригодности посредством летных испытаний. Обычно проходит по крайней мере 18 месяцев, прежде чем первый снаряд будет готов к летным испытаниям. Детально эти вопросы рассматриваются в четвертой книге настоящей серии, в разделе «Организация производства систем».

Испытания опытных образцов. При проектировании управляемого снаряда одной из важнейших задач является обеспечение надежности работы всех его составных частей. Еще никогда вопросу надежности «летающего» оружия не придавалось такого важного значения. Обычные артиллерийские снаряды очень надежны в действии благодаря простоте своего устройства. Различного рода неисправности, возникающие в самолете во время полета, в большинстве случаев не приводят к аварии только потому, что самолетом управляет пилот, искусство которого обеспечивает благополучное приземление. Управляемые снаряды устроены так же сложно, как и самолеты, и в то же время лишены пилота, который мог бы устранить замеченную неисправность. По этой причине испытания играют важную роль в создании управляемых снарядов.

Испытания опытного образца обычно состоят из лабораторных испытаний, испытаний в воздухе с помощью самолетов и экспериментальных ракет и собственно летных испытаний снаряда. Поскольку эти испытания предназначены для усовершенствования конструкции снаряда, подрядчик несет ответственность за их техническую сторону. Как уже отмечалось выше, **правительство оказывает содействие** исследовательским работам в области управляемых снарядов, предоставляя в распоряжение фирм-подрядчиков полигоны, авиацию, вычислительные машины, моделирующие устройства и аэродинамические трубы. Если подрядчик продемонстрирует в ходе испытаний удовлетворительные качества своего снаряда, его усилия обычно вознаграждаются: с ним заключают контракт на проектирование и изготовление штатных образцов. В конструкцию этих снарядов вносятся необходимые изменения, и впоследствии они являются образцами для массового производства. Для оценки их качеств проводятся летные испытания, причем руководит такими испытаниями уже заказчик, а подрядчик выступает лишь в роли наблюдателя. Детально эти вопросы освещены в четвертой книге серии, в разделах «Полигонные испытания» и «Организация производства систем».

Обработка штатных снарядов. Когда летные испытания покажут, что снаряд соответствует тактико-техническим требованиям, опытный подрядчик будет считать свою работу только частично законченной. Принятие нового образца на вооружение представляет сложный и длительный процесс. Обычно

подрядчика привлекают для помощи в обучении обслуживающего персонала и для устранения технических дефектов, неизбежно возникающих при эксплуатации боевой техники. Многие подрядчики содержат для этих целей своих представителей в войсках.

К моменту завершения работы над управляемым снарядом подрядчик, как правило, всегда может внести целый ряд изменений в отработанный образец до передачи его в производство. Однако обычно он предпочитает разрабатывать улучшенную модель уже находящегося в процессе производства снаряда. Таким путем умелый подрядчик сохраняет положение поставщика снарядов определенного типа.

1.4. Государственные лаборатории

Правительство не только содействует разработке управляемых снарядов по линии национальной промышленности и высших учебных заведений, но и руководит созданием снарядов в государственных лабораториях.

Опыт показывает, что производство таких снарядов, какие требуются вооруженным силам, зачастую не может быть осуществлено промышленностью из-за отсутствия производственных возможностей. Кроме того, при разработке проектов часто необходима высокая степень секретности. Государственные лаборатории очень хорошо приспособлены для выполнения работ такого типа. Очевидно, что при таких обстоятельствах конкуренция между лабораториями и промышленностью сведена к минимуму.

1.5. Высшие учебные заведения

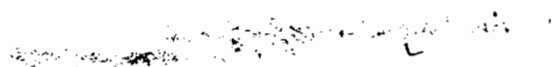
Высшие учебные заведения играют важную роль в осуществлении национальной программы развития управляемых снарядов. По заказу правительства или частных подрядчиков вузы ведут исследовательские работы, которые могут способствовать прогрессу ракетной техники. В ряде случаев высшие учебные заведения создают специальные группы, которые фактически руководят разработкой управляемых снарядов. Однако, как правило, вузы предпочитают сотрудничать лишь в области исследовательских работ, оставляя разработку и производство снарядов на долю промышленности.

Вузы готовят все больше и больше конструкторов управляемых снарядов. Одной из целей выпуска настоящей серии книг является создание несекретного руководства для молодых инженеров, чьи услуги очень нужны промышленности. Очевидно, что активное участие в исследовательской работе в области управле-

мых снарядов даст возможность студентам ознакомиться с последними достижениями науки и техники, стать квалифицированными инженерами.

1.6. Заключение

Рассмотрев процесс создания управляемых снарядов, мы видим, что он строится на базе американской экономической системы и характеризуется тесным сотрудничеством государственных учреждений и промышленных фирм-подрядчиков. Выступая в качестве государственных заказчиков, вооруженные силы формулируют свои требования, заключают контракты на разработку проектов и оценивают качество готовых снарядов. Конкурирующие друг с другом подрядчики разрабатывают и изготавливают снаряды, производят летные испытания и оказывают помощь при освоении оружия в войсках. Высшие учебные заведения играют важную роль в разработке и усовершенствовании управляемых снарядов, проводя широкую исследовательскую работу. При условии взаимного понимания задач и обязанностей заказчиком и подрядчиком, то есть вооруженными силами и промышленностью, мы можем достигнуть выдающихся успехов в создании новых видов оружия.



ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ

2.1. Введение

При решении любой сложной проблемы полезно свести ее к рассмотрению нескольких основных вопросов, дающих ключ ко всему остальному. Управляемые снаряды в конечном счете представляют собой продукт неустанных стремлений человека к созданию все более мощного оружия. Для поражения противника с минимальным риском для себя необходимо иметь оружие, обладающее максимальной дальностью и точностью стрельбы. Основное преимущество управляемых снарядов состоит в том, что человек может управлять их полетом по своему желанию и, таким образом, обеспечивать высокую точность стрельбы. При управлении полетом снаряда с помощью радиолокатора, находящегося на большом удалении от цели, возможность противодействия противника сводится к минимуму. Благодаря этому управляемые снаряды способны заменить собою громадное большинство известных до сих пор видов оружия, за исключением, вероятно, огнестрельного оружия малого калибра. Следует иметь в виду, что любой комплекс управляемого снаряда предназначен для замены какой-то другой системы оружия. Преимущества управляемых снарядов перед существующими системами оружия должны быть установлены заблаговременно с помощью методов исследования операций до и во время разработки проекта, а также с помощью летных испытаний, прежде чем принять снаряд на вооружение. При несоблюдении этого принципа затраченные усилия могут оказаться напрасными.

2.2. Классификация управляемых снарядов

Прежде всего необходимо определить, что такое комплекс управляемого снаряда, и рассмотреть принципы классификации таких комплексов.

Управляемый снаряд есть беспилотный летательный аппарат, имеющий на борту средства управления полетом. *Комплекс управляемого снаряда* — это совокупность управляемого сна-

ряда, пусковой установки, наземной аппаратуры управления, испытательного, заправочного и подъемно-транспортного оборудования, которые все вместе обеспечивают выполнение задачи по уничтожению цели. Средства обнаружения цели и определения ее координат обычно не включают в комплекс управляемого снаряда, хотя и они необходимы для поражения цели.

Управляемые снаряды классифицируются по местоположению точки старта и точки встречи снаряда с целью. В соответствии с принятой в США классификацией существуют четыре основных класса управляемых снарядов: «земля¹ — земля», «земля — воздух», «воздух — земля» и «воздух — воздух». Снаряды класса «земля — земля» могут запускаться с наземных стартовых позиций или с палуб кораблей и использоваться для поражения наземных сооружений, наземных подвижных целей и надводных кораблей противника. Снаряды класса «земля — воздух» могут применяться против вражеских самолетов, дирижаблей, аэростатов или управляемых снарядов. Подобный принцип классификации весьма удобен, так как обычно с разработкой снарядов одного и того же класса связано решение множества одинаковых технических проблем.

Структура вооруженных сил требует, чтобы управляемые снаряды имели условные обозначения, позволяющие отличить их друг от друга. Эти обозначения состоят из нескольких букв и цифр, указывающих, на вооружении какого вида вооруженных сил находится снаряд, для стрельбы по каким целям он предназначен и какую систему оружия снаряд заменяет или дополняет.

Наконец, каждому управляемому снаряду для удобства обычно дается свое название, например «Регулус», «Найк», «Матадор» и др.

2.3. Требования со стороны вооруженных сил

На протяжении жизни последнего поколения появились новые виды оружия, что привело к расширению традиционной сферы деятельности вооруженных сил страны в сторону использования воздушного пространства. Принятие закона о национальной безопасности 1947 г. в основном было продиктовано стремлением установить единое направление развития всех видов вооруженных сил и придать им такую организационную структуру, которая бы отвечала новым формам и способам ведения войны. Это было достигнуто путем создания

¹ Под словом «земля» подразумевается поверхность суши или моря. — *Прим. ред.*

министерства обороны и подчиненных ему министерств армии, ВМС и ВВС.

Первый министр обороны Джеймс Форрестол в апреле 1948 г. определил задачи различных видов вооруженных сил и комитета начальников штабов в меморандуме, известном под названием «Ки-Уэстское соглашение». Этот документ лежит в основе требований, предъявляемых к управляемым снарядам со стороны вооруженных сил. Поэтому не лишне привести отдельные места из этого документа, чтобы лучше понять, какой управляемый снаряд нужен армии, авиации или флоту.

Армия. Основная задача армии формулируется следующим образом: «Организовывать, обучать и вооружать личный состав сухопутных войск для ведения стремительных и непрерывных боевых действий на суше». Сухопутные войска должны:

- а) наносить удары по сухопутным войскам противника;
- б) захватывать и удерживать районы суши».

Именно эти задачи армия, используя обычное оружие, выполняла в течение всего периода существования США. Поэтому естественно, что она заинтересована в управляемых снарядах, которые увеличивают ее мощь.

Управляемые снаряды класса «земля — земля» призваны заменить собой артиллерийские орудия, минометы и противотанковые средства, причем надо сказать, что в большинстве случаев после такой замены дальность стрельбы, условия боевого применения и цели остаются в основном теми же самыми. Особое значение для сухопутных войск имеет применение атомных боевых частей, поскольку управляемые снаряды с атомным зарядом могут использоваться для стрельбы по наземным целям, имеющим важное оперативно-тактическое значение. Управляемые снаряды, снабженные фотоаппаратами или телевизионными камерами, могут дополнить существующие средства воздушной разведки и наблюдения.

Другой важнейшей задачей армии является «оснащение сухопутных войск всем необходимым для обороны США от воздушного нападения в соответствии с планом совместных действий с другими видами вооруженных сил, утвержденным комитетом начальников штабов». Для выполнения этой задачи и для прикрытия с воздуха на поле боя армия нуждается в управляемых снарядах класса «земля — воздух».

Военно-морские силы. Для выполнения основных задач флота требуются управляемые снаряды различных классов. Военно-морские силы должны: «Организовывать, обучать и вооружать личный состав флота и морской пехоты для ведения стремительных и непрерывных боевых действий на море, включая боевые действия авианосной и гидроавиации, а также авиации берегового базирования». Военно-морские силы обязаны:

«а) обнаруживать и уничтожать военно-морские силы противника и препятствовать свободному плаванию его торгового флота;

б) завоевывать и сохранять господство на море;

в) контролировать жизненно важные морские районы и охранять важнейшие морские коммуникации;

г) устанавливать и сохранять местное превосходство сил (в том числе в воздухе) в районах боевых действий флота;

д) захватывать и удерживать выдвинутые вперед морские базы и вести такие действия на суше, которые способствовали бы действиям флота».

В соответствии с этими задачами военно-морские силы нуждаются в разнообразных управляемых снарядах класса «земля—земля», запуск которых осуществляется с кораблей. Ведение флотом боевых действий предполагает бомбардировку управляемыми снарядами морских баз, а также аэродромов и других целей, причем некоторые из них могут находиться на расстоянии сотен километров от побережья. Для поражения таких целей целесообразно применять снаряды с атомными боевыми частями. Подобные снаряды дополнят, а позднее, возможно, и заменят атомные бомбардировщики, предназначенные сейчас для выполнения этих задач. Крупнокалиберные морские орудия могут быть заменены управляемыми снарядами, предназначенными для стрельбы по вражеским кораблям и для бомбардировки береговых укреплений при проведении морских десантных операций.

Завоевание местного превосходства в воздухе над районом боевых действий сил флота приобретает особо важное значение ввиду угрозы применения противником атомных бомб. Зенитные пушки и истребители-перехватчики, базирующиеся на авианосцах, должны быть дополнены, а позднее, возможно, и заменены управляемыми снарядами класса «земля—воздух». Эффективность перехватчиков может быть значительно увеличена с помощью управляемых снарядов класса «воздух—воздух». Истребители, вооруженные такими снарядами, необходимы также для контролирования воздушного пространства над районами боевых действий, проводимых на большом удалении от кораблей.

Одной из задач военно-морских сил является «обеспечение поддержки с воздуха при ведении боевых действий надводными силами. Прежде эту задачу выполняла авианосная авиация с помощью бомб и неуправляемых реактивных снарядов с обычным зарядом. Однако для повышения точности стрельбы на большие дальности необходимы управляемые снаряды класса «воздух—земля». Для поражения особо важных целей такие снаряды могут снабжаться атомными боевыми частями.

Наконец, задачами военно-морских сил являются «морская разведка, борьба с подводными лодками противника, охранение торговых судов, установка минных заграждений, включая минирование с воздуха, и т. п.» Выполнение всех этих задач требует применения управляемых снарядов, запускаемых с кораблей и самолетов для борьбы с подводными лодками (как в надводном, так и в подводном положении) и для минирования вражеских вод. Управляемые снаряды, снабженные фотоаппаратами или телевизионными камерами, могут использоваться для целей разведки.

Военно-воздушные силы. Основная задача ВВС формулируется так: «Организовывать, обучать и вооружать личный состав военно-воздушных сил для ведения стремительных и непрерывных боевых действий в воздухе. Военно-воздушные силы обязаны:

а) нести ответственность за оборону США с воздуха в соответствии с планами, разработанными комитетом начальников штабов;

б) завоевывать и сохранять господство в воздухе;

в) уничтожать военно-воздушные силы противника;

г) прикрывать с воздуха жизненно важные районы;

д) устанавливать местное превосходство авиации над районами боевых действий, за исключением случаев, когда это является обязанностью другого вида вооруженных сил».

В прошлом военно-воздушные силы выполняли эти задачи с помощью пилотируемых истребителей-перехватчиков, вооруженных пушками и неуправляемыми реактивными снарядами. Управляемые снаряды необходимы для дополнения или замены этих видов оружия. В конечном счете сами перехватчики могут быть заменены управляемыми снарядами класса «земля—воздух», но в течение некоторого времени эти два вида оружия должны будут дополнять друг друга. Кроме того, для повышения эффективности действия перехватчиков необходимо вооружить их управляемыми снарядами класса «воздух—воздух»: это имеет исключительно важное значение для успешной борьбы с бомбардировщиками — носителями атомного оружия.

Военно-воздушные силы также «ответственны за ведение стратегических бомбардировок». Для выполнения этой задачи требуются управляемые снаряды класса «воздух—земля», которые позволят бомбардировщикам поражать цели с большой точностью, находясь за пределами зоны ПВО противника. Кроме того, бомбардировщики должны быть вооружены управляемыми снарядами класса «воздух—воздух» для защиты от нападения истребителей. Наконец, сами бомбардировщики могут быть полностью заменены управляемыми снарядами дальнего действия класса «земля—земля».

В задачи военно-воздушных сил входят: «снабжение сухопутных сил и непрерывная поддержка их с воздуха, включая ведение тактической разведки и нанесение ударов по коммуникациям и войскам противника с целью помешать их действиям». Для выполнения этих задач требуются управляемые снаряды класса «земля—земля», а также снаряды класса «воздух—земля», которыми должны быть вооружены истребители и легкие бомбардировщики.

Вспомогательные задачи отдельных видов вооруженных сил формулируются следующим образом: «Совершенствуя вооружение и обучая личный состав действиям по выполнению основных задач, быть готовыми поддержать и дополнить действия других видов вооруженных сил в тех случаях, когда это будет способствовать достижению общего успеха». В частности, к основным задачам вооруженных сил добавляются следующие вспомогательные задачи, для выполнения которых требуются управляемые снаряды:

сухопутные войска: препятствовать действиям ВВС и ВМС противника и нарушать его коммуникации;

военно-морские силы: препятствовать действиям сухопутных войск и ВВС противника и нарушать его коммуникации. Обеспечивать непосредственную авиационную поддержку действий сухопутных войск;

военно-воздушные силы: препятствовать действиям флота противника; вести борьбу с подводными лодками противника и обеспечивать прикрытие с воздуха своих судов; производить минирование участков моря с воздуха.

Стандартизация требований. Основной принцип «Ки-Уэстского соглашения» требует выполнения задач отдельными видами вооруженных сил таким образом, чтобы «избегать ненужного дублирования и параллелизма, используя личный состав, разведывательные органы, имущество, вооружение и различные службы любого вида вооруженных сил или всех сразу во всех случаях, когда этим может быть достигнута большая эффективность и экономия средств».

Вооруженные силы критикуют за то, что вследствие самостоятельной разработки управляемых снарядов каждым видом вооруженных сил происходит дублирование и параллелизм. На самом же деле затрачивается очень много усилий, чтобы выдержать дух и букву упомянутого выше принципа. В ряде случаев осуществляется объединенный контроль со стороны всех видов вооруженных сил за разработкой проектов с целью унифицировать тактико-технические требования. Министерство обороны своевременно извещает все виды вооруженных сил о разрабатываемых проектах, так что они могут определить степень своей

заинтересованности в создании нового снаряда и при желании принять участие в работе.

Полная стандартизация, по существу, невозможна, так как требования со стороны различных видов вооруженных сил сильно отличаются друг от друга. Например, военно-морским и военно-воздушным силам могут потребоваться управляемые снаряды класса «земля—земля», обладающие одинаковой дальностью и точностью стрельбы, а также одинаковым разрушительным действием. Но снаряд для ВМС должен быть приспособлен для запуска с подводных лодок, что вовсе не требуется военно-воздушным силам. Кроме того, морской вариант снаряда может нуждаться в складывающихся крыльях и других приспособлениях, не являющихся необходимыми и, может быть, даже вредными для авиационного варианта.

На практике осуществляется стандартизация только отдельных деталей и исследовательской аппаратуры, например телеметрической. Проведению стандартизации способствует обмен технической информацией между различными видами вооруженных сил и взаимный контроль за разработкой управляемых снарядов.

2.4. Сущность исследования операций и область применения

Лишь недавно, когда стало возможным рассказать о роли исследования операций во время второй мировой войны, оно получило широкое признание как прикладная наука, весьма важная для ведения войны. В этот период группы по исследованию операций, работавшие под руководством военного командования в Вашингтоне и на театрах военных действий, позволили значительно улучшить использование различных боевых средств, особенно подводных лодок. Работа этих групп состояла главным образом в анализе боевых действий с целью выявления наиболее совершенной тактики. Следует ожидать, что применение методов исследования операций к управляемым снарядам, являющимся новым средством борьбы, окажется весьма полезным как при разработке, испытаниях и оценке этих снарядов, так и при их боевом использовании.

Ф. Морз и Дж. Кимбелл в своей книге «Методы исследования операций» определили исследование операций как «научный метод, дающий в распоряжение военного командования или другого исполнительного органа количественные основания для принятия решений относительно действий войск или других организаций, находящихся под его управлением»¹. В этом определении содержится ряд моментов, требующих уточнения.

¹ Morse Ph. M. and Kimball G. E., *Methods of Operations Research*, The Technology Press of M. I. T. and John Wiley and Sons, Inc., p. 1.

Решения, относящиеся к операциям, должны в конечном счете приниматься каким-то руководящим лицом. Для того чтобы принять правильное решение, этот человек должен учитывать, с одной стороны, количественные факторы, определенные с помощью методов исследования операций, а с другой — качественные факторы, выявленные иными способами. Последние относятся к области политики, этики, морали и традиций. Количественные факторы поддаются беспристрастному научному анализу и поэтому относятся к сфере исследования операций.

Весьма существенно, чтобы деятельность лиц, занимающихся исследованием операций, не смешивалась с функциями руководства. Например, президент какой-либо компании, стремящийся заключить контракт на разработку управляемого снаряда, должен быть достаточно эрудирован для того, чтобы руководить работой своего инженерного персонала в области исследования операций. Однако он не должен оказывать давление на исследователей, чтобы не направить их на поиски тех результатов, которые он инстинктивно предпочитает. В противном случае результаты анализа перестанут быть объективными, что в конечном счете не принесет пользы заказчику.

Со своей стороны, сотрудники группы по исследованию операций должны придерживаться объективного, научного подхода к решению своих задач. Выводы следует докладывать ясно и четко, без всяких специальных терминов. Отчет о результатах исследования операций, служащих основой для принятия решения руководителем, должен быть написан в понятной для него форме. Основную часть отчета составляет краткое изложение наиболее важных результатов анализа с необходимыми иллюстрациями, а математические выкладки помещаются в приложениях.

Не следует думать, что между руководителем, принимающим решение, и специалистом по исследованию операций не должно быть тесного контакта в ходе разработки проекта. Руководитель должен четко сформулировать вопросы, на которые он желает получить ответ, прежде чем принять решение; исследователь должен ответить на поставленные вопросы и, кроме того, может указать на качественные факторы, которые должны быть учтены.

Применительно к проектированию управляемых снарядов исследование операций можно определить как *изучение проектируемого или существующего комплекса управляемого снаряда, применяющегося в ожидаемой или реальной оперативно-тактической и стратегической обстановке с целью определения его соответствия требованиям вооруженных сил*. В результате исследования может быть выявлена необходимость разработки,

Виды получаемой информации	Классы получаемой информации	Для выработки систем оружия	Что помогает вооруженным силам в
Директивы командования вида вооруженных сил — заказчика Контрольная оценка срочных докладов и донесений Информация разведывательной службы Доклады центрального разведывательного управления Информация, полученная от частных лиц Информация, полученная от других министерств Научно-исследовательские работы и разработки Обеспечение материальной частью и изготовления вооруженных сил Численность вооруженных сил Обучение войск Организация тыла и снабжения, основные базы Возможности НАТО и СЕАТО Экономика Запасы стратегических материалов Ядерное оружие и его производство Людские резервы и их политико-моральное состояние Ресурсы нейтральных и союзных стран, которые можно использовать Несекретная литература Секретные доклады о научных изысканиях, разработках и испытаниях Технические сборники Посещения промышленных предприятий, научно-исследовательских институтов, государственных учреждений, испытательных станций, войсковых частей и зарубежных стран Изымаемая вооруженными силами литература Непосредственное наблюдение за действиями войск в полевых условиях Совещания с опытными офицерами Доклады групп по исследованию операций в войсках Информация о ходе оперативно-тактической подготовки и боевых действий войск	Постановка задач → Сведения о противнике Сведения о вооруженных силах Национальные ресурсы Состояние техники вооружения Существующие стратегические и оперативные тактические взгляды →	Определяет потребность вооруженных сил в данном образце Разрабатывает тактико-технические требования Дает оценки (общую и сравнительную) Составляет планы использования Оценивает возможности противника Ведет различные исследования	Подготовке к созданию нового образца Составлении научно-исследовательских работ Пересмотре направления теоретических изысканий Пересмотре перспективных планов ведения войны Руководстве работами подрядчика Координировании соответствующих изысканий между различными видами вооруженных сил и родами войск Принятии решения о прекращении или ускорении разработки нового образца Выборе между двумя конкурирующими системами оружия Осуществлении стандартизации вооружения Проведении войсковых испытаний Оценке тактической эффективности нового образца Выработке программы производства и снабжения Разработке программы обучения войск Оснащении войск Принятии решения о выделении дополнительных средств Пересмотре планов использования вооруженных сил в войне Пересмотре действенности наших контрмер Изменении наших планов научно-исследовательских работ, разработок, стратегических или оперативных тактических взглядов Решении различных проблем планирования (например, выбор систем оружия для НАТО, разработка единых аэронavigационных систем и т. п.)

Группа по исследованию операций

Р и с. 2.1. Место исследования операций в системе национальной обороны США.

испытаний и оценка качеств нового образца снаряда или же найдены способы более эффективного использования существующих образцов.

Основным инструментом исследования операций является не что иное, как обычная логика с ее классической методикой разрешения проблем. При проведении исследования необходимо установить конкретные условия, отделить факты от предположений, рассмотреть все возможные способы действий и выбрать из них наилучший. Эта схема сохраняется при решении любых проблем, хотя удельный вес каждого из указанных этапов может меняться в зависимости от специфики проблемы.

Усложнение способов ведения войны и возрастающая роль военной техники требуют, чтобы логика подкреплялась научным анализом, каким является современный метод исследования операций. Поэтому для разработки управляемых снарядов нужно не только разбираться в вопросах стратегии и тактики и быть знакомым с техникой создания снарядов, но также уметь пользоваться научными методами анализа в тех случаях, когда они могут оказаться полезными. По этой причине вооруженные силы все в большей степени нуждаются в помощи гражданских специалистов по исследованию операций. Рис. 2.1 показывает роль исследования операций в системе национальной обороны.

Исследование операций не является точной наукой. Изучение комплекса управляемого снаряда производится на основе таких факторов, как оценка разведывательной информации, анализ стратегической обстановки и предвидение возможной тактической ситуации. Прежде чем перейти к математическому анализу, необходимо сделать некоторые допущения, основанные на личном опыте и мнении исследователя. Сделанные допущения могут оказаться нереальными или недостаточными, и поэтому основанные на них выводы будут неправильными. Например, можно прийти к выводу о необходимости разработки нового снаряда класса «воздух—воздух» для истребителя-перехватчика, предполагая, что имеются средства для наведения истребителя на цель и что он сможет своевременно занять выгодное положение для пуска управляемого снаряда. Если же на самом деле таких средств нет или не будет, когда они потребуются, то большие усилия, затраченные на разработку управляемого снаряда, пропадут даром.

Для того чтобы правильно спроектировать комплекс управляемого снаряда, необходимо ясно представлять себе его назначение. Поэтому исследование операций ведется параллельно с проектированием. Фактически исследование операций производится на протяжении всего процесса создания снаряда — сначала для обоснования необходимости его разработки, затем для

выработки тактико-технических требований и, наконец, для определения наиболее эффективных способов его использования.

Спрос на опытного исследователя операций в промышленности и вооруженных силах заметно возрастает. Для любознательного человека, обладающего способностью отделять факты от мнений, в этой области открываются блестящие перспективы.

В настоящей главе затронуты лишь основы исследования операций применительно к управляемым снарядам. Более подробные материалы можно найти в закрытой литературе, доступной служащим в вооруженных силах специалистам. Список несекретной литературы приведен в конце раздела.

Несколько ведущих американских университетов создали специальный курс «Исследование операций» с уклоном на применение этого метода к решению проблем производства. Существует два общества, занимающихся вопросами исследования операций: «Американское общество по исследованию операций» в США и «Общество по исследованию операций» в Англии (Лондон); оба они выпускают периодические издания.

2.5. Типовые проблемы

Теперь уже стало очевидным, что с помощью исследования операций может быть решено множество различных проблем. Для того чтобы изложить этот вопрос в рамках настоящего раздела, было выбрано лишь несколько характерных проблем. Это, как правило, широкие проблемы, включающие в себя круг специальных вопросов.

Проблема «А»: Определение необходимости разработки нового образца

На основе данных стратегических и оперативно-тактических взглядов, а также технических возможностей определить необходимость разработки нового образца.

Обстоятельства, которые приводят к возникновению такого рода проблемы, включают обнаружение нового и более могущественного оружия в руках потенциального противника, выявление серьезных недостатков нашего вооружения или заметный прогресс техники, создающий возможности для развития новых видов оружия.

Проблема «Б»: Определение тактико-технических требований

На основе решения о необходимости разработки нового образца определить тактико-технические требования к наиболее эффективному комплексу управляемого снаряда.

Эта проблема возникает тогда, когда уже принято решение начать разработку нового снаряда, но все-таки желательно изучить вопрос всесторонне, для того чтобы выработать реальные тактико-технические требования. Очень часто анализ, необходимый для решения проблемы, проводится совместно с приближенным проектированием, при котором грубо определяются технические характеристики комплекса управляемого снаряда. Первая часть анализа проводится государственными учреждениями, вторая — подрядчиком.

Проблема «В»: Сравнительная оценка комплекса управляемого снаряда и конкурирующей системы оружия

Сравнивая характеристики и состояние разработки данного комплекса управляемого снаряда и конкурирующей системы оружия, определить необходимость изменения темпов работы по созданию снаряда.

При разработке любого управляемого снаряда все время производится сравнение его как боевого средства с конкурирующими системами оружия или другими образцами управляемых снарядов. Такая сравнительная оценка производится особенно тщательно в тех случаях, когда разработка снаряда идет весьма успешно или, наоборот, неудачно; когда конкурирующие системы оружия добиваются значительного прогресса или когда национальная политика требует изменения темпов разработки вооружения.

Проблема «Г»: Определение пригодности для боевого применения и выработка наилучшей тактики использования

Исходя из характеристик комплекса управляемого снаряда на последнем этапе разработки, определить его пригодность для боевого применения и выработать наилучшую тактику использования.

Эта очень важная проблема решается во время оценочных войсковых испытаний. История вооружения полна примеров преждевременного массового выпуска нового оружия и применения его без соответствующих оценочных испытаний. Опыт второй мировой войны также показывает, что новое оружие, особенно предназначенное для борьбы с подводными лодками, часто неправильно использовалось, пока, наконец, с помощью методов исследования операций не находили способов его наиболее выгодного применения. В настоящее время каждый вид вооруженных сил имеет специальные учреждения для проведения

испытаний и оценки пригодности нового оружия как боевого средства, а также для разработки наилучших тактических приемов его использования.

Проблема «Д»: Определение влияния нового вида оружия на стратегическое планирование

Исходя из характеристик комплекса управляемых снарядов в последней стадии оценочных испытаний, определить его влияние на стратегическое планирование.

Эта проблема имеет особое значение при появлении снаряда, более мощного, чем существующие виды оружия. Тогда важно найти пути использования нового мощного оружия в стратегическом масштабе. Такой анализ, несомненно, был проделан, прежде чем было принято решение сбросить первую атомную бомбу на Хиросиму. Конечно, не всегда речь идет о принятии таких трагических решений. Например, часто бывает необходимо выяснить, какие расходы потребуются на стратегические материалы и квалифицированную рабочую силу при массовом производстве нового образца вооружения.

2.6. Заключение

Содержание основных проблем для исследования операций в области управляемых снарядов определяется функциями различных видов вооруженных сил и требованиями, предъявляемыми к снарядам. Исследование операций представляет логический метод, с помощью которого проектируемый или существующий комплекс управляемого снаряда рассматривается на фоне предполагаемой или существующей тактической и стратегической обстановки, для того чтобы создать снаряд, наиболее полно удовлетворяющий предъявляемым требованиям. Для успешного проведения исследования операций в области управляемых снарядов необходима способность к логическому мышлению, знание основ стратегии и тактики, достаточная компетенция в технических вопросах и владение методами научного анализа. Среди множества других проблем можно выделить ряд широких, типовых проблем, которые включают в себя круг специальных вопросов. Принципы решения этих проблем излагаются в последующих главах.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ РАЗРАБОТКИ НОВОГО КОМПЛЕКСА УПРАВЛЯЕМОГО СНАРЯДА

3.1. Введение

Соображения секретности ограничивают рассмотрение предмета исследования операций. Невозможно говорить о существующих снарядах, не раскрывая их характеристик. Поэтому методы исследования операций будут применены к некоторым гипотетическим случаям. Для того чтобы это представляло интерес для всех видов вооруженных сил, будут рассмотрены пять основных проблем. При решении этих проблем в последующих главах будут установлены наиболее важные принципы.

Там, где это необходимо, будут приводиться иллюстрации и графики, но в интересах соблюдения секретности они будут отражать лишь условные характеристики. Автор намеренно выбрал количественные данные, которые не имеют никакого отношения к существующим снарядам, за исключением того, что базируются на реальной основе. Математические выкладки, требующиеся для построения графиков, приводятся в последующих главах, поскольку они представляют лишь основной инструмент исследования операций и не являются необходимыми для понимания принципов этого анализа.

3.2. Критерий эффективности оружия

Конечной целью разработки управляемого снаряда является достижение максимальной эффективности его действия как боевого средства. Хотя эффективность оружия представляет собой сложное понятие и поэтому трудно поддается оценке, все же ее можно определить как

$$E = \frac{D}{C}, \quad (3.1)$$

где E — эффективность оружия, D — общий причиненный (или предотвращенный) ущерб, а C — общая стоимость оружия (D и C могут быть выражены в обычных денежных единицах, например в долларах).

Если необходимо сравнить систему (комплекс) управляемого снаряда с другой конкурирующей системой оружия, достаточно определить и сравнить между собой величины E для обеих систем. Эта величина обычно называется *мерой эффективности*. На первый взгляд кажется невозможным оценить некоторые вещи, но фактом является то, что даже человеческая мораль и жизнь могут быть оценены в долларах. Лондонцы, которые обливались холодным потом при падении воюющих бомб во время второй мировой войны, подтвердят, что психологическое напряжение превращалось в фунты стерлингов недоданной продукции.

Так же как и множество других кажущихся простыми формул, уравнение эффективности оружия (3. 1) может легко привести к ошибкам. Факторы D и C представляют собой очень сложные понятия, и их определение связано с рядом допущений и предположений в отношении качеств рассматриваемой системы оружия.

В узком смысле слова мера эффективности E выражает качество данной системы оружия, поскольку *основная цель войны заключается в том, чтобы нанести максимальный ущерб противнику или предотвратить минимальной ценой нанесение нам ущерба*. Однако некоторые виды оружия имеют огромную ценность во время войны, даже если они используются лишь как средство достижения внезапности в решающий момент. Поэтому необходимо оценивать эффективность оружия в конкретных условиях его применения. При исследовании операций чаще сравниваются конкурирующие между собой системы оружия, чем определяется абсолютная стоимость одной системы.

При пользовании формулой (3. 1) прежде всего надо установить, какую задачу (или задачи) может выполнить рассматриваемая система оружия. (Очевидно, что число этих задач должно быть разумно ограничено для того, чтобы величины D и C были также ограничены.) Это, безусловно, ограничивающим образом влияет на определение величин общего причиняемого ущерба D и общей стоимости оружия C , и поэтому полученная в результате подсчета мера эффективности оружия E будет действительным критерием сравнения. Это также облегчает применение математических методов анализа, а потому первый его шаг часто называют построением *математической модели*.

Перечислим некоторые конкурирующие системы оружия, способные выполнять одинаковые задачи.

<i>Системы</i>	<i>Общие задачи</i>
Стратегический бомбардировщик или дальнобойный снаряд класса «земля — земля»	Уничтожение стратегических объектов противника в течение первых 2 месяцев войны
Истребитель-перехватчик или снаряд класса «земля — воздух»	Оборона стратегических объектов США от внезапного воздушного нападения бомбардировщиков противника
Реактивный снаряд «Базука» или противотанковый управляемый снаряд класса «земля — земля»	Защита находящихся в траншеях подразделений пехотного полка от атаки 25 танков противника

Требуется определить общий причиняемый (или предотвращаемый) ущерб D и общую стоимость оружия C для выбранных задач. Подробно рассказывать о том, как проводится подобный расчет, мы пока не будем. Однако общая методика расчетов такова:

А. Определение D

1. Оценить с помощью методов исследования операций вероятность попадания при одном выстреле или вероятность поражения цели.
2. Произвести расчет сил и средств, необходимых для выполнения задачи, учитывая ограниченность национальных ресурсов.
3. С учетом пунктов 1 и 2 оценить путем применения методов исследования операций общий причиняемый ущерб.

Примечание. Для средств обороны D означает предотвращенный ущерб. В этом случае по тем же правилам определяется ущерб, который мог бы нанести противник, если бы в обороне не участвовал данный комплекс управляемого снаряда.

Б. Определение C

1. Произвести расчет сил и средств, необходимых для выполнения конкретной задачи (так же, как в пунктах 1 и 2 при определении D).
2. Подсчитать прямые расходы на выполнение задачи, включая ущерб, нанесенный противником, потери в личном составе и соответственно расходы на производство снарядов и на содержание тыловых обслуживающих подразделений.

Никакие формулы, положения или правила не приведут к правильным результатам при исследовании операций, если у исследователя отсутствует здравый смысл. Конечно, существуют и другие, возможно лучшие, способы оценки систем оружия. Однако большинство проблем может быть разрешено путем определения эффективности оружия, для чего необходимо установить единую, общепринятую методику.

3.3. Последовательность изучения комплекса управляемого снаряда

Важнейшей мерой эффективности комплекса управляемого снаряда может служить ущерб, который он способен причинить противнику. Изучение действия проектируемого комплекса в ожидаемой тактической обстановке должно производиться в следующей последовательности:

- а) цель,
- б) траектория,
- в) стартовая позиция.

3.4. Определение степени поражения цели

При оценке общего ущерба, причиняемого данным числом снарядов, необходимо определить «вероятность поражения», т. е. вероятность эффективного разрушения данной цели при попадании в нее одного снаряда. (Более детально это понятие будет рассмотрено в разделе «Боевые части».)

С точки зрения исследования операций важно знать, когда произошло уничтожение цели, например самолета: до или после того, как он выполнил свою задачу.

Применительно к воздушным целям различают две категории «поражения»:

А — полное поражение (полный срыв атаки), когда эффективность вражеской атаки составляет менее 1% в сравнении с эффективностью успешной атаки при отсутствии сопротивления с нашей стороны;

Б — частичное поражение (частичный срыв атаки), когда вражеская атака расстраивается, ее эффективность снижается, но не так сильно, как при полном поражении.

Полное поражение, конечно, является желательным, поскольку оно приводит вражеские планы к крушению. Это особенно важно в тех случаях, когда в намерения противника входит применение атомного оружия, обладающего колоссальным разрушающим действием. В дальнейшем при отсутствии оговорок под словом «поражение» будет подразумеваться полное поражение.

Подобные различия в степени поражения обычно не применяются к наземным целям. Небольшие цели, такие, как танки, живая сила, огневые позиции, полностью уничтожаются или разрушаются при попадании управляемого снаряда. Поражение площадных целей, таких, как склады боеприпасов, аэродромы, промышленные районы или города, оценивается размерами разрушений, выражаемыми обычно в процентах.

Если цель будет обязательно поражена, говорят, что вероятность поражения равна 1,0; меньшие вероятности выражаются десятичными дробями. Следует помнить, что для одного выстрела *вероятность промаха всегда равна единице минус вероятность поражения*. При определении результатов последующих выстрелов удобнее искать вероятность промаха, так как при этом упрощаются математические выкладки и легче вести рассуждение.

Проблема «А»: Определение необходимости разработки нового образца

На основе данных стратегических и оперативно-тактических взглядов, а также технических возможностей определить, существует ли необходимость разработки нового образца.

Широта этой проблемы обычно определяется стимулирующими факторами, например обнаружением нового и более мощного оружия в руках потенциального противника, выявлением серьезных недостатков нашего существующего вооружения или **переворотом в технике, который создает возможности для развития новых видов оружия**. Эти обстоятельства позволяют сузить сферу анализа до приемлемых размеров. Принципы решения проблемы «А» в каждом конкретном случае излагаются ниже.

3.5. Новое оружие противника

Сведения о появлении нового и более мощного оружия в руках потенциального противника обычно поступают из разведывательных органов. Многие помнят, какой интерес проявлялся в США к гитлеровскому «Фау-оружию». До тех пор пока ракеты Фау-2 не упали в Швеции и не попали в руки союзников, в нашем распоряжении имелась весьма скудная информация о характере этого оружия. Но по обломкам ракет удалось составить представление об их устройстве и характеристиках и разработать программу исследования способов противодействия. Результаты анализа оказались очень ценными, хотя и обнаружилось, что единственным эффективным способом борьбы с Фау-2 было уничтожение их стартовых площадок.

Оценка характеристик оружия противника. Первым шагом в этом направлении является сбор всей разведывательной информации об оружии противника. Допустим, что потенциальный противник создал управляемый снаряд класса «земля — воздух» и мы можем ориентировочно установить его характеристики. Следующим шагом явится оценка эффективности оружия.

Рис. 3.1 показывает эффективность действия нового оружия противника при отражении атаки наших бомбардировщиков

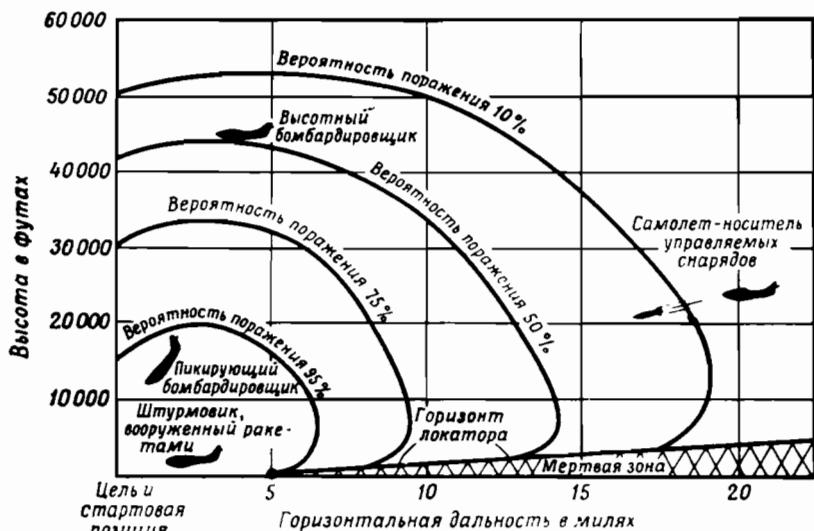


Рис. 3.1. Эффективность действия зенитных управляемых снарядов при отражении атаки бомбардировщиков.

обычного типа. (Как было оговорено выше, указанные на рисунке количественные данные не имеют ничего общего с реальными характеристиками.) Предполагается, что противник имеет соответствующую систему дальнего обнаружения и опознавания целей, которая позволяет вести стрельбу управляемыми снарядами на оптимальные дальности. Для простоты предполагается, что обороняемый объект и стартовая позиция находятся в одной точке, хотя очевидно, что важные объекты могут быть окружены поясом стартовых позиций, что создаст дополнительные трудности для атакующих самолетов.

Из рис. 3.1 видно, что вероятности поражения перед началом бомбометания составляют: для высотного бомбардировщика — 45%, для пикирующего бомбардировщика — 97% и для штурмовика, вооруженного неуправляемыми ракетами, — 99%. Во время последней войны вывод из строя 10% общего количества атакующих самолетов считался достаточным для срыва замыс-

лов противника. Если эта норма по-прежнему останется в силе, очевидно, что противник сможет воспрепятствовать действию любого из наших бомбардировщиков обычного типа, и воздушные операции стратегической авиации не будут иметь успеха.

Возможные решения. Что можно против этого сделать? Первый и наиболее предпочтительный способ — это добиться путем минимальных усилий увеличения эффективности действия нашей авиации. Можно производить налеты на небольшой высоте, ниже горизонта радиолокатора, а также создавать радиопомехи. Возможно, что большим группам бомбардировщиков удастся прорваться через оборону противника или, может быть, удачная организация радиопомех выведет из строя систему управления вражескими снарядами.

Если все это окажется бесполезным, решение вопроса следует искать в использовании управляемых снарядов. Можно применять наряду с настоящими ложные снаряды, чтобы затруднить действия обороны противника, или использовать управляемые снаряды класса «воздух — земля» для уничтожения станций наведения вражеских снарядов. Наконец, очевидным решением является расширение возможностей авиации путем вооружения бомбардировщиков управляемыми снарядами класса «воздух — земля». Из рис. 3.1 видно, что при использовании снаряда класса «воздух — земля» с дальности 20 миль вероятность поражения бомбардировщика составляет менее 10%.

Решение проблемы, которое было здесь кратко рассмотрено, заслуживает всестороннего изучения в реальных условиях. Последовательность проведения исследования должна быть такова:

- 1) выбор оптимальных тактических средств и (или) мер противодействия;
- 2) доказательство возможности их применения;
- 3) оценка каждого решения, при этом в качестве меры эффективности берется общий причиненный ущерб, отнесенный к расходу средств [разновидность уравнения (3.1)].

С помощью таких исследований может быть выбрано наилучшее решение и, если оно приемлемо, определена необходимость разработки данного образца.

3.6. Недостатки существующего вооружения

Часто в ходе боевых действий обнаруживаются серьезные недостатки в существующем вооружении. Иногда это случается и в мирное время: так, когда в 1939 г. впервые была проведена стрельба по самолетам-мишеням из корабельных зенитных пушек, результаты испытаний показали, что существовавшие тогда системы не могли обеспечить противовоздушной обороны кораблей. Поэтому была составлена программа развития зенитной

артиллерии, которая была в основном своевременно завершена к началу второй мировой войны.

Непригодность наших средств борьбы против подводных лодок стала совершенно очевидной в первые же месяцы войны. Для решения проблемы противолодочной обороны было мобилизовано большое число отечественных специалистов. Хотя главную роль здесь сыграли новые виды оружия, следует отметить, что исследование операций открыло новые пути использования существующего оружия и, таким образом, способствовало поражению Германии в подводной войне.

ПЕРВЫЙ ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ «А»

Рассмотрим случай обороны важного наземного объекта от нападения высотных скоростных атомных бомбардировщиков противника. Известно, что существующие зенитные пушки принципиально непригодны для этой цели из-за большого времени полета снарядов и способности самолета совершать за это время маневр. Следует ли использовать в этих условиях управляемые снаряды класса «земля — воздух»?

Эта проблема отличается от предыдущей тем, что непригодность нашего оружия объясняется не отсутствием прогресса у нас, а скорее прогрессом у потенциального противника. Поэтому необходимо сначала представить себе характер тех целей, которые появятся к моменту, когда в нашем распоряжении будут находиться новые образцы снарядов. Иногда мы неправильно рассчитывали время, потребное для создания снаряда, и он устаревал еще в процессе разработки, ибо становился непригодным для борьбы против целей, успевших сильно улучшить свои тактико-технические данные. Чтобы этого не случилось, снаряды должны разрабатываться для борьбы не с современными, а с возможными в будущем целями. Если разведывательной информации о военной технике противника недостаточно, лучшим правилом будет считать, что противник работает в том же направлении, что и мы, и имеет такие же успехи. Таким образом, мы будем рассматривать в качестве возможных целей свои собственные самолеты.

Цель. Пусть целью является вражеский бомбардировщик, имеющий скорость полета 480 миль/час¹, боевой потолок 45 000 футов и способный на этой высоте к маневру с перегрузкой 3 g. (Снова подчеркиваем, что эти данные не имеют ничего общего с реальными характеристиками и выбраны такими лишь для удобства математических выкладок.) Чтобы поразить объект, бомбардировщик должен сбросить атомную бомбу

¹ Здесь 1 миля = 1,609 км. — Прим. ред.

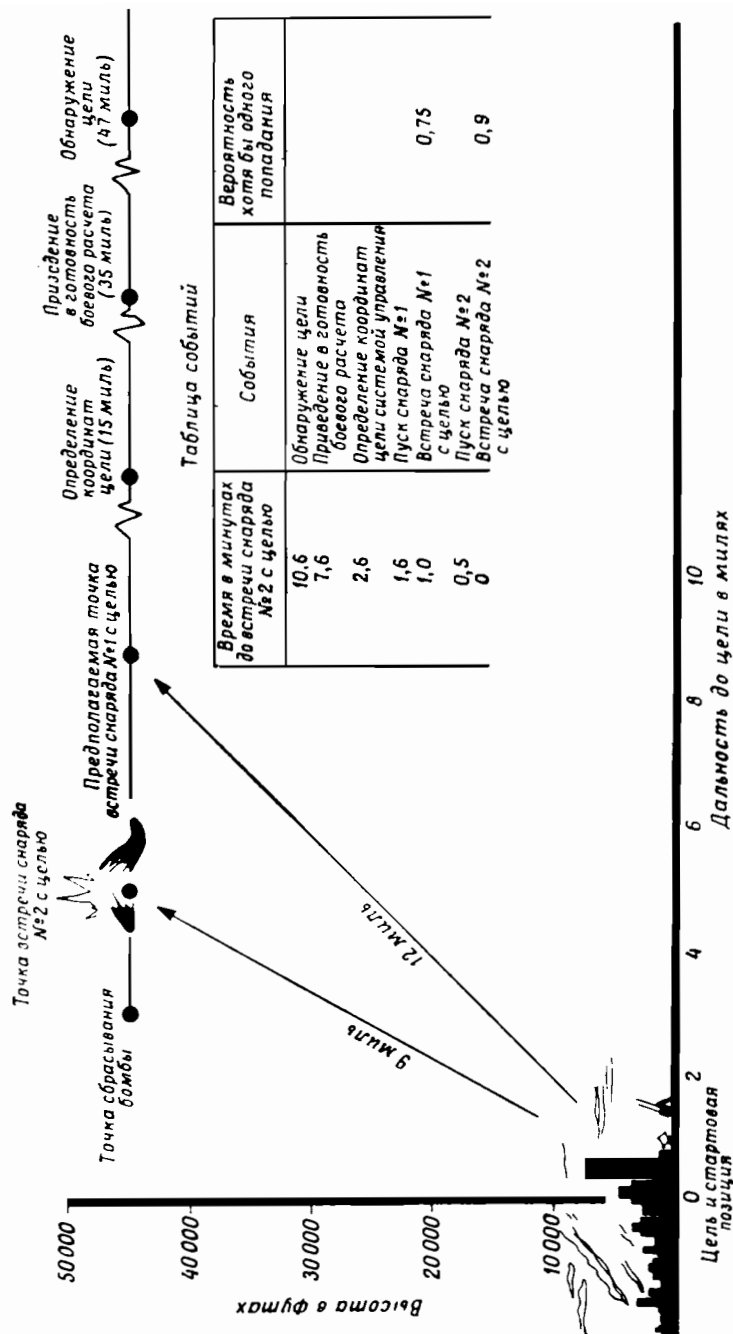


Рис. 3.2. Борьба зенитных управляемых снарядов с высотным бомбардировщиком.

в точке, показанной на рис. 3.2. Кроме перечисленных характеристик, необходимо еще знать степень уязвимости бомбардировщика и его возможности по созданию радиопомех. Наконец, следует иметь в виду, что важный объект может подвергнуться одновременному налету до 10 бомбардировщиков, летящих в строю или поодиночке с различных направлений.

Траектория полета снаряда. Как правило, в систему противовоздушной обороны входят истребители-перехватчики, управляемые снаряды, зенитные пушки или неуправляемые ракеты и радиолокаторы дальнего обнаружения и опознавания целей. Здесь не будут рассматриваться все элементы системы ПВО. Для простоты будем полагать, что неблагоприятные условия погоды или тактические соображения препятствуют действию перехватчиков на расстоянии 50 миль от обороняемого объекта, а зенитная артиллерия и неуправляемые ракеты лишают противника возможности произвести внезапную атаку на малой высоте. Наша задача заключается в том, чтобы преградить путь группе до 10 бомбардировщиков, летящих строем или поодиночке на высоте около 45 000 футов (траектория полета цели и снаряда показана на рис. 3.2).

Первый шаг состоит в определении главных тактико-технических требований к комплексу управляемого снаряда. Эти требования могут быть сформулированы следующим образом:

а) при использовании управляемых снарядов полная вероятность хотя бы одного попадания в каждый бомбардировщик до сбрасывания им бомб должна быть не менее 0,9 (это требование отражает всю важность уничтожения с большой степенью надежности атомных бомбардировщиков);

б) с вероятностью 0,9 должна поражаться группа до 10 самолетов, летящих строем или поодиночке, при любом состоянии погоды;

в) комплекс управляемого снаряда должен быть приспособлен для совместного действия с системой дальнего обнаружения.

Вторым шагом явится подбор управляемого снаряда, отвечающего перечисленным требованиям и технически осуществимого.

Рассмотрение комплекса управляемого снаряда

Случай стрельбы по одиночной цели. Попробуем использовать для выполнения задачи немецкий зенитный управляемый снаряд «Вассерфаль», имеющий среднюю скорость полета 1200 миль/час. Он снабжен командной системой телеуправления, включающей две наземные радиолокационные станции «Рейнланд», одна из которых следит за полетом снаряда, а другая — за полетом цели. На борту снаряда находится портативное приемное устройство. Система управления может наводить одновре-

менно только один снаряд. Примем для дальнейшего анализа, что вероятность попадания при одном выстреле равна 0,75.

Применение управляемых снарядов не должно создавать опасности для своих войск. Например, должны быть приняты меры к тому, чтобы отделяющиеся стартовые ускорители падали в безлюдных районах, а снаряды, не попавшие в цель, уничтожались в воздухе.

Для того чтобы довести вероятность хотя бы одного попадания до 0,9, необходимо выпустить по каждой цели два снаряда. (Вероятность промаха при двух выстрелах равна $0,25^2$, или 0,062, поэтому вероятность хотя бы одного попадания равна $1 - 0,062$, или приблизительно 0,9.) Если в целях экономии выделено по одной станции управления на каждую цель, то стрельбу двумя снарядами одновременно вести нельзя из-за ограниченных возможностей системы управления. Предположим, что основные этапы стрельбы имеют следующую продолжительность:

- а) обнаружение, опознавание цели и приведение в готовность боевого расчета — 3 мин.;
- б) приведение в готовность снарядного комплекса и определение координат цели — 5 мин.;
- в) вычисление исходных данных и пуск первого снаряда — 1 мин.;
- г) оценка результатов первого выстрела и пуск следующего снаряда — $1/2$ мин.

При этих условиях можно рассчитать положения цели, соответствующие определенным моментам ведения стрельбы. Отсчет времени ведется от момента встречи второго снаряда с целью. Точка разрыва второго снаряда находится на расстоянии 2 миль от точки сбрасывания бомбы (см. рис. 3. 2). Временем, необходимым для разгона снаряда до расчетной скорости полета, для простоты пренебрегаем.

Можно заметить, что наклонная дальность стрельбы для первого снаряда составляет около 12 миль. Поэтому дальность стрельбы в 15 миль является вполне достаточной для рассматриваемого типа снаряда. Из таблицы, приведенной на рис. 3. 2, видно, что в течение 10 мин. с момента обнаружения цели можно произвести запуск двух снарядов и тем самым довести вероятность хотя бы одного попадания до 0,9. Система дальнего обнаружения засекает и опознает цель на дальности 47 миль, и через 3 мин. поднимается по тревоге боевой расчет. Итак, можно заключить, что для случая стрельбы по одиночной цели рассматриваемый снарядный комплекс отвечает предъявляемым требованиям и вполне приемлем с точки зрения боевого применения.

Техническая осуществимость. Можно ли создать такой комплекс? Для ответа на этот вопрос требуется знать современное состояние ракет и приборостроения и на этой основе произвести

анализ возможностей изготовления снарядного комплекса. Этот вид анализа описан в четвертой книге настоящей серии, в разделе «Производство снарядов». Исследователь должен ответить на следующие вопросы:

а) Какие основные требования предъявляются к снаряду и наземному оборудованию для запуска и управления?

б) Каковы основные характеристики этих элементов снарядного комплекса?

в) Существует ли требуемая система обнаружения и оповещения?

г) Может ли такая система быть разработана при современном состоянии техники? Сколько потребуется для этого времени и средств?

д) Соответствует ли предполагаемый комплекс управляемого снаряда уровню технической подготовки войск?

Случай стрельбы по групповой цели. Пусть выбранный комплекс управляемого снаряда пригоден для борьбы с одиночными самолетами. А что произойдет при одновременном налете 10 вражеских бомбардировщиков? Эта проблема заслуживает всестороннего анализа с помощью методов исследования операций. Здесь будут рассмотрены только основные моменты исследования, цель которого состоит в нахождении реальных способов отражения атаки 10 самолетов противника. В результате анализа может выявиться необходимость изменения характеристик комплекса управляемых снарядов.

Можно сразу сказать, что одновременное использование 10 бомбардировщиков ставит противника в невыгодные в тактическом отношении условия. Если самолеты летят строем, то они представляют большую цель для радиолокаторов, что уменьшает возможность достижения внезапности. Группы самолетов обычно несут потери от истребителей-перехватчиков еще до входа в зону огня управляемых снарядов. Налет 10 бомбардировщиков на крупный населенный пункт обычно осуществить очень трудно. Вокруг такого пункта, как правило, создается несколько поясов постов обнаружения, которые своевременно оповещают систему ПВО о приближении целей, а также вызывают истребителей.

Метод отражения одновременной атаки 10 бомбардировщиков с различных направлений с помощью управляемых снарядов состоит в использовании 10 отдельных пусковых установок, расположенных вокруг обороняемого объекта. Если исследование покажет, что такая система из 10 установок осуществима технически и целесообразна с точки зрения боевого использования, то останется изучить возможность обеспечения ее бесперебойного действия. Исследователь должен ответить на следующие вопросы:

а) В каком количестве и какой квалификации потребуется обслуживающий персонал?

б) Какая система оружия подлежит замене рассматриваемым комплексом управляемого снаряда и насколько будет удовлетворена потребность в людях за счет ликвидации устаревшей системы? Являются ли очевидными преимущества новой системы (комплекса) перед старой?

в) Каковы капитальные затраты на создание системы из 10 пусковых установок, включая создание запаса снарядов по нормам военного времени?

г) Какова стоимость тренировок расчетов в мирное и военное время?

д) В какой мере все эти затраты компенсируются прекращением расходов на эксплуатацию замененной системы оружия?

е) Позволяют ли ресурсы страны произвести необходимые расходы и удовлетворить потребности в личном составе?

Ответив на эти вопросы, можно заключить, что комплекс, включающий 10 пусковых установок, должен быть расположен на близком расстоянии вокруг обороняемого объекта, занимающего небольшую площадь.

Если противник предпримет массированный или эшелонированный (т. е. несколькими волнами) налет на объект, в отражении воздушного нападения сможет участвовать, вероятно, более половины пусковых установок. Остается исследовать эффективность действия комплекса управляемого снаряда в этих условиях. Приведем только перечень вопросов, на которые необходимо получать ответы в результате исследования:

а) Сколько пусковых установок сможет вести огонь?

б) Можно ли преодолеть технические трудности, связанные со стрельбой по групповой цели (например, сложность выделения отдельной цели из группы самолетов, трудность выбора точки прицеливания, влияние интерференции радиоволн и т. п.)?

в) Какова конечная вероятность поражения группы самолетов и является ли полученная величина приемлемой?

Предположим, что при массированных налетах самолетов противника данный комплекс управляемого снаряда не обеспечивает достаточной эффективности стрельбы. Выходом из положения может быть применение в снарядах атомных боевых частей. Исследование действия таких снарядов выходит за рамки настоящего раздела, однако можно указать методику такого исследования:

а) строится схема зоны полного или действительного поражения при разрыве атомной боевой части;

б) зона поражения совмещается с областью, занимаемой группой самолетов, с учетом ошибок системы управления. В результате определяется полная вероятность поражения цели;

в) оценивается возможность создания такой системы оружия с различных точек зрения: технической, эксплуатационной и боевого применения.

Пересмотр предположений. Проведя детальное исследование рассматриваемой проблемы, можно определить необходимость разработки данного комплекса управляемого снаряда. Хотя человеку, только что закончившему тщательное исследование проблемы, и трудно критически оценить свои результаты, это непременно нужно сделать. Основной принцип исследования операций состоит в том, что результаты определяются исходными предположениями. Очень часто слабость первоначальных предположений выявляется в ходе анализа. Особенно полезно выяснить в конце исследования, что произойдет в случае непредусмотренных действий со стороны противника.

Например, следует пересмотреть и изменить параметры комплекса управляемого снаряда так, чтобы он мог быть использован также и в следующих случаях:

- а) при атаке противником на малой высоте;
- б) при использовании противником бомбардировщиков, вооруженных управляемыми снарядами класса «воздух — земля»;
- в) при использовании противником контрмер (применение снарядов в качестве ложных целей и для поражения наших станций управления, сбрасывание металлической фольги для «ослепления» радиолокаторов).

Ограниченность исследования. Получить точные ответы на все поставленные вопросы невозможно. Следует помнить, что исследование операций — это только способ получения обоснованных суждений, необходимых исполнительным органам для принятия решения о необходимости разработки данного образца оружия и ассигновании средств на разработку нового комплекса управляемого снаряда.

Имея это в виду, можно заключить, что результатом проведенного исследования является рекомендация разработки определенного комплекса снаряда, соответствующего принятым тактическим предположениям. Его характеристики не обязательно должны стать техническими характеристиками готового изделия. Может случиться, что потребуется увеличить скорость снаряда или заменить командную систему телеуправления системой самонаведения. Для того чтобы определить технические характеристики, необходимо провести дополнительное исследование, связанное с анализом возможностей производства снарядов.

3.7. Переворот в области производства управляемых снарядов

Последняя из рассматриваемых причин, которые часто приводят к появлению новых видов оружия, связана с переворотом

в технике. Таким переворотом в военной технике было появление атомной бомбы. До этого существовали сомнения в том, окупятся ли расходы на изготовление дальнобойного управляемого снаряда класса «земля — земля», снабженного боевой частью с обычным взрывчатым веществом. Появление боевых частей с ядерным зарядом, имеющим тротиловый эквивалент свыше 20 000 т, уничтожило всякие сомнения на этот счет. Новой проблемой стало обеспечение высокой точности стрельбы, необходимой для доставки столь дорогостоящего заряда.

ВТОРОЙ ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ «А»

Для того чтобы продемонстрировать использование методов исследования операций для решения проблемы такого типа, сформулируем следующую задачу:

Имея атомные бомбардировщики, базирующиеся на авианосцах и предназначенные для поражения целей в интересах флота, определить целесообразность их замены управляемыми снарядами с атомными боевыми частями.

Предварительная оценка. В случае когда управляемые снаряды предназначены для дополнения или замены уже существующей системы оружия, полезно вначале перечислить их очевидные преимущества и недостатки для того, чтобы наметить направление дальнейшего исследования. Управляемый снаряд имеет следующие преимущества перед бомбардировщиком авианосной авиации:

а) потеря снаряда не связана с потерей высококвалифицированного летного состава;

б) беспилотный управляемый снаряд должен совершить полет только в одном направлении и поэтому имеет большую дальность, чем самолет, при одинаковом стартовом весе¹;

в) в отличие от пилотируемого самолета управляемому снаряду не нужно совершать маневр для того, чтобы выйти из зоны поражения произведенного им атомного взрыва;

г) управляемый снаряд обладает лучшими летными характеристиками, так как на нем отсутствуют посадочные приспособления, кабина, а также кислородные аппараты, парашюты и другое оборудование, необходимое экипажу в полете.

Недостатки управляемых снарядов:

а) они обходятся дороже самолетов из-за невозможности многократного использования;

¹ Это справедливо только для снарядов, выполненных по схеме «самолет — снаряд». — *Прим. ред.*

б) у них нет той надежности действия и тактической гибкости, которые присущи пилотируемым самолетам.

Цели. Исследуем тактическую сторону рассматриваемой проблемы. Поскольку пусковые установки расположены на кораблях, очевидно, наиболее целесообразно приблизить их к целям настолько близко, насколько позволяет обстановка. Если мы господствуем на море и в воздухе, наши корабли смогут проникнуть почти всюду, где имеется достаточная глубина моря. Первой задачей является изучение целей на территории противника

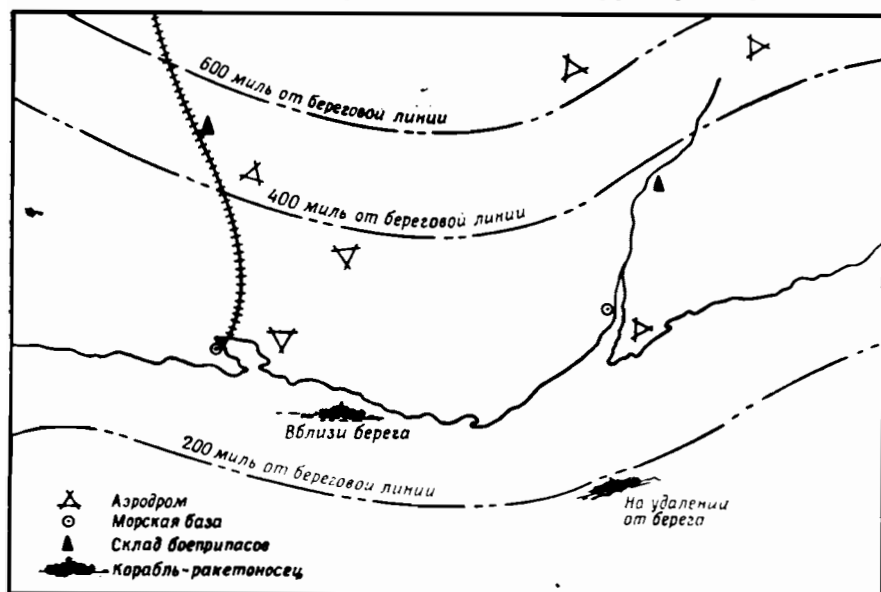


Рис. 3.3. Схема расположения целей и кораблей-ракетоносцев.

с точки зрения их удаления от района подхода кораблей, так как управляемые снаряды должны иметь дальность полета, достаточную для поражения по крайней мере большинства этих целей. Кроме того, желательно иметь некоторый запас дальности на тот случай, если корабли не смогут приблизиться вплотную к сильно укрепленной береговой линии. На рис. 3.3 изображена условная схема размещения целей и показано примерное расположение кораблей с пусковыми установками. Поскольку 90% целей расположено на расстоянии не более 600 миль от береговой линии, можно выбрать эту величину в качестве максимальной дальности стрельбы. Если корабли должны находиться на расстоянии 200 миль от береговых укреплений, то в этом случае они смогут поразить только цели, максимальная дальность которых от береговой линии составляет 400 миль, или 60% всех целей, изображенных на рис. 3.3.

Траектория полета снаряда. Какую систему противовоздушной обороны противника надо преодолеть, чтобы поразить цель? Эффективность вражеской обороны зависит от многих факторов, но наиболее важными из них являются следующие:

а) расположение и эффективность действия перехватчиков, управляемых снарядов класса «земля—воздух», зенитной артиллерии и неуправляемых ракет;

б) скорость, высота полета и отражающая способность (с точки зрения радиолокации) наших управляемых снарядов;

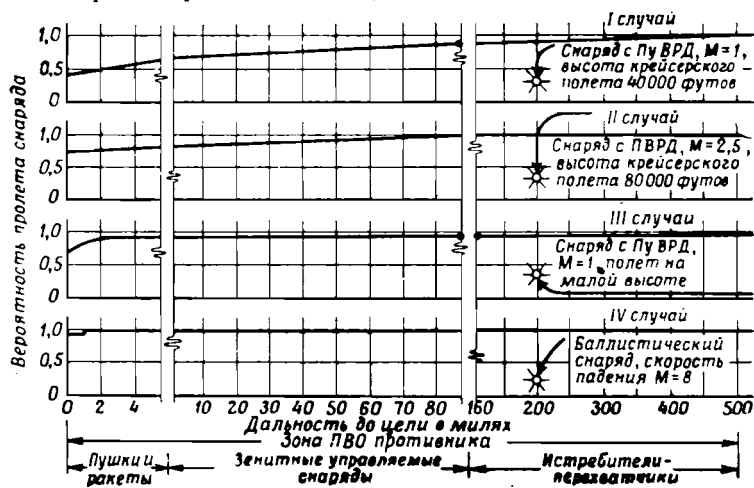


Рис. 3.4. Вероятность пролета управляемых снарядов через зону ПВО противника.

в) расположение и эффективность действия вражеских систем дальнего обнаружения и управления.

Зная все эти факторы, можно построить для рассматриваемого случая ряд графиков вероятности пролета через зону ПВО противника снарядов, имеющих различные скорости и траектории полета. Такие графики изображены на рис. 3.4.

Анализируя эти графики, можно ответить на вопрос: «Каковы должны быть основные характеристики и траектория снаряда для выполнения поставленной задачи?» В конечном счете управляемый снаряд должен прорваться через систему ПВО противника и произвести воздушный атомный взрыв над целью. Поэтому важным фактором для оценки эффективности применения снаряда может служить вероятность пролета снаряда через зону ПВО. Эта величина и использована в качестве ординаты на рис. 3.4. За абсциссу же выбрано расстояние от цели, поскольку глубина зоны ПВО обычно измеряется от обороняемого объекта.

Методика расчета вероятности пролета управляемого снаряда через зону действия системы ПВО противника в общих чертах такова. Прежде всего необходимо взять, если это возможно, статистические данные за прошлую войну о вероятностях поражения воздушных целей истребителями, зенитными пушками и реактивными снарядами. Эти данные необходимо скорректировать, учитывая появление новой техники у противника и отличие наших управляемых снарядов от воздушных целей второй мировой войны. Что же касается определения характеристик управляемых снарядов класса «земля — воздух», то оно целиком основывается на сведениях, добытых разведкой. Зная вероятности поражения для каждого вида оружия, необходимо уточнить численность и расположение оборонительных средств противника, способных сбить наш управляемый снаряд, а также оценить эффективность действия вражеской системы дальнего обнаружения, опознавания целей и управления огнем. Эта оценка должна производиться для будущей системы ПВО, так как для создания наших управляемых снарядов потребуется, скажем, 3 года. Далее, нужно оценить, какое количество вооружения может реально использовать противник для поражения каждого нашего управляемого снаряда, и вычислить суммарную вероятность пролета снаряда через вражескую систему ПВО в функции дальности от цели. Для пояснения изложенного рассмотрим рис. 3.4. В I случае используется управляемый снаряд типа немецкого Фау-1 с пульсирующим воздушно-реактивным двигателем (ПуВРД), имеющий дальность полета 600 миль и скорость $M = 1,0$. Крейсерский полет происходит на высоте 40 000 футов; в конце полета снаряд пикирует на цель почти вертикально. В диапазоне дальностей от 500 до 100 миль снаряд может подвергаться атакам вражеских истребителей-перехватчиков, которые несколько превосходят его по летным характеристикам. Снаряд может быть легко обнаружен вражескими радиолокаторами из-за большой высоты и незначительной скорости полета. Эффективность действия истребителей объясняется неспособностью управляемого снаряда обнаружить противника и уклониться от встречи с ним (это технически возможно, но в данном случае не предусмотрено). Вероятность того, что снаряд сможет пролететь через зону действия вражеских истребителей, как следует из рис. 3.4, составляет 0,85.

На расстоянии 100 миль от обороняемого объекта в борьбу вступают вражеские управляемые снаряды класса «земля — воздух», которые уменьшают вероятность пролета до 0,7 на расстоянии 5 миль от объекта. В этот момент снаряд уже находится на конечном участке своей траектории, пикируя на цель в течение примерно 35 сек.; за это время зенитная артиллерия

и неуправляемые ракеты снижают вероятность пролета с 0,7 до 0,4.

Итак, для рассматриваемого в I случае снаряда вероятность промаха по нему равна 0,4, т. е. можно ожидать, что 4 из 10 таких снарядов долетят до цели (при условии, что увеличение числа используемых снарядов не изменит тактический фон задачи).

Пересмотр предположений. Теперь необходимо пересмотреть сделанные предположения. Если корабль крупный и может произвести запуск 10 снарядов подряд, то противнику будет трудно все их уничтожить; однако внезапность нападения будет утрачена и противник сможет определить место запуска. Проводя бомбардировку управляемыми снарядами в плохую погоду, можно снизить эффективность действия вражеских перехватчиков. Для обеспечения внезапности полезно было бы применить запуск снарядов с подводных лодок. Наконец, следует пересмотреть нереальное предположение о 100% надежности снарядов. Если практическая надежность управляемого снаряда составляет 90%, то вероятность пролета через зону ПВО для первого случая составит $0,4 \cdot 0,9 = 0,36$.

Во II случае рассматривается управляемый снаряд с прямоточным воздушно-реактивным двигателем (ПВРД), летящий со скоростью $M = 2,5$ на крейсерской высоте 80 000 футов. В остальном задача остается той же, что и в I случае. Снаряд неуязвим для истребителей ввиду его гораздо более высоких летных качеств. Вражеские управляемые снаряды класса «земля — воздух» снижают вероятность пролета снаряда до 0,85, а зенитная артиллерия и неуправляемые ракеты — до 0,75. Эффективность действия этих видов оружия уменьшилась по сравнению с первым случаем благодаря увеличению скорости полета снаряда. Снова пересмотрим исходные предположения. Поскольку производство снарядов с прямоточными воздушно-реактивными двигателями достаточно хорошо освоено, можно оценить их надежность величиной 0,8. Тогда вероятность пролета снаряда составит $0,75 \cdot 0,8 = 0,6$.

Для III случая снаряд тот же, что и для I случая, но полет происходит на малой высоте, а затем снаряд поднимается выше для того, чтобы взрыв атомного заряда произошел над целью. Такая тактика мешает противнику использовать радиолокаторы как для обнаружения снаряда, так и для наведения перехватчиков и управляемых снарядов.

Поэтому допустим, что в зоне действия вражеских истребителей и управляемых снарядов вероятность пролета снижается только до 0,9. Эффективная борьба с низколетящим снарядом при помощи зенитной артиллерии и неуправляемых ракет может вестись только с дальности не менее 3 миль, при этом не исклю-

чено, что вероятность пролета удастся довести до 0,7, а если принять, что надежность снаряда равна 90%, то она составит 0,63.

В IV случае рассматривается дальнобойный баллистический управляемый снаряд, являющийся дальнейшим усовершенствованием немецкого снаряда Фау-2; он имеет дальность полета 600 миль и скорость пикирования $M=8$. Благодаря чрезвычайно высокой скорости полета и траектории, проходящей за пределами земной атмосферы, такой снаряд является практически неуязвимым. Зенитная артиллерия и неуправляемые ракеты могут снизить вероятность пролета снаряда только до 0,95. Однако современное состояние техники позволяет оценить степень надежности снаряда лишь в 70%. Поэтому вероятность пролета снаряда составит $0,95 \cdot 0,7 = 0,67$.

Итак, вероятности пролета снарядов через зону ПВО противника (с учетом надежности снарядов) равны:

I случай	. . .	0,36
II случай	. . .	0,60
III случай	. . .	0,63
IV случай	. . .	0,67

Техническая осуществимость. Следующий шаг исследования состоит в установлении технических возможностей создания рассматриваемых образцов управляемых снарядов. В каждом конкретном случае это зависит, помимо всего прочего, от объема работ по переоборудованию авианосцев, с тем чтобы с них можно было бы производить как взлет самолетов, так и запуск управляемых снарядов. Основные методы решения таких задач чисто технического характера изложены в четвертой книге настоящей серии. Для рассматриваемого примера примем, что создание снарядов различных типов выполнимо в следующие сроки:

I и III случаи	. . .	3 года
II случай		6 лет
IV случай		10 лет

Сроки создания снарядов во II и IV случаях порождают сомнения в ценности полученных результатов, ибо предполагалось, что на разработку управляемого снаряда потребуется не более 3 лет. В результате пересмотра оборонительных возможностей противника за период в 6 или 10 лет величины вероятностей пролета снарядов для II и IV случаев могут уменьшиться.

Эффективность системы оружия. Нашей задачей является выяснение целесообразности перехода от атомных бомбардиров-

щиков, базирующихся на авианосцах, к управляемым снарядам с атомными боевыми частями. Для этого необходимо сравнить эффективности обеих систем оружия, т. е. сравнить их критерий E [см. уравнение (3.1)]. Напомним, что E представляет собой отношение суммарного причиненного ущерба D к полной стоимости затрат на проведение операции C .

Вычислим E для II случая стрельбы управляемыми снарядами по целям, изображенным на рис. 3. 3.

Вероятность пролета снаряда над вражеской системой ПВО равна для II случая 0,6. Каковы же размеры ущерба, причиняемого противнику снарядом, который долетит до цели? Детально этот вопрос рассматривается в разделе «Боевые части» настоящей книги. Степень поражения цели зависит от точности работы системы управления, эффективности действия боевого заряда и размеров цели. Предположим, что для полного разрушения каждой цели требуются 3 снаряда, тогда для 9 целей потребуется 27 снарядов. Выпустить же придется 45 снарядов, так как только 0,6 из них долетят до целей. Если предположить, что 5 снарядов придут в негодность еще до запуска, то нам потребуется всего 50 снарядов. Принимая во внимание разбросанность целей и исходя из желаемого темпа стрельбы, можно установить, что для размещения пусковых установок потребуется 2 авианосца. Теперь можно оценить величины D и C .

В рассматриваемом примере небольшое число целей позволяет рассчитать потребность в материальной части, необходимой для эффективного разрушения 9 целей. Определение стоимости этих целей D является сложной задачей. Для того чтобы не тратить времени на ее решение, примем, что D составляет 360 млн. долларов.

Полная стоимость затрат C (в долларах) на проведение операции может быть подсчитана следующим образом:

а) Прямые расходы:

1. 2 авианосца с сопровождающими их кораблями на 60 дней операции	2 750 000
2. 45 выпущенных снарядов	35 000 000
3. Потери в личном составе (5 человек *)	100 000

б) Стоимость разработки снарядов и расходы

на материально-техническое обеспечение (включая запасные снаряды)	30 000 000

Всего . . . 67 850 000

* Очевидно, в результате несчастных случаев. — *Прим. ред.*

В результате применения формулы эффективности оружия получаем (для II случая)

$$E = \frac{D}{C} = 5,2.$$

Следовательно, при использовании данного комплекса управляемого снаряда каждому истраченному доллару соответствует причиненный противнику ущерб в размере 5 долларов. Какова же эффективность комплекса управляемого снаряда в сравнении с атомными бомбардировщиками, базирующимися на авианосцы? Для ответа на этот вопрос нужно определить E для бомбардировщиков, выполняющих те же задачи, что и управляемые снаряды. Необходимо обратиться к статистическим данным по использованию авиации и произвести исследование, аналогичное только что проведенному для управляемых снарядов.

Поскольку все оценки в этом анализе являются условными, не имеет смысла определять эффективность использования бомбардировщиков и пытаться сравнивать их с управляемыми снарядами. В действительности может оказаться, что целесообразнее всего использовать и ту и другую систему оружия с одного и того же авианосца. Однако если следовать изложенным принципам исследования и тщательно вести анализ, то можно прийти к обоснованному заключению, которое поможет руководящему органу принять решение о необходимости создания нового комплекса управляемого снаряда.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТАКТИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ

4.1. Введение

Решение о необходимости разработки нового управляемого снаряда должно приниматься на основе анализа, проводимого по методам исследования операций в условиях четко определенной стратегической и оперативно-тактической обстановки. В действительности нет четкой границы между исследованием, проводящимся для установления необходимости разработки нового снаряда, и анализом для определения тактико-технических требований. Одно естественно вытекает из другого. Разница заключается только в конечной цели исследования. В первом случае анализ количественных данных служит основой для принятия решения о разработке нового оружия, а во втором случае основное внимание обращается на тактическую обстановку и технические возможности, с тем чтобы выработать реальные тактико-технические требования к создаваемой конструкции.

Проблема «Б»: Определение тактико-технических требований

На основе решения о разработке управляемого снаряда определить тактико-технические требования к наиболее эффективному комплексу управляемого снаряда.

В качестве примера снова рассмотрим случай обороны важного объекта с помощью управляемых снарядов. В § 3.6 было показано, что для защиты важного наземного объекта от нападения высотных скоростных атомных бомбардировщиков необходим управляемый снаряд класса «земля—воздух». Используем этот пример для рассматриваемой сейчас нами проблемы. Характеристики цели оставим прежними, но будем считать, что мы вправе выбрать любую оптимальную систему оружия.

Предположим, что обороняемый объект подвергается нападению со стороны 10 бомбардировщиков, летящих со скоростью 480 миль/час. Так же как и раньше (см. § 3.6), примем, что максимальная наклонная дальность полета снаряда равна 15 миль, снаряд снабжен командной системой телеуправления

и имеет вероятность попадания при одном выстреле, равную 0,75. Для получения вероятности хотя бы одного попадания, равной 0,9, необходимо последовательно выпустить два снаряда по каждому бомбардировщику.

4.2. Тактическая обстановка

Для решения поставленной задачи необходимо пересмотреть тактическую обстановку, установить оптимальные значения параметров комплекса управляемого снаряда и затем сформулировать тактико-технические требования к снаряду.

Цель. На высоте 45 000 футов цель обладает маневренностью, характеризующейся перегрузкой в 3 g. Следует предположить, что маневренность будет использована для борьбы с управляемым снарядом с целью увеличить ошибки в работе его системы управления и уклониться от встречи. Кроме того, от маневренных свойств цели зависят требования к соотношению между скоростями снаряда и цели, к скорости выполнения снарядом подаваемых с земли команд и к эффективности действия боевой части. Следует помнить, что воздушный противник, по всей вероятности, не будет заранее иметь точных сведений о дальности действия и скорости полета снарядов. Следовательно, вражеский бомбардировщик не сможет начать в нужный момент маневр для уклонения от встречи со снарядом.

Рассмотрим теперь, сможет ли бомбардировщик совершить отвлекающий маневр и, таким образом, сделать стрельбу управляемыми снарядами неэффективной. Успех такого маневра зависит от вероятности обнаружения каждой пусковой установки с самолета. Если принять меры к ослаблению дыма и пламени, сопровождающих запуск снарядов, то противнику труднее будет обнаружить стартовые позиции и ввести нас в заблуждение своим ложным маневром. Кроме того, пока противник совершает отвлекающий маневр, он, естественно, прекращает выполнение своей основной задачи и может стать объектом атаки истребителей-перехватчиков.

Бомбардировщики могут лететь группой до 10 самолетов. Любая система управления¹, «следающая» за группой из двух или более самолетов на значительном расстоянии, может «видеть» только одну расплывчатую цель. Но при уменьшении дальности до цели наступает такой момент, когда начинают различаться отдельные самолеты. Это свойство системы управления носит название *разрешающей способности*. До того как система управления сможет различать отдельные цели, снаряд наводится

¹ Под системой управления здесь понимается совокупность всех устройств, обеспечивающих встречу снаряда с целью. — *Прим. ред.*

на слитную отметку группы самолетов. При этом имеется определенная вероятность того, что снаряд пролетит между самолетами. Если выбрать систему управления с хорошей разрешающей способностью, то противник не сможет затруднить управление снарядами путем рассредоточения самолетов в строю.

Для нарушения работы системы управления снарядами противник может также создавать радиопомехи. Для того чтобы делать это успешно, противник должен установить характеристики наших систем управления, затем спроектировать, испытать и изготовить специальное оборудование для создания радиопомех и поместить его на своих самолетах, тем самым утяжеляя их и ухудшая летные качества. Поскольку все это требует времени и средств, мы сможем в течение некоторого периода работать спокойно, до того дня, пока противник не создаст эффективной системы радиопротиводействия. Однако мы можем отсрочить этот день путем использования относительно неуязвимой системы управления. При параллельной разработке других, более совершенных (или использующих другой принцип) систем управления мы сможем продолжать боевое применение снарядов даже тогда, когда контрмеры со стороны противника станут эффективными. Совершенно очевидна необходимость сохранения в строгой тайне всех сведений, которые противник может использовать для создания действенной системы радиопротиводействия.

Противник может также применять «ослепляющие» или отвлекающие приспособления, предназначенные для нарушения работы нашей системы управления снарядами. Подобные приспособления также утяжеляют вражеские бомбардировщики, но это не значит, что противник не прибегнет к ним, и наши системы управления должны быть готовы к работе и в этих условиях.

Для того чтобы спроектировать систему управления и вооружение управляемого снаряда, необходимо знать множество характеристик цели, особенно ее размеры, конфигурацию, тип конструкции и расположение наиболее уязвимых элементов. Это обычно делается посредством изучения самолетов предполагаемого противника, если сведения о них имеются. В противном случае приходится предполагать, что самолеты противника будут такими же, как у нас, и брать характеристики наших собственных самолетов.

Условия полета снарядов. Предположим, что существует система дальнего обнаружения и опознавания, которая может заблаговременно предупредить о приближении вражеского самолета и передать его координаты системе управления снарядами.

Примем радиус зоны действия управляемых снарядов равным 50 миль и будем считать, что за пределами этой зоны

находится зона действия перехватчиков. От правильности сделанных предположений в сильной степени зависят тактико-технические требования к снаряду.

Например, если истребители-перехватчики преследуют вражеские самолеты в зоне действия управляемых снарядов, система управления должна уметь отличить свои самолеты от чужих. С другой стороны, полезно, чтобы каждую цель преследовал один истребитель, как бы поддерживая огонь управляемых снарядов.

Поэтому взаимодействие управляемых снарядов со всеми остальными средствами противовоздушной обороны заслуживает самого пристального изучения.

Необходимо учитывать действительные условия, при которых происходит полет управляемых снарядов. Если стрельба должна производиться при любом состоянии погоды, то оптические системы управления исключаются. Для ведения боевых действий в условиях Арктики необходимо решить ряд проблем, связанных с низкими температурами, в частности проблему борьбы с обледенением. В гористой местности усложняется работа системы управления.

Если полет снарядов должен проходить над своей территорией, необходимо свести к минимуму ущерб, причиняемый населению. Например, стартовые ускорители, а в случае промаха и снаряды должны разрываться в воздухе на мелкие осколки или же падать в таких районах, где они не причинят никому вреда.

Стартовая позиция. Обстановка на стартовой позиции должна изучаться с момента доставки управляемого снаряда до момента его запуска. Отдельные детали снаряда требуют особенно осторожного обращения и хранения, например чувствительные приборы, опасные взрывчатые вещества или особо секретная аппаратура.

Каждая стартовая позиция должна обеспечивать требуемый темп стрельбы и иметь необходимый комплект снарядов. Это в свою очередь определяет потребности в обслуживающем персонале. Все операции, совершаемые со снарядом на стартовой позиции, должны быть согласованы с темпом стрельбы. Для их выполнения должно быть создано специальное испытательное, контрольное и подъемно-транспортное оборудование.

Ранее было установлено, что запуск первого снаряда может произойти через 9 мин. после обнаружения цели. Значительная часть этого времени уходит на то, чтобы боевой расчет занял свои места по тревоге. Следовательно, первый снаряд должен всегда находиться на пусковой установке и быть готовым к запуску, и по крайней мере еще один снаряд должен находиться поблизости в такой же степени готовности.

Стартовая позиция должна быть оборудована так, чтобы обслуживающий персонал находился поблизости от пусковых установок. Позиция должна быть замаскирована, насколько это возможно, и прикрыта от воздушного нападения. Особое внимание следует уделять обеспечению безопасности обслуживающего персонала.

Степень подвижности, требуемая от пусковой установки, зависит в первую очередь от свойств обороняемого объекта. Постоянный аэродром может обороняться стационарными пусковыми установками, но важный склад боеприпасов, расположенный вблизи линии фронта, должен охраняться подвижными пусковыми установками.

Угроза нападения с любого направления заставляет окружить обороняемый объект кольцом из 10 стартовых позиций. Очевидно, что в этом случае необходимо создать центральный командный пункт. Задачи этого пункта состоят в получении первичных данных о цели из штаба ПВО, в определении способа наилучшего использования нескольких пусковых установок и в распределении огневых задач между ними. Кроме того, с командного пункта оценивается степень поражения целей и сообщаются результаты стрельбы в штаб ПВО.

4.3. Определение оптимальных параметров комплекса управляемого снаряда

Ранее были рассмотрены (в общих чертах) тактическая обстановка и требования, которые она предъявляет к конструкции управляемого снаряда. Следующий этап состоит в определении оптимальных параметров комплекса управляемого снаряда, удовлетворяющих тактическим требованиям. Таким образом, должны быть выявлены технические возможности создания снаряда и заложены основы для выработки реальных тактико-технических требований.

В действительности подобными исследованиями должны заниматься производственные организации, и поэтому здесь эти вопросы не излагаются.

Основы решения таких проблем рассматриваются в разделе «Организация производства систем» четвертой книги. Результаты исследования, однако, могут быть представлены в виде перечня основных характеристик выбранного комплекса управляемого снаряда. В качестве примера рассмотрим основные характеристики улучшенного варианта немецкого зенитного управляемого снаряда «Вассерфаль»:

а) *система управления* — комбинированная. На основном участке полета используется командная система телеуправления, а при подходе к цели — инфракрасная система самонаведения;

б) *аэродинамическая схема* — 4 стреловидных крыла и 4 стабилизатора;

в) *боевая часть* — осколочного действия с неконтактным взрывателем;

г) *двигательная установка* — жидкостный реактивный двигатель с временем работы 45 сек. Скорость в конце работы двигателя $M = 2,5$;

д) *пусковая установка* — стартовый стол, позволяющий производить горизонтальную и вертикальную наводку.

4.4. Формулирование тактико-технических требований

Установив требования, предъявляемые тактической обстановкой, и рассмотрев оптимальные параметры снаряда, отвечающие этим требованиям, можно сформулировать тактико-технические требования к комплексу управляемых снарядов. Обычно они являются основой для заключения контракта на разработку конструкции снаряда и поэтому впоследствии служат критерием оценки работы подрядчика. Они не определяют, каков будет снаряд, который должен быть спроектирован; они лишь указывают, каковы должны быть его характеристики.

Для рассматриваемого примера тактико-технические требования могут быть следующими:

а) комплекс управляемого снаряда должен обеспечивать вероятность попадания 0,9 при стрельбе по каждому из 10 атомных бомбардировщиков данного образца, совершающих налет на объект небольшой площади;

б) комплекс управляемого снаряда должен оповещаться системой ПВО через 3 мин. после обнаружения цели на дальности 47 миль, после чего координаты цели (определяемые с точностью до ± 2 миль) сообщаются системам управления снарядами для опознавания цели;

в) вероятность хотя бы одного попадания, равная 0,9, должна быть достигнута по крайней мере за 2 мили до точки сбрасывания бомб;

г) эффективность действия управляемых снарядов не должна зависеть от:

- 1) маневра цели,
- 2) боевого порядка вражеских самолетов,
- 3) отвлекающих действий противника,
- 4) радиопомех,
- 5) использования противником ложных целей,
- 6) условий погоды,
- 7) условий местности;

д) управляемые снаряды не должны причинять вреда своим войскам и населению;

е) потребное количество и необходимая квалификация обслуживающего персонала не должны быть выше, чем в ствольной зенитной артиллерии, предназначенной для борьбы с аналогичными целями;

ж) комплекс управляемого снаряда должен обладать такой подвижностью, чтобы за 24 часа его можно было бы подготовить к перевозке на новую стартовую позицию;

з) стартовая позиция должна обеспечивать безопасность для личного состава при ведении огня и быть прикрытой от нападения с воздуха;

и) управление огнем управляемых снарядов должно быть организовано так, чтобы можно было своевременно оценивать степень поражения целей и без промедления сообщать результаты стрельбы в штаб ПВО.

Заключение. Рассмотрение проблемы началось с выявления необходимости в разработке комплекса управляемого снаряда класса «земля—воздух». После анализа тактической обстановки и установления оптимальных параметров снаряда были сформулированы тактико-технические требования.

Снова необходимо подчеркнуть, что исследование проводилось лишь с учебной целью. В действительности же при решении конкретных задач оно может быть значительно шире, или наоборот.

Проблема «В»: Сравнительная оценка конкурирующих между собой систем оружия

Сравнивая характеристики и состояние разработки данного комплекса управляемого снаряда и конкурирующей системы оружия, определить необходимость изменения темпов работы по созданию снаряда.

Обычно проектированию любого комплекса управляемого снаряда предшествует анализ на основе методов исследования операций, который выявляет в какой-то степени преимущества данного комплекса перед конкурирующей системой оружия. Однако зачастую случается так, что эти преимущества подвергаются сомнению либо в результате серьезных затруднений в создании нового управляемого снаряда, либо, наоборот, при больших успехах в создании конкурирующей системы оружия, либо при изменении внутренней или международной обстановки. Для изготовления снарядов потребуются многие миллионы долларов. Поэтому, чтобы не принять опрометчивого решения, необходимо тщательно анализировать обстановку.

Решение проблемы «В» состоит в оценке эффективности комплекса управляемого снаряда при внимательном сравнении его качеств с конкурирующей системой оружия. В результате

должна быть получена количественная основа для выбора системы оружия.

Рассмотрим следующий воображаемый пример.

Цель

Бомбардировщик, боевой потолок 50 000 футов;
максимальная скорость $M = 0,7$;
максимальная перегрузка при маневре 2 g на высоте 50 000 футов и 4 g на высоте 5000 футов;
вооружение — четыре 20-мм пушки с круговым обстрелом и действительной дальностью стрельбы в 1 милю.

Самолет-носитель

Одноместный перехватчик, боевой потолок 60 000 футов;
максимальная скорость $M = 0,9$;
максимальная перегрузка при маневре 3 g на высоте 60 000 футов и 6 g на высоте 5000 футов;
вооружение — 2 управляемых снаряда.

Управляемый снаряд

Класс «воздух — воздух», характеристики:

а) *корпус* выполнен по схеме «утка» с крестообразным расположением крыльев, стартовый вес снаряда — 350 фунтов, управляемость и эффективность действия обеспечиваются в диапазоне скоростей от $M = 1,2$ до $M = 2,5$;

б) *система управления* — полуактивная система самонаведения;

в) *двигательная установка* — пороховой реактивный двигатель, разгоняющий снаряд до $M = 2,5$ в течение 2 сек., после чего полет снаряда происходит по инерции;

г) *боевая часть* — осколочного действия с неконтактным взрывателем.

Допустим, что этот снаряд прошел летные испытания, которые показали, что его характеристики соответствуют расчетным. Пусть конкурирующий снаряд класса «воздух — воздух» добился таких же успехов. С другой стороны, пусть уменьшение военных расходов требует, чтобы производство одного из этих снарядов было совсем прекращено или в дальнейшем шло не так быстро, как раньше.

4.5. Подход к решению проблемы

При подходе к решению проблемы должна быть выявлена эффективность комплекса управляемого снаряда, действующего в системе противовоздушной обороны. Легко установить, что система ПВО может обеспечить необходимые условия для успеш-

ного применения управляемых снарядов, такие, как дальнейшее обнаружение и опознавание цели, наведение перехватчика на цель, обеспечение от помех со стороны других видов оружия, оценка результатов стрельбы. Эти условия не имеют прямого отношения к разработке комплекса управляемого снаряда и затронуты здесь попутно. Однако очевидно, что невыполнение одного или нескольких из них может сделать управляемые снаряды бесполезными. Поэтому обязанностью тех, кто занимается разработкой средств ПВО, является обеспечение взаимодействия между всеми ее элементами, одним из которых является комплекс управляемого снаряда.

Примем для рассматриваемого примера, что комплекс управляемого снаряда должен уничтожить 40 из 50 бомбардировщиков, летящих в строю или поодиночке, причем цели должны быть поражены прежде, чем они приблизятся к обороняемому объекту на расстояние 50 миль. (Заметим, что именно так формулировалась задача истребителей при рассмотрении проблемы «Б» в § 4. 4 настоящей главы.) Характеристики цели, самолета-носителя и управляемого снаряда установлены в предыдущем параграфе.

Для того чтобы определить потребности в материальной части для выполнения задачи, необходимо подсчитать вероятности поражения для каждого истребителя при стрельбе по одиночной или групповой цели. Ради упрощения анализа расчет будет производиться только для двух высот (5000 и 50 000 футов) для одиночной и групповой цели.

4.6. Расчленение операции¹ на последовательные события

Для определения вероятности сложного события необходимо расчленить его на последовательные независимые простые события, определить вероятности каждого из них и вычислить полную вероятность как произведение вероятностей отдельных событий.

В рассматриваемом случае сложное событие заключается в поражении цели истребителем, вооруженным управляемыми снарядами. Вероятность этого события равна P_s . Сложное событие распадается на последовательные события:

- а) обнаружение цели истребителем;
- б) занятие истребителем исходного положения для пуска снаряда;
- в) поражение цели управляемым снарядом.

Если вероятности этих событий обозначить соответственно P_d , P_c , и P_k , то

$$P_s = P_d \cdot P_c \cdot P_k. \quad (4.1)$$

¹ См. примечание на стр. 19. — *Прим ред.*

Эта формула играет важную роль при исследовании операций. Аналогичные уравнения используются при проектировании комплекса управляемого снаряда и его составных частей. Строго говоря, формула (4.1) справедлива только при условии независимости последовательных событий. В данном случае можно считать, что это условие приближенно выполняется.

Легко видеть, что каждое отдельное событие в равной степени способствует наступлению желательного сложного события. При определении вероятностей отдельных событий часто выясняется главная причина неэффективности той или иной системы оружия. Роль жизненно важных элементов системы иногда игнорируется — или по недосмотру, или в результате незнания того, в какой мере они влияют на конечный результат.

Формула (4.1) опровергает ошибочное мнение о том, что при вероятностях каждого отдельного события, равных 90 %, полная вероятность также равна 90 %. Например, если P_a , P_c и P_k равны 0,9, то вероятность успешного действия всей системы P_s будет равна 0,73, а не 0,9. Таким образом, иллюстрируется важность повышения вероятностей отдельных составляющих событий.

Следует отметить, что формула (4.1) справедлива только при статистической оценке событий, т. е. она выражает вероятность успеха для часто повторяющихся действий. Вероятности отдельных действий изменяются в зависимости от обстоятельств и искусства обслуживающего персонала. Поэтому следует стремиться к определению P_s для реальной тактической обстановки.

4.7. Обнаружение цели

Определим вероятность P_d того, что истребитель обнаружит цель при установленных выше тактических условиях.

Во время обсуждения этого вопроса будут часто употребляться три термина: «цель», «истребитель», «локатор». Под термином «локатор» понимается наземная радиолокационная станция, предназначенная для обнаружения целей, установления их принадлежности к противнику и наведения перехватчиков, т. е. выведения одного или нескольких истребителей туда, откуда цели могут быть обнаружены с помощью самолетных радиолокаторов. Обнаружение обычно происходит на большом удалении от наземной радиолокационной станции.

Наведение истребителя на цель осуществляется наземным локатором, который измеряет дальности, азимуты и углы места цели и перехватчика. По этим данным вырабатываются команды, посылаемые по радио. Иногда локатор должен еще одновременно продолжать поиск новых целей и наводить на них другие истре-

бители. В этом случае период взаимодействия локатора с данным истребителем уменьшается.

Первым шагом анализа является выяснение того, насколько точно может локатор вывести перехватчик на цель. На рис 4.1 изображены ошибки наведения, получающиеся в различных условиях наведения на цель при помощи какого-то воображаемого наземного локатора. Предполагается, что цель, не подозревая о приближении перехватчика и стремясь быстрее выполнить свою задачу, не совершает никаких маневров. Взаимное положение локатора, цели и перехватчика оказывает влияние на конечный результат, но мы будем рассматривать здесь только наиболее вероятный случай, когда цель держит курс на локатор, а перехватчик может приближаться к цели с различных направлений. Кривые, нанесенные на рис. 4.1, позволяют определить ошибки наведения (в милях) перехватчика на цель наземным радиолокатором при различных курсовых углах перехватчика, различных дальностях между локатором и точкой перехвата (50, 100 и 150 миль) и при различных высотах полета цели (5000 и 50 000 футов). В действительности эти ошибки наведения будут найдены «с вероятностью 50%», т. е. 50% всех перехватов будет производиться с такими или меньшими ошибками. Ошибки могут быть вычислены и с большей вероятностью при использовании закона «нормального распределения», который для данного случая является справедливым (см. § 7.1 настоящей части).

Следует иметь в виду, что рассматриваемая задача является пространственной. Благодаря довольно большому расстоянию между локатором и целью по сравнению с высотой цели курс перехватчика не будет претерпевать заметных изменений до тех пор, пока перехватчик не обнаружит цель своим собственным радиолокатором. В этот момент пилот увидит, что ошибка наведения, которую едва обнаруживает наземный локатор, в действительности весьма большая и требует резкого изменения курса.

Из рис. 4.1 видно, что ошибка наведения возрастает с увеличением расстояния между локатором и точкой перехвата. Для перехватчика, преследующего цель, ошибка меньше, чем для летящего навстречу цели, так как в первом случае имеется больше времени для ввода поправок. Для истребителя, приближающегося к цели сбоку, ошибка наведения довольно большая, так как точность определения азимута локатором значительно ниже точности определения дальности. Как правило, точность определения дальности локатором относительно велика; в отличие от точности определения азимута и угла места она практически не зависит от величины дальности. При полете перехватчика на малой высоте (5000 футов) происходит увеличение

ошибки наведения. Это объясняется отражением сигналов от земли и влиянием аномалий в распространении радиоволн при малых углах места. Хотя приведенные расчеты относятся к одиночной цели, они могут быть использованы и в случае групповой цели, причем ошибка наведения будет измеряться от центра отражения группы самолетов.

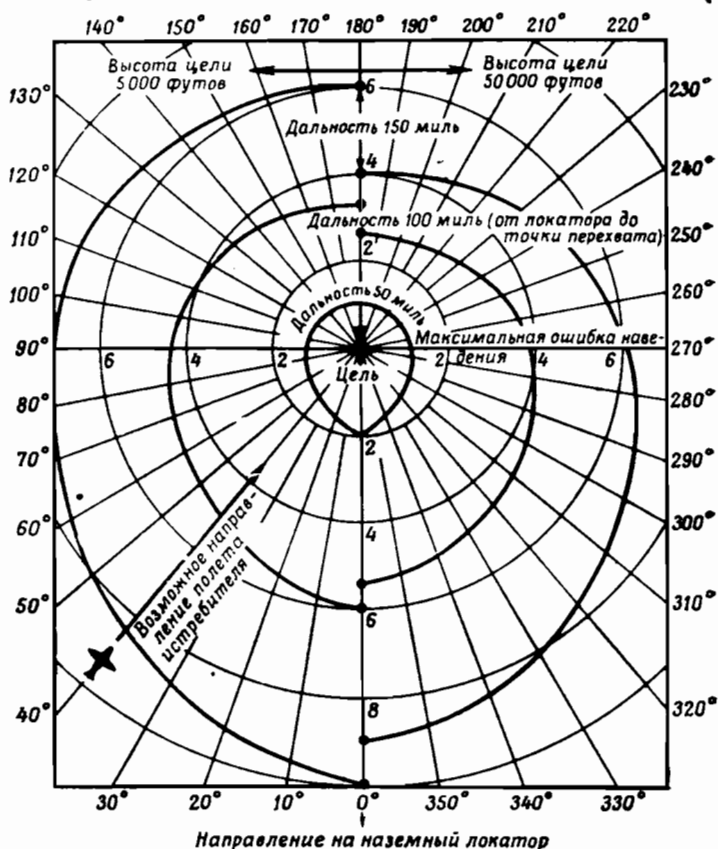


Рис. 4.1. Ошибки наведения перехватчика на цель с помощью наземного радиолокатора.

Таким образом, получена количественная оценка способности лоатора навести перехватчик на воздушную цель. Остается учесть поисковые возможности самолетного радиолокатора и вычислить вероятность обнаружения цели P_d .

Предположим, что самолетный радиолокатор имеет углы обзора 90° по азимуту и 60° по углу места, а ось лоатора ориентирована в предполагаемом направлении на цель. Рис. 4.2 ил-

люстрирует гипотетический случай поиска и обнаружения цели истребителем-перехватчиком (вид сверху). Цель летит на высоте 50 000 футов; курсы перехватчика и цели взаимно перпендикулярны; перехватчик наводится на цель с помощью наземного локатора. Из рис. 4.1 видно, что при расстоянии между локатором и точкой перехвата в 100 миль истребитель отклонится не более чем на 4 мили в сторону от цели (в 50% случаев). Используем эти данные для рассматриваемого случая. Представим

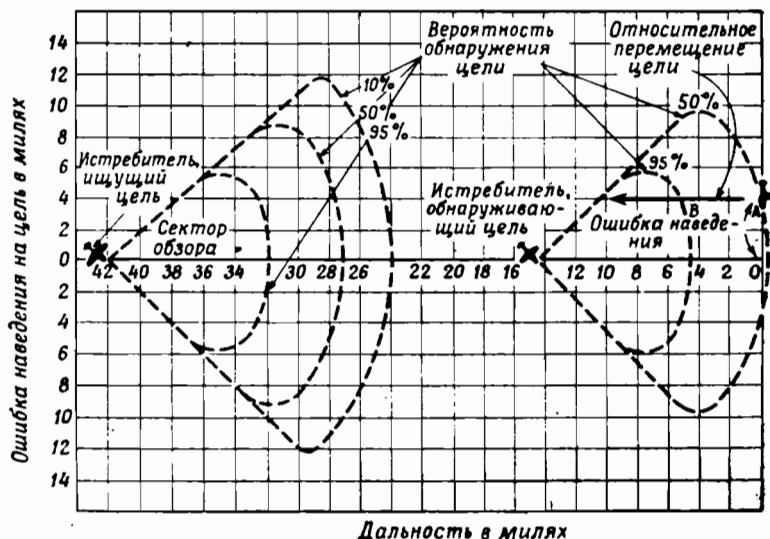


Рис. 4.2. Обнаружение цели самолетным радиолокатором.

себе мысленно истребитель, обзоревающий определенный сектор с помощью своего радиолокатора. Если в этот сектор попадет цель, то возникнет известная вероятность ее обнаружения, которая может быть определена посредством анализа движения цели через сектор обзора.

Для того чтобы просматривать большое пространство, самолетный радиолокатор (имеющий сравнительно небольшую ширину луча) должен работать по определенной программе. Он «осматривает» каждую точку в секторе обзора периодически, поэтому между моментом появления цели в секторе обзора локатора и моментом ее обнаружения может пройти некоторое время. Даже в том случае, когда самолетный локатор обнаружит цель, отраженный сигнал может оказаться настолько кратковременным, что ускользнет от внимания летчика. Успех обнаружения цели во многом зависит от способности оператора наземной радиолокационной станции определить наиболее выгодный

курс истребителя и от способности пилота выдержать заданное направление. Поэтому необходимо на основе статистических данных ограничить сектор обзора самолетного локатора до размеров, обеспечивающих наибольшую вероятность обнаружения целей данного типа.

Рассмотрим, что происходит, когда цель движется через сектор обзора самолетного локатора и ошибка наведения составляет 4 мили. Обратимся к рис. 4.2. Если цель находится в точке *A* (на расстоянии 15 миль от истребителя), она будет обнаружена с вероятностью 50%. Для цели же, находящейся в точке *B* (на расстоянии 10 миль), вероятность обнаружения составит 95%, т. е. обнаружение цели будет практически обеспечено. Такая вероятность обнаружения может быть достигнута даже при ошибке наведения в 5,8 мили. Из рисунка 4.1 видно, что вероятность получения ошибки менее 4 миль составляет 50%. Следовательно, вероятность получения ошибки в 5,8 миль будет больше чем 50%. Предположим, что в результате анализа данных испытаний получена вероятность равная 0,7. Таким образом максимальная вероятность обнаружения цели P_d равна $0,7 \times 0,95 = 0,67$ (при этом расстояние от перехватчика до цели составляет 9 миль). Следует оговориться, что, поскольку мы рассматривали полет цели и перехватчика только в горизонтальной плоскости (т. е. ошибка по высоте предполагалась равной нулю), необходимо объединить полученные данные с результатами решения аналогичной задачи в вертикальной плоскости (см. главу 6 настоящей части).

Такое разделение задач в горизонтальной и вертикальной плоскостях сделано лишь для удобства рассмотрения вопроса. На практике ошибки наведения измеряются от желательного курса перехватчика, что упрощает вычисление P_d .

Итак, мы установили максимальную величину вероятности обнаружения цели P_d . Остается показать, что при соответствующем взаимном положении истребителя и цели, а особенно при достаточной дальности и скорости сближения, возможно эффективное использование управляемых снарядов с указанными выше характеристиками.

Всякий раз, когда вероятность получена на основе теоретических расчетов, а не в результате испытаний, следует сделать поправку на возможные неисправности оборудования, недостаточную обученность обслуживающего персонала и другие неблагоприятные факторы, возникающие в боевой обстановке.

Степень уменьшения вероятности обнаружения определяется накопленным опытом и правильностью оценки всех действующих факторов. Так, для рассматриваемого примера мы можем принять, что вероятность обнаружения будет равна не 0,67, а всего 0,6. Аналогичным образом можно проанализировать любой слу-

чай поиска цели перехватчиком. Объем расчетов зависит от тактической обстановки. При обороне в открытом море от нападения атомных бомбардировщиков противника нет необходимости рассматривать все случаи, кроме единственного — когда перехватчик атакует цель в лоб. Наиболее вероятные случаи перехвата должны быть определены и проанализированы как для одиночной, так и для групповой цели. При этом надо иметь в виду, что полученные вероятности обнаружения целей будут действительны только для определенной тактической обстановки.

Принятое значение $P_d = 0,6$ представляет среднюю вероятность обнаружения цели в условиях тактической обстановки, наиболее вероятной в рассматриваемом нами случае.

Большинство истребителей может производить «свободный поиск», т. е. действовать независимо от наземных радиолокационных станций наведения. Скорость полета современных самолетов настолько велика, что визуальное наблюдение за целью редко сможет обеспечить успех. Особенно это относится к случаю, когда перехватчик летит прямо на цель, так как на подготовку и открытие огня остается всего несколько секунд. Самолетный радиолокатор, ведущий поиск, способен возместить недостатки человеческого зрения, обнаруживая цели на больших расстояниях и при любых условиях погоды. В случае свободного поиска истребитель должен решать дополнительную задачу по установлению принадлежности цели к противнику.

Эффективность свободного поиска истребителя может быть определена теми же методами, что и для случая наведения с земли. Основное отличие состоит в том, что необходимо сделать предположение (вероятно, наугад) о законе распределения целей в воздушном пространстве, просматриваемом самолетным локатором.

4.8. Занятие истребителем-перехватчиком исходного положения для стрельбы

После обнаружения цели происходит ряд событий, завершающихся занятием перехватчиком исходного положения для стрельбы (пуска управляемого снаряда). Обозначим через P_c вероятность того, что перехватчик сумеет своевременно занять исходное положение для стрельбы в предполагаемой тактической обстановке. Предшествующие пуску управляемого снаряда события определяются типом снаряда; в рассматриваемом нами случае это будет:

а) переключение самолетного локатора с поиска цели на режим сопровождения цели;

б) слежение за целью и расчет для определения необходимого маневра истребителя;

- в) маневр истребителя с целью занятия исходного положения для стрельбы;
 - г) ориентирование системы самонаведения снаряда на цель;
 - д) подготовка снаряда к пуску.
- При определении величины P_c используется та же методика

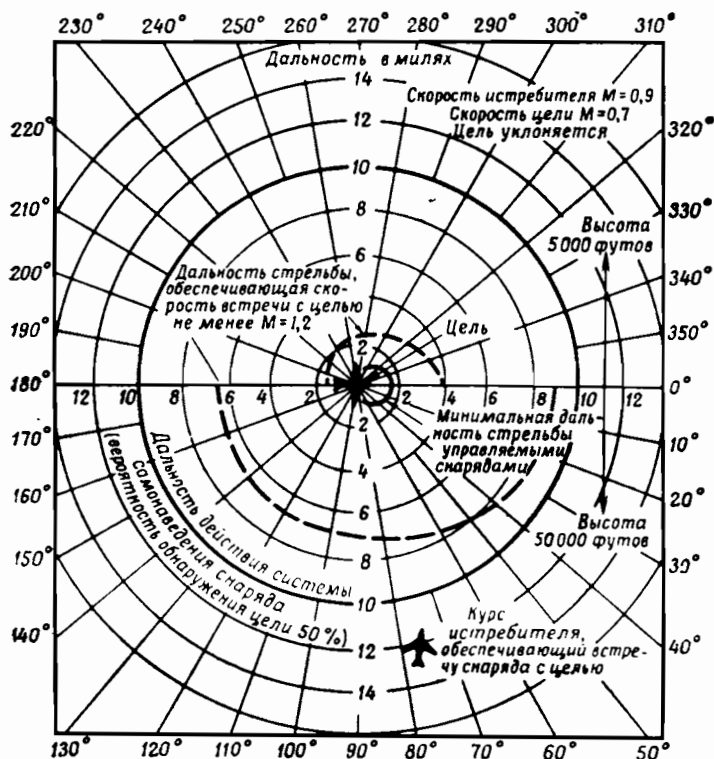


Рис. 4.3. Область возможных атак цели управляемыми снарядами.

анализа, которая применяется для вычисления вероятности обнаружения цели. Основной вопрос заключается в том, способен ли истребитель изменить свое случайно создавшееся положение по отношению к цели в момент ее обнаружения и занять требуемое положение для стрельбы. P_c характеризует вероятность выполнения этой задачи при некоторых средних тактических условиях.

Рассмотрим с этой точки зрения случай, показанный на рис. 4.2. Обнаружение цели произошло на расстоянии 9 миль. Перехватчик приближается к цели с относительной скоростью 320 миль/час, или примерно 5 миль/мин. Из летных испытаний

известно, что для переключения локатора с поиска на режим сопровождения цели пилоту требуется 5 сек., еще 13 сек. уходят на расчет и осуществление необходимого маневра перехватчиком с целью занятия исходного положения для стрельбы, а также ориентирование системы самонаведения снаряда относительно цели и на подготовку снаряда к пуску. К этому времени расстояние между истребителем и целью уменьшится до 7,5 мили, и пилот сможет открыть огонь, если только дальность полета снаряда позволит поразить цель.

Обратимся теперь к рис. 4.3, служащему иллюстрацией рассматриваемой проблемы. При движении от края рисунка (как летит перехватчик) к центру, где расположена цель, встречаются следующие три линии:

граница обнаружения цели системой самонаведения управляемого снаряда;

граница эффективного запуска первого управляемого снаряда (пунктирная линия);

граница, ближе которой пуск снаряда не будет эффективен.

Расчет этих трех кривых представляет значительные трудности и поэтому обычно производится с помощью моделирующего вычислительного устройства. Форма кривых зависит от характеристик цели, истребителя и комплекса управляемого снаряда, а также условий перехвата. Обычно это линии, симметричные относительно курса цели в горизонтальной плоскости, но не симметричные в вертикальной плоскости. Граница обнаружения цели системой самонаведения снаряда не представляет правильной окружности, так как на ее очертание влияет конфигурация цели. Вероятность обнаружения цели системой самонаведения снаряда составляет на этой границе только 50 %, но она быстро возрастает по мере уменьшения дальности. Следующая граница (пунктирная линия) определяется тем, что, когда скорость полета падает ниже $M = 1,2$, снаряд становится аэродинамически неэффективным. Особенно резко происходит торможение снаряда при полете на малых высотах, где сопротивление воздуха относительно велико. Этим и объясняется различие в положениях кривых, относящихся к высотам 5000 и 50 000 футов. На практике более серьезные ограничения дальности действия снарядов могут вызываться потерей управляемости или возникновением чрезмерного сопротивления вследствие непредвиденных вибраций органов управления. Последняя граница (сплошная линия вокруг цели) отражает то обстоятельство, что требуется определенное время и, следовательно, расстояние, чтобы исправить курс снаряда, случайно отклонившегося при запуске, и поставить предохранительное устройство в боевое положение (сделав таким образом взрыв снаряда безопасным для перехватчика-носителя). Наконец, перехватчик должен «освещать»

цель своим локатором до момента разрыва снаряда. В дальнейшем он должен избежать столкновения с целью или ее обломками.

Предположим для рассматриваемого случая, что перехватчик занял правильную позицию для пуска снаряда на расстоянии 7,5 мили от цели, цель захвачена радиолокатором самолета и все приготовления к пуску завершены. Тогда в течение 84 сек. можно произвести запуск одного или двух снарядов, после чего истребитель должен уклониться от столкновения с обломками цели. Малая дальность действия огневых средств бомбардировщика (1 миля) позволяет истребителю выполнить свою задачу, не подвергаясь особой опасности. Если бомбардировщик вооружен управляемыми снарядами класса «воздух—воздух», имеющими большую действительную дальность стрельбы, необходимо определить вероятность того, что истребитель останется после атаки невредимым.

До сих пор мы рассматривали задачу только в горизонтальной плоскости. Очевидно, что в момент обнаружения цели высоты полета истребителя и бомбардировщика могут быть различными. Поэтому необходимо провести такой же анализ и применительно к вертикальной плоскости. Полная величина вероятности обнаружения P_c определится при учете результатов анализа в обеих плоскостях.

Поскольку никаких существенных ограничений дальности и времени в данном случае не вводилось, можно заключить, что вероятность P_c будет довольно велика. Подобное же исследование должно быть проведено для всех возможных тактических условий, особенно для случая фронтального сближения с целью, когда время на выполнение задачи весьма ограничено. Предположим, что в результате такого анализа было найдено среднее значение $P_c = 0,9$. Для того чтобы учесть всякого рода случайности, возникающие в боевой обстановке, произвольно уменьшим полученную величину вероятности обнаружения цели и примем окончательно $P_c = 0,8$.

4.9. Вероятность поражения цели

Одна из основных задач конструктора состоит в создании снаряда, обеспечивающего максимальную вероятность поражения цели при условии, что истребитель занимает выгодное положение для запуска снаряда. Если предположить, что комплекс управляемого снаряда предназначен для поражения целей примерно с такими же характеристиками, как в нашем примере, то для определения вероятности поражения цели P_k нужно оценить работу конструктора с точки зрения ее завершенности и соответствия предполагаемым условиям боевого применения. Например,

следует убедиться в том, что созданный комплекс может взаимодействовать с другими элементами системы противовоздушной обороны. Нужно также проверить, учитывалась ли при создании снаряда возможность радиопротиводействия со стороны противника.

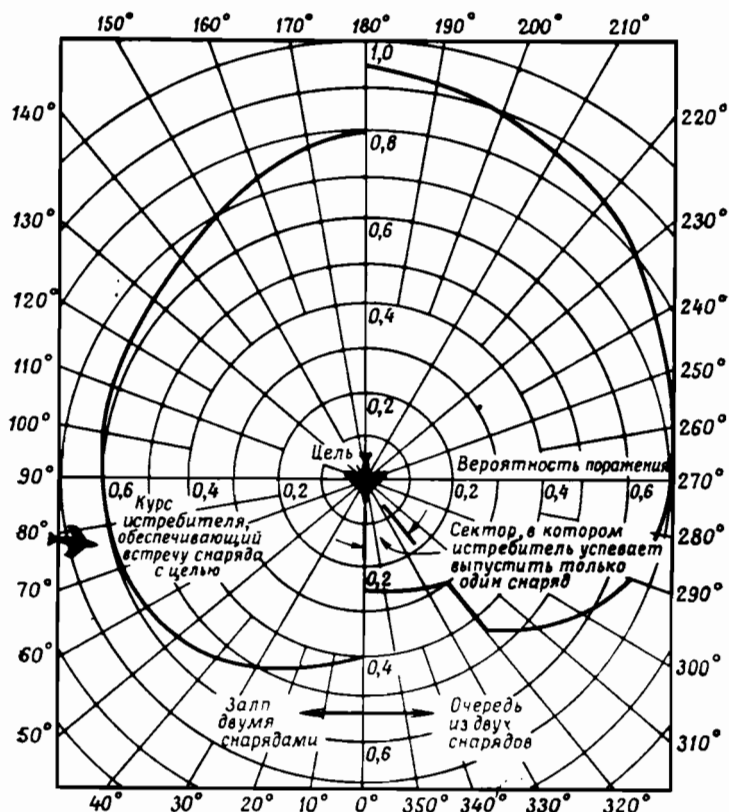


Рис. 4.4. Вероятность поражения цели двумя управляемыми снарядами при одной атаке истребителя на высоте 50 000 футов.

Многочисленные факторы, которые должны приниматься во внимание при проектировании комплекса управляемого снаряда, обеспечивающего высокую вероятность поражения, рассматриваются в дальнейших разделах настоящей книги. Поэтому здесь мы только кратко остановимся на результатах исследований.

На рис 4.4 показана вероятность поражения цели одиночного бомбардировщика, летящего на высоте 50 000 футов, перехватчиком, вооруженным двумя управляемыми снарядами. При этом разбирается два возможных случая:

1) одновременный пуск (залп) обоих снарядов (левая часть рисунка);

2) пуск снарядов одного за другим (правая часть рисунка).

Приведенные кривые вероятности поражения справедливы только для тех случаев, когда пуск снарядов произведен из пунктов, расположенных внутри допустимых границ, изображенных на рис. 4.3. Иначе говоря, термин «вероятность поражения» применяется здесь к двухснарядной системе, используемой против одной цели без учета вероятности обнаружения цели (P_d) и занятия истребителем исходного положения для стрельбы (P_c).

Продолжим рассмотрение случая, когда истребитель и бомбардировщик летят на пересекающихся взаимно перпендикулярных курсах. У летчика будет достаточно времени для выбора способа стрельбы: залпом или очередью. При стрельбе «очередью» из двух снарядов (пуск снарядов одного за другим) вероятность хотя бы одного попадания в цель достигает 0,7. Кроме того, этот способ стрельбы имеет еще и то преимущество, что при попадании первого снаряда в цель второй будет сохранен. При залповом огне вероятность попадания в цель равна 0,6. Очевидно, что стрельба очередями предпочтительнее. Однако необходимо отметить, что при лобовой атаке из-за большой скорости сближения истребитель успевает сделать только один выстрел, следовательно, в этом случае предпочтительнее стрельба залпом.

Для полного анализа вероятности поражения цели данным комплексом управляемого снаряда необходимо рассмотреть все возможные случаи. Следует учесть влияние изменения высоты полета, рассмотреть случаи, когда цель атакуется несколькими перехватчиками или, наоборот, один перехватчик атакует групповую цель. Наконец, необходимо выяснить влияние контрмер со стороны противника, как радиопомех, так и огня оборонительных средств.

В рассматриваемом примере огонь оборонительных средств неэффективен, поскольку он может вестись только на дальность в 1 милю. При полете строем бомбардировщики не смогут вести огонь, опасаясь попасть друг в друга. Поэтому противнику выгоднее осуществлять налеты несколькими одиночными бомбардировщиками одновременно с различных направлений.

Если предположить, что цель вооружена управляемыми снарядами класса «воздух—воздух» с дальностью, достаточной для попадания в перехватчик, то в этом случае необходимо провести анализ возможных результатов «дуэли» между перехватчиком и бомбардировщиком и определить окончательную вероятность попадания в цель или пролета цели через зону действия истребителей.

Допустим, что в результате анализа всех возможных случаев найдена величина вероятности поражения цели в ожидаемой тактической обстановке, равная 0,7. Уменьшив эту величину для учета боевых условий, примем окончательно $P_k = 0,65$.

Вычисление вероятности поражения цели истребителем. Результаты проведенного анализа позволяют определить полную вероятность поражения цели истребителем при наиболее часто встречающихся тактических условиях. Ранее было установлено, что $P_d = 0,6$, $P_c = 0,8$ и $P_k = 0,65$. Подставляя эти значения в уравнение $P_s = P_d \cdot P_c \cdot P_k$, находим, что $P_s = 0,31$.

4.10. Потребности в боевых средствах

Будем полагать, что для борьбы с 50 одиночными бомбардировщиками используются перехватчики, для которых полная вероятность поражения цели P_s равна 0,31. Выясним, сколько перехватчиков потребуется для уничтожения 40 бомбардировщиков из 50. Вероятность пролета цели при одной атаке перехватчика составляет $1 - P_s$, т. е. 0,69. Вероятность пролета при n атаках равна $(0,69)^n$, если не учитывать возможности вывода цели из строя в результате нескольких последовательных попаданий. Для рассматриваемого примера математическое ожидание пролета каждого бомбардировщика равно $10 : 50 = 0,2$. Из уравнения $(0,69)^n = 0,2$ находим $n = 4,3$. Следовательно, потребуется 4,3 атаки перехватчиков на каждый бомбардировщик, или 215 перехватчиков на 50 бомбардировщиков, для того, чтобы только 10 бомбардировщиков смогли уцелеть.

Итак, потребности в боевых средствах составляют 215 истребителей и 430 управляемых снарядов класса «воздух — воздух» (не считая запасных снарядов). Прежде чем окончательно принять эти цифры, необходимо пересмотреть всю систему противовоздушной обороны и проверить, можно ли эффективно использовать такое большое число истребителей. Эта проблема здесь рассматриваться не будет; однако мы перечислим те вопросы, на которые необходимо дать ответ при решении такой проблемы:

а) Смогут ли радиолокаторы наведения нормально работать в условиях массового применения перехватчиков, особенно при одновременных атаках ими одной цели с различных направлений?

б) Не возникнет ли в этих условиях опасность случайного поражения своих перехватчиков?

в) Успеют ли все перехватчики выполнить свои задачи до того, как бомбардировщики приблизятся к обороняемому объекту на 50 миль и войдут в зону действия управляемых снарядов класса «земля — воздух»?

4.11. Сравнение конкурирующих систем оружия

Для определения эффективности действия перехватчиков, вооруженных управляемыми снарядами класса «воздух — воздух», необходимо установить наносимый ими ущерб противнику и их полную стоимость применительно к конкретной боевой задаче и затем вычислить эффективность E как частное от деления первого на второе (см. формулу 3.1). Однако в данном случае речь идет лишь о сравнении двух комплексов управляемых снарядов, имеющих много общего. Поэтому можно значительно сократить расчеты и в то же время получить количественную основу для сравнительной оценки двух систем оружия.

В результате анализа (подобного проведенному выше) возможностей конкурирующего комплекса снаряда можно определить количество перехватчиков и снарядов, потребное для выполнения той же задачи. Поскольку ущерб был бы одинаковым, можно подсчитать стоимость всех истребителей и снарядов, требующихся для выполнения задачи, и взять эту стоимость в качестве основы для принятия решения.

Решение о том, какому из двух проектируемых комплексов управляемых снарядов отдать предпочтение, основывается не только на исследовании операций. Часто снаряд имеет существенные недостатки, которые трудно сразу обнаружить. Каждый такой недостаток в конечном счете влияет на эффективность оружия; однако специалист по исследованию операций их часто не замечает, не будучи специалистом в области проектирования.

Примерами таких недостатков могут быть:

- а) настолько большое отклонение при пуске снарядов, что система управления теряет контроль;
- б) неэффективность управления на малых высотах;
- в) незащищенность от помех;
- г) чрезмерный вес снаряда и существенное увеличение лобового сопротивления перехватчика, несущего снаряд;
- д) ограниченность углов сближения с целью.

Заключение. Для решения проблемы «В» необходимо, используя методы исследования операций, провести анализ для двух конкурирующих комплексов управляемых снарядов класса «воздух — воздух», с тем чтобы на основе результатов этого анализа принять решение о полном прекращении или замедлении разработки одного из снарядов. Для иллюстрации была сформулирована задача, которую обе системы оружия могли выполнить.

Затем была определена вероятность поражения цели перехватчиком, использующим выбранный тип управляемого снаряда, и

подсчитаны потребности в материальной части для выполнения поставленной задачи. Поскольку ущерб, причиняемый противнику, для обоих сравниваемых систем оружия одинаков, достаточно обоснованной мерой эффективности оружия может служить его полная стоимость. Дополнительными факторами, подлежащими учету, являются недостатки конструкции.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ БОЕВОЙ ПРИГОДНОСТИ ОРУЖИЯ И НАИЛУЧШИХ СПОСОБОВ ЕГО ТАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

5.1. Введение

В развитии любого комплекса управляемого снаряда наступает такой момент, когда оружие переходит из нежных рук его создателей в грубые руки тех, кто должен это оружие использовать. Эти люди желают знать, пригодно ли оно для боевого применения и как наиболее рационально его применять.

В связи с этим каждый вид вооруженных сил создает специальные части, на вооружении которых имеются корабли, самолеты и другие необходимые средства; эти части возглавляются офицерами, имеющими большой боевой опыт. Привлекаются также гражданские специалисты по исследованию операций, которые оказывают помощь в планировании испытаний и оценке их результатов на основе объективных статистических данных.

Прискорбно сознавать, что мы вступили в прошлую войну, обладая мощным вооружением, но не зная, как его лучше использовать. Много жизней можно спасти во время будущей войны, если сейчас, в мирное время, определить наиболее рациональные методы тактического использования оружия путем проведения опытных учений.

Проблема «Г»: Определение боевой пригодности и выбор наилучших тактических приемов

На основе характеристик данного комплекса управляемого снаряда, находящегося на последнем этапе разработки, определить его пригодность для боевого применения и выбрать наилучшие приемы тактического использования снаряда.

В качестве примера рассмотрим решение этой проблемы для комплекса управляемого снаряда класса «воздух — воздух», описанного в предыдущей главе. В этой главе были определены тактико-технические характеристики оружия на основе анализа проектных данных и нескольких испытаний. Теперь задача состоит в том, чтобы составить программу оценочных испытаний, которые утвердят или изменят тактико-технические характеристики оружия. Таким образом, будет доказана пригодность оружия для боевого применения и накоплены данные для определения наиболее рациональных способов его тактического использования.

5.2. Общие положения

Обычно снаряд, подлежащий опробованию в войсках, уже прошел некоторые испытания, и их результаты необходимо учитывать перед организацией войсковых испытаний. Первые испытания производятся либо при отработке управляемых снарядов, либо для определения тактико-технических характеристик. Во время этих испытаний используется самое различное приборное оборудование, а все операции со снарядами выполняются высококвалифицированным персоналом. Поэтому, как правило, с помощью таких испытаний нельзя определить пригодность снаряда для боевого использования. Но, с другой стороны, их результатами не следует пренебрегать. В крайнем случае они могут расцениваться как верхний предел возможностей оружия, который может быть достигнут в особо благоприятных условиях боевой обстановки.

Промежуточные проблемы. Обычно оценка боевой пригодности нового комплекса управляемого снаряда начинается раньше, чем закончатся технические испытания. Поэтому воинская часть, которой поручено произвести такую оценку, перенимает опыт эксплуатации нового оружия у технических групп. Воинские подразделения могут даже принимать участие в технических (заводских) испытаниях. Кроме того, в тех случаях, когда испытательное оборудование является весьма дорогостоящим или имеется в ограниченном количестве, технические группы передают его воинским частям. При этом очень важно, чтобы обе стороны хорошо понимали свои конкретные задачи.

Материальные и людские ресурсы, необходимые для проведения испытаний. Одновременно с составлением программы войсковых испытаний должна быть произведена оценка потребностей в личном составе и оборудовании. При проведении войсковых испытаний обычно используется меньшее количество измерительных приборов, чем во время заводских испытаний. Поэтому большая часть работы должна проводиться вне государственных испытательных полигонов. Для воспроизведения боевой обстановки испытания следует проводить в самых различных условиях климата и местности.

Идеальная программа испытаний почти всегда требует для своего выполнения значительно большего числа людей и оборудования, чем может быть в действительности привлечено. Поэтому только особо важные испытания проводятся с участием большого количества войск, которые на этот период прерывают свою обычную службу.

Большие расходы, связанные с привлечением воинских частей для испытания снарядов, требуют, чтобы программа испытаний составлялась очень тщательно и давала возможность ста-

вить новые задачи в ходе испытаний. Результаты испытаний должны обрабатываться и анализироваться без всякого промедления. Это связано с необходимостью введения изменений в программу испытаний немедленно, пока еще воинские части находятся в распоряжении испытательных групп.

5.3. Испытания пригодности снарядов для боевого применения

При определении пригодности комплекса управляемого снаряда для боевого использования необходимо выявить с помощью испытаний возможность применения снарядов в ожидаемых природных и метеорологических условиях и установить, что он может обслуживаться личным составом средней квалификации, а также удачно сочетаться и взаимодействовать с другими видами вооружения.

Применительно к рассматриваемому нами в качестве примера управляемому снаряду класса «воздух — воздух» это означает, что испытания должны выявить его способность переносить условия полета на борту самолета-носителя (давление, температура, влажность, вибрация, удары при посадке). Кроме того, снаряд должен быть хорошо приспособлен к физическим условиям его собственного полета, а также к хранению, транспортировке и обычному обращению с ним. Экипажи самолетов, производящие запуск снарядов, и наземный обслуживающий персонал, обеспечивающий хранение снарядов и подготовку их к полету, могут не иметь высокой квалификации, но, конечно, должны проходить специальную подготовку. Следует вести тщательный учет успехов личного состава в освоении нового снаряда, так как эти данные потребуются для определения продолжительности обучения при массовом использовании снарядов. Во время испытаний должна быть подтверждена пригодность управляемого снаряда к использованию совместно с другими видами вооружения.

Пригодность снарядов к боевому использованию может быть установлена и во время испытаний с целью определения их тактической эффективности. Вся сложность состоит в том, чтобы во время этих испытаний создать перечисленные выше условия, характерные для боевой обстановки.

5.4. Испытания, проводимые с целью определения тактической эффективности

Решение проблемы определения тактической эффективности комплекса управляемого снаряда может производиться на основе анализа проектных данных (как это было сделано при решении проблемы «В») или путем разработки программы испытаний. Перехват с применением управляемых снарядов обычно разде-

ляется на несколько последовательных действий (этапов). Вероятность успешного завершения каждого действия может быть определена в зависимости от наиболее существенных тактических факторов. Затем вероятности, соответствующие отдельным действиям, перемножаются, и тем самым находится полная вероятность успешного применения управляемых снарядов в конкретной тактической обстановке. Общая тактическая эффективность может быть определена в результате анализа вероятностей поражения целей управляемыми снарядами в ожидаемых тактических условиях. Именно такая методика использовалась при решении проблемы «В».

Первый этап перехвата, подлежащий исследованию во время испытаний, — это наведение истребителя наземным радиолокатором на цель (бомбардировщик). Переменными факторами, имеющими тактическое значение, являются: дальность от радиолокатора до точки перехвата, высота полета цели, курс перехватчика и полученная ошибка наведения. Результаты испытаний могут быть представлены в виде схемы (см. рис. 4.1).

Следующим этапом является обнаружение цели самолетным радиолокатором. Вероятность успешного обнаружения цели зависит от ошибки наведения, а также от взаимного расположения перехватчика и цели и от размеров сектора обзора радиолокатора. Схема, изображенная на рис. 4.2, относится к случаю, когда курсы истребителя и цели взаимно перпендикулярны. В результате испытаний должны быть построены аналогичные схемы и для других курсов истребителя по отношению к цели.

Схема, изображенная на рис. 4.3, иллюстрирует следующий этап перехвата. Она позволяет определить вероятность занятия истребителем требуемого исходного положения для стрельбы после того, как цель обнаружена. Из рисунка видно, что успех перехвата на третьем этапе зависит от высоты полета и от взаимного положения истребителя и цели. На схему также нанесены границы зоны, из которой может быть осуществлен эффективный запуск снаряда. Более полные данные испытаний должны выявить влияние: маневров, производимых целью, изменения скоростей полета цели и перехватчика и более широкого выбора высот полета.

Последний этап перехвата иллюстрируется схемой, изображенной на рис. 4.4. По этой схеме можно определить вероятность поражения одиночной и групповой цели при стрельбе залпом или очередью для различных случаев встречи истребителя с бомбардировщиком.

После того как перехват расчленен на этапы и установлены вероятные значения важнейших параметров, последующая задача заключается в проведении испытаний и обработке их.

результатов для построения соответствующих графиков. Необходимо вовремя обнаружить те факторы, которые неожиданно могут оказаться весьма существенными, и немедленно включить в программу испытаний определение степени их влияния на эффективность оружия.

При подсчетах потребного числа испытаний для каждого этапа важно использовать статистические методы. Например, если ожидается «нормальное распределение» некоторой величины, то число испытаний должно быть достаточным лишь для подтверждения теоретической зависимости.

5.5. Определение наиболее рациональных способов тактического использования оружия

Конечным результатом хорошо продуманной программы испытаний должно быть составление руководства по тактическому применению данного комплекса управляемых снарядов. Это руководство должно использоваться в качестве основы для тактического обучения войск в мирное время и для уточнения наивыгоднейших способов тактического применения оружия, если это потребуется, во время войны.

Обучение войск в мирное время должно проводиться в условиях, максимально приближенных к боевым, с учетом ожидаемых действий со стороны потенциального противника. Поэтому разведывательные органы обязаны доставлять всю необходимую информацию о наиболее вероятных тактических приемах противника. В результате анализа этих приемов с учетом тактических характеристик комплекса управляемого снаряда можно определить, при какой комбинации переменных параметров будет достигнута наибольшая эффективность оружия. Таким образом, будет выработано руководство службы для обучения войск в мирное время и для использования оружия во время войны.

Проблема «Д»: Определение влияния нового оружия на стратегию

На основе характеристик комплекса управляемого снаряда, находящегося в последней стадии оценочных испытаний, определить его влияние на стратегическое планирование.

Стратегическое планирование имеет чрезвычайно большое значение, поскольку оно определяет пути использования национальных ресурсов, обеспечивающих успех в будущей войне.

Изменение стратегии, которое может быть вызвано применением нового управляемого снаряда нами или нашим противником, должно быть предсказано заранее, до использования сна-

ряда. В противном случае будет упущена возможность для наиболее эффективного использования оружия большой потенциальной мощи, а в случае непредвиденного появления нового оружия у противника трудно будет сразу найти способы борьбы с ним. История показывает, что новое оружие применяется наиболее успешно до тех пор, пока противник не выработает эффективных контрмер. Для выявления реальных потенциальных возможностей нового снаряда используются методы исследования операций.

Как и во всяком другом случае, в результате анализа должны быть получены количественные данные, необходимые военному командованию для принятия решения. С его точки зрения, задача состоит в том, чтобы с помощью нового вида оружия нанести противнику максимально возможный ущерб при правильном использовании национальных ресурсов.

Исключительная широта этой проблемы не позволяет проиллюстрировать ее частными примерами. Основные принципы ее решения были изложены в главе 3, где рассматривалась проблема «А» для управляемых снарядов класса «земля — земля» с атомными боевыми частями. Читателю достаточно вспомнить тактико-технические характеристики и стоимость этого комплекса управляемого снаряда.

5.6. Стратегический анализ целей для управляемых снарядов

В § 3.7 было показано, что для поражения 9 крупных объектов противника потребуются 2 авианосца, вооруженных 50 управляемыми снарядами. Причем ущерб, нанесенный противнику, оценивался суммой в 360 млн. долларов, а стоимость используемых вооруженных сил — в 67 850 тыс. долларов. Таким образом, эффективность E составляла 5,2. Это относилось к конкретной группе целей и конкретному типу управляемых снарядов. Для изучения возможностей использования этих снарядов в стратегическом масштабе необходимо провести более широкое исследование.

Первым шагом такого исследования явится изготовление карт всей территории противника (включая те районы, которые могут быть захвачены противником в начале войны), находящейся в зоне действия наших управляемых снарядов рассматриваемого типа. Для разобранного в § 3.7 примера эта зона определяется расстоянием в 600 миль от районов, доступных для наших кораблей. На картах должны быть отмечены цели, имеющие стратегическое значение. Такими целями обычно являются крупные населенные пункты, промышленные районы, верфи, нефтеперегонные заводы, крупные аэродромы и т. п.

Затем необходимо оценить стоимость этих целей — не обязательно в виде суммы, которую придется затратить на их восстановление, но непременно с учетом уменьшения военного потенциала противника в случае уничтожения этих целей. Например, может оказаться, что фактически все производство горючего осуществляется теми нефтеперегонными заводами, которые входят в число намеченных целей. Поэтому их уничтожение будет иметь огромное значение, так как вся авиация, подводный флот, автомобильный транспорт и промышленность противника окажутся без горючего.

Какие средства обороны противника нужно будет преодолеть управляемым снарядам на пути к целям? Для того чтобы ответить на этот вопрос, необходимо установить структуру вражеской системы противовоздушной обороны, учитывая опыт прошлой войны, разведывательные данные и предполагаемое развитие вооружения противника. Такого рода анализ был уже проделан при решении проблемы «А» для управляемых снарядов с прямоточным воздушно-реактивным двигателем (см. § 3.7). Хотя мы рассматриваем более общую проблему, предположим для простоты, что система ПВО противника имеет ту же структуру, что и в упомянутом выше случае. Тогда полная вероятность пролета управляемых снарядов через зону действия системы ПВО противника будет равна 0,6.

5.7. Изменение эффективности оружия с течением времени

Для того чтобы произвести стратегическую оценку оружия, необходимо сделать предположение о продолжительности будущей войны. По опыту первой и второй мировых войн продолжительность войны можно считать равной четырем годам. Однако массовое применение атомного оружия может сократить период войны, скажем, до трех лет.

Вполне логичным является предположение о том, что эффективность данного комплекса управляемого снаряда E будет убывать в ходе военных действий. Высокая эффективность оружия в начале войны объясняется внезапностью его применения и неподготовленностью противника к борьбе с ним. Конечно, мы можем совершенствовать свои снаряды и тактику их использования и тем самым сохранять достаточную эффективность их действия. Но, с другой стороны, со временем противник, несомненно, выработает действенные контрмеры для борьбы с нашими управляемыми снарядами.

Поэтому стратегическое планирование должно производиться с учетом уменьшения эффективности оружия с течением времени.

5.8. Выбор целей

Не все выявленные цели необходимо уничтожить с помощью управляемых снарядов. Бессмысленно поражать те цели, стоимость которых меньше затрат на их уничтожение (заметим, что «стоимость» цели может повышаться, если цель имеет важное стратегическое или тактическое значение). В примере, рассмотренном выше (см. § 3.7), затраты на уничтожение 9 целей были

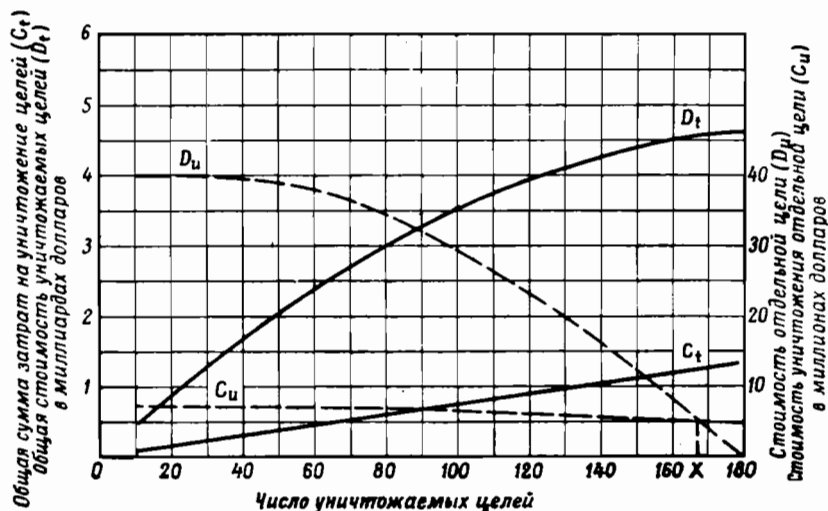


Рис. 5.1. Зависимость стоимости целей и затрат на их уничтожение от числа целей в случае использования снарядов класса «земля—земля» с атомным зарядом.

оценены в 67 850 тыс. долларов, т. е. по 7,5 млн. долларов на каждую цель. Зная это, можно сразу исключить из рассмотрения те цели, для которых $E < 1$.

Выбор целей, заслуживающих внимания, может быть произведен и более точным методом. Для этого необходимо определить радиус зоны поражения для боевой части управляемого снаряда с учетом ошибок рассеивания и провести вокруг целей окружности этим радиусом. Затем следует расположить цели по их стоимостям и установить общую потребность в материальной части для выполнения задачи.

Стоимость средств для поражения целей и будет служить основой для принятия решения о том, по каким объектам надлежит нанести удары.

Результаты такого анализа для вымышленного случая показаны на рис. 5.1. По горизонтальной оси отложено количество уничтожаемых целей, расположенных в порядке убывания

их стоимости. По вертикальной оси отложены стоимость отдельной цели (D_u) и стоимость ее уничтожения (C_u).

По этой же оси в другом масштабе нанесены суммарная стоимость группы целей (D_t) и суммарная стоимость уничтожения этой группы целей C_t .

Стоимость затрат на уничтожение отдельной цели C_u уменьшается по мере увеличения числа целей. Это объясняется снижением производственных затрат и повышением эффективности боевого использования оружия при его массовом применении. Однако стоимость отдельной цели D_u также уменьшается, так как при увеличении числа целей стрельба ведется по менее важным из них. Если число уничтожаемых целей больше 167, т. е. за точкой X на рис. 5.1, стоимость затрат на уничтожение отдельной цели превышает собственную стоимость цели. Поэтому уничтожение большего количества целей не должно планироваться. Иными словами, остальные цели не подлежат уничтожению с помощью управляемых снарядов.

5.9. Способность довести операцию до конца

Следующий вопрос состоит в том, имеется ли достаточно средств для того, чтобы успешно довести до конца операцию по уничтожению 167 целей.

Произведя соответствующие расчеты на основе рис. 5.1, можно было бы установить потребности в силах и средствах и общую сумму затрат на проведение такой операции. Допустим, что для этого потребуются 9 авианосцев, каждый из которых наносит 4 удара, 835 управляемых снарядов для поражения целей, 1700 запасных снарядов и 10 000 специально обученных солдат и офицеров. Общая стоимость расходов составит 1,26 млрд. долларов.

В результате последующего анализа должно быть установлено, можно ли выделить все эти необходимые средства для выполнения данной задачи. Не останавливаясь подробно на решении этой проблемы, перечислим лишь те вопросы, на которые следует получить ответы:

а) Достаточно ли национальных запасов атомного оружия (с учетом будущего производства) для снаряжения 835 боевых частей снарядов и не скажется ли это отрицательным образом на других средствах борьбы, также использующих атомное оружие?

б) Можно ли оторвать 9 авианосцев примерно на один год от выполнения других задач, таких, как борьба с подводными лодками и поддержка морских десантных операций?

в) Позволяет ли национальная экономика произвести расходы в сумме 1,26 млрд. долларов?

г) Можно ли организовать специальную подготовку 10 000 солдат и офицеров к предстоящей операции, оторвав их от выполнения других задач?

д) Сможет ли промышленность обеспечить производство 835 управляемых снарядов (плюс 1700 запасных снарядов), учитывая, что для их изготовления требуются дефицитные материалы?

Для ответа на некоторые из этих вопросов требуется скорее здравый смысл, чем количественный анализ. Именно здесь специалисту в области исследования операций могут понадобиться помощь и руководство со стороны военного командования. Если будет признано, что операция имеет слишком широкий размах, следует повторять анализ до тех пор, пока не будут установлены количественные основы проведения выгодной и в то же время вполне осуществимой операции.

Заключение. Анализом решения проблемы «Д» заканчивается изложение системы разработки управляемых снарядов в США и методики исследования операций. В главе 6 будет описан основной математический аппарат, используемый при исследовании операций, а в главе 7 будут рассмотрены конкретные примеры применения этого аппарата. Методика исследования операций была специально отделена от математики, с тем чтобы подчеркнуть возможность и необходимость выражения результатов анализа без помощи математических формул, что особенно важно для военного командования. Слишком многие исследователи теряли способность рассуждать объективно, запутавшись в математических выкладках. Конечно, нельзя пренебрегать математикой как инструментом для анализа, но в то же время очень важно уметь выражать результаты исследования нематематическим языком.

**МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ ИССЛЕДОВАНИЯ
ОПЕРАЦИЙ¹****6.1. Введение**

В данной главе будут введены некоторые основные математические понятия, необходимые для исследования операций в области управляемых снарядов.

При этом мы не стремимся к математической строгости изложения, поскольку единственная цель данной главы состоит в том, чтобы дать читателю лишь «точку опоры» в этом интересном и важном предмете.

Те, кто пожелает более детально ознакомиться с предметом, могут обратиться к источникам, указанным в списке, помещенном в конце 7 главы. В соответствии с этим все математические выкладки и примеры сведены до минимума и, где это оказалось практически возможным, привязаны к цитируемым источникам с целью облегчить дальнейшее изучение вопроса. В интересах единообразия текста обозначения некоторых величин, взятых из указанных источников, изменены, особенно при использовании источника [4].

6.2. Определение понятия «исследование операций»

Термин «исследование операций» был определен в § 2.4 данной части как «научный метод, дающий в распоряжение военного командования или другого исполнительного органа количественные основания для принятия решений относительно боевых действий войск или других организаций, находящихся под его управлением»².

С этой точки зрения мы могли бы рассматривать «исследование операций» как научный и обобщенный метод решения довольно разнообразных и широких проблем. Наибольшее применение этот метод находит в таких областях, где имеющаяся в распоряжении исследователя информация ограничена, а количество переменных величин велико.

¹ Главы 6 и 7 написаны преимущественно Дж. Джергером.

² Morse Ph. M. and Kimball G. E., *Methods of Operations Research*, The Technology Press of M. I. T. and John Wiley and Sons, Inc., p. 1. Материал, изложенный в § 6.2—6.5, взят главным образом из этой книги.

Назначение этого метода состоит в том, чтобы отделить существенные факторы и переменные величины от несущественных, маловажных, и обеспечить принятие возможно более точного решения.

По самой своей природе «исследование операций» не может обойтись без понятия вероятностей. Поэтому наибольшее значение имеет математическая теория вероятностей и ее применение. Это особенно справедливо для комплексов управляемых снарядов, поскольку эффективность их лучше всего может быть выражена с помощью теории вероятностей.

6.3. Введение в теорию вероятностей

На исход почти всех военных действий влияют элементы случайности, причем такое влияние обычно бывает весьма значительным. Поэтому только после анализа результатов нескольких аналогичных боевых действий или операций удастся установить определенные закономерности. При этом важно не только знать, насколько индивидуальный, единичный результат отличается от некоторого среднего, но и то, в какой степени этот средний результат зависит от переменных величин, влияющих на ход боевых действий. Данные о результатах боевых действий или операций часто бывают скудными и отрывочными, поэтому при анализе этих данных необходимо иметь возможность оценить, какова вероятность того, что при проведении последующих действий или операций условия будут близки к анализируемым.

Вероятность проникает, таким образом, во многие математические задачи точно так же, как и во все статистические задачи.

В теории вероятностей принято говорить о «событии» и вероятности его наступления. Так, можно сказать: «Какова вероятность того, что имеющийся у меня один лотерейный билет выиграет автомобиль в ежегодной лотерее?» Здесь «событие» состоит в выигрыше автомобиля путем вытаскивания совершенно определенного билета (имеющего тот же номер, что и мой билет) из большого количества билетов, находящихся внутри ящика.

До вынимания билета невозможно сказать заранее, какой из билетов будет вынут, поскольку нет никаких оснований полагать, что какому-то одному билету будет отдано предпочтение перед другими. Это чисто случайный процесс, и обладатель выигрышного билета может справедливо рассуждать: «Если в ящике 10 000 билетов и если я имею один билет, то мои шансы на выигрыш составляют 1 из 10 000. Поэтому вероятность выигрыша составляет $\frac{1}{10\,000}$ ».

Классическим примером случайного события, широко употребляемым в литературе по теории вероятностей, является результат простого акта, состоящего в бросании монеты. Это событие в некотором смысле отличается от того, которое происходит в лотерее. Инженер при этом имеет все основания рассуждать так:

«Если известны точные размеры, форма, вес, распределение массы монеты, ее начальное положение в пространстве, точка приложения и величина сообщаемого ей импульса, относительное положение поверхности, на которую падает монета, механические свойства монеты и поверхности, а также свойства воздуха, в котором летит монета, то, теоретически рассуждая, можно рассчитать путь монеты и точно предсказать, на какую сторону она упадет».

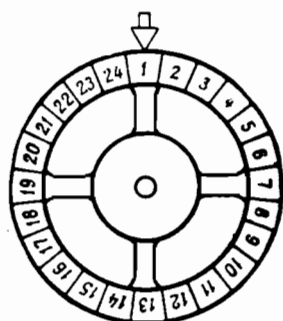


Рис. 6.1.

Этот инженер может с полным правом утверждать, что принятые им определенные условия полностью исключают случайность и позволяют точно предсказать исход бросания монеты. Все это, конечно, верно. Однако с практической точки зрения такое решение рассматриваемой частной задачи совершенно не

имеет смысла, поскольку инженеру никогда не удастся получить все необходимые данные с такой точностью, какая необходима для подобного предсказания.

Даже если монета и сведения о ней абсолютно точны, все равно человек не в силах сделать так, чтобы при каждом бросании монеты ей был сообщен совершенно одинаковый импульс. Точно так же инженер не может измерить или каким-либо другим путем определить величину импульса и его характер. Короче говоря, импульс, сообщаемый монете, имеет «случайный» характер, точно так же, как случайным является вытаскивание какого-то определенного билета из огромной массы билетов.

Таким образом, если мы бросаем более или менее сбалансированную монету наугад, то нет никаких причин ожидать появления именно лицевой стороны («надписи»), а не обратной стороны («герба»). Тогда мы говорим, что вероятности появления «надписи» и «герба» одинаковы и равны 50% (или 0,5).

Это вовсе не означает, что при каждом втором броске выпадет «надпись». Опыт показывает, что при бросании монеты или, в общем случае, при изучении любого случайного события интересующее нас событие может произойти несколько раз подряд либо может столько же раз подряд не произойти, несмотря на

то, что в процентном отношении вероятности его появления или не появления равны между собой.

Идея случайной функции является основой теории вероятностей. Для более полной иллюстрации понятия «случайность» рассмотрим работу широко известного «колеса счастья», показанного на рис. 6.1. Когда это колесо после вращения останавливается, против указателя оказывается какая-то цифра. Благодаря тому что сила толчка, сообщаемого колесу, не может быть определена заранее, вероятность остановки какой-либо цифры напротив указателя точно такая же, как и всякой другой цифры. Поэтому этот процесс является «случайным». Вероятность получения какой-либо определенной цифры будет равна $\frac{1}{24}$ для большого количества случаев, поскольку всего имеется 24 цифры, каждая из которых может с равной вероятностью остановиться напротив указателя.

6.4. Случайные функции

В книге [1] «Методы исследования операций» авторы очень удачно используют прямую линию для пояснения понятия вероятности случайной переменной величины. Возвратимся к случаю бросания монеты, используя понятия, введенные в указанной работе.

Прямая, представленная на рис. 6.2, имеет длину, равную единице, и разделена на две половины. Вероятность появления «надписи» или «герба» в результате бросания монеты можно сравнить с вероятностью того, что некоторая точка, выбранная наугад на прямой линии, будет находиться либо на левой, либо на правой ее половине. Вероятность того, что выбранная наугад точка окажется на левой половине, равна 0,5; для правой половины вероятность также равна 0,5. Вероятность же того, что точка будет находиться либо на левой, либо на правой половине, будет равна 1. Это событие имеет 100%-ную достоверность благодаря поставленному нами условию, что любая выбранная наугад точка должна непременно лежать на линии единичной длины.

В случае с монетой вероятность появления «надписи» или «герба» также равна 1, поскольку мы обязательно должны получить либо «надпись», либо «герб», ибо не может быть иного результата, не считая случаев, когда монета упадет на ребро или исчезнет в воздухе.

Можно заметить, что вероятность наступления либо одного, либо другого из двух равно возможных событий равна сумме вероятностей каждого из событий.

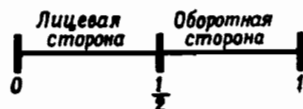


Рис. 6.2.

Читателю может показаться, что все сказанное настолько просто и очевидно, что не требует пояснений на конкретных примерах. Однако на самом деле эти простые идеи дают возможность наглядно пояснить и более сложные проблемы.

Обратимся теперь к рис. 6.3, на котором представлена прямая линия, разделенная на 6 равных отрезков, соответствующих шести граням игральной кости. Случай появления чисел 1, 2, 3, 4, 5 или 6 при бросании кости можно сравнить со случайным выбором точки где-нибудь на прямой линии единичной длины, показанной на рис. 6.3.

Цифры, соответствующие количеству очков на каждой из граней игральной кости, нанесены над каждым из отрезков. Таким образом, если при бросании кости выпадет, скажем,

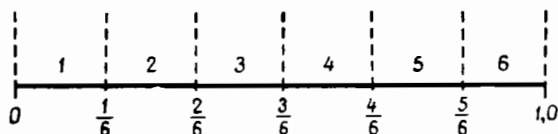


Рис. 6.3.

число 5, то это соответствует случаю, когда наугад выбранная точка окажется внутри отрезка, обозначенного цифрой 5, т. е. где-то между $\frac{4}{6}$ и $\frac{5}{6}$ единичной линии. В любом случае вероятность равна $\frac{1}{6}$, поскольку возможности появления любой из шести цифр (так же как и возможности нахождения точки внутри любого из шести отрезков) одинаковы.

Заметим, что вероятность события, состоящего в появлении, например, любых трех из шести цифр, равна $\frac{3}{6} = 0,5$. Вероятность получить 1, 2, 3, 4, 5 или 6 равна $\frac{6}{6} = 1$. Опять мы видим, что вероятность осуществления хотя бы одного из нескольких событий равна сумме вероятностей каждого из этих событий.

Сумма вероятностей всех возможных событий равна всегда 1, поскольку наступление хотя бы одного из событий является необходимым и, следовательно, оно обязательно произойдет.

Вероятность появления числа 4 равна $\frac{1}{6}$. Вероятность появления любого числа, кроме 4, равна $\frac{5}{6}$, поскольку она равна сумме вероятностей появления чисел 1, 2, 3, 5 или 6. Поэтому вероятность не появления числа 4 равна $\frac{5}{6}$. Отсюда мы имеем теорему: *вероятность того, что событие не произойдет, равна еди-*

нице минус вероятность того, что оно произойдет. Математически это выражается так:

$$q = 1 - p, \quad (6.1)$$

где

q — вероятность того, что событие не произойдет;

p — вероятность того, что событие произойдет.

Великий математик Лаплас сформулировал в 1796 г. следующие принципы теории вероятностей:

Принцип I. Вероятность наступления события определяется как отношение числа благоприятствующих случаев к числу всех возможных случаев.

Принцип II. Вероятность наступления хотя бы одного из нескольких событий равна сумме их соответствующих вероятностей.

Принцип III. Вероятность одновременного наступления нескольких независимых событий равна произведению их соответствующих вероятностей.

Мы только что рассмотрели случаи, поясняющие принципы I и II. Принцип III может быть проиллюстрирован следующим примером. Вероятность появления числа 3 при бросании одной кости равна $\frac{1}{6}$. Вероятность одновременного появления числа 3 на каждой из двух костей, бросаемых одновременно, равна $\frac{1}{6} \cdot \frac{1}{6} = \frac{1}{36}$.

Принцип IV. Если два события зависят друг от друга, то вероятность наступления сложного события, состоящего в одновременном осуществлении обоих этих событий, равна произведению вероятности первого события на вероятность второго, вычисленную в предположении, что первое событие произошло.

Чтобы проиллюстрировать принцип IV, рассмотрим следующую задачу. Из трех урн, обозначенных A , B и C , две содержат только белые шары, а одна содержит только черные шары. Вероятность вынуть из урны C белый шар равна $\frac{2}{3}$, так как две из трех урн содержат белые шары. Но если белый шар вынут из урны C , то черный шар может быть вынут теперь либо из урны A , либо из урны B . Теперь вероятность вынуть из урны B белый шар равна $\frac{1}{2}$. Таким образом, вероятность вынуть два белых шара из урн B и C равна $\frac{2}{3} \cdot \frac{1}{2} = \frac{1}{3}$.

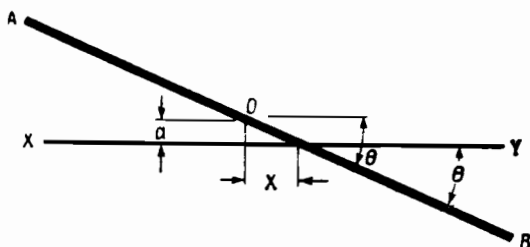
Этот пример показывает влияние прошедшего события на вероятность будущих событий, поскольку вначале вероятность вынуть белый шар из урны B была равна $\frac{2}{3}$, но как только из

урны C был вынут белый шар, эта вероятность стала равной $\frac{1}{2}$. Она могла бы превратиться в достоверность, если бы из урны C был вынут черный шар.

6.5. Функции распределения

Для многих случаев анализа операций недостаточно только одного понятия о случайных процессах. Дело в том, что некоторые переменные сами по себе не являются случайными, хотя часто по своей природе и могут быть отнесены к случайным функциям. В книге [1] содержится много превосходных примеров, которые заслуживают нашего внимания. Рассмотрим один из них.

Пусть вращается длинный, закрепленный в центре стержень. Мы хотим знать, какова вероятность того, что, когда стержень



Р и с. 6.4.

придет в состояние покоя, он (или его продолжение) будет пересекать данную линию на участке определенного отрезка (рис. 6.4).

Предположим, что XY — линия, а AB — стержень, закрепленный в точке O , расстояние которой от линии XY по перпендикуляру равно a . Пусть x — расстояние от точки пересечения стержня с линией до основания перпендикуляра, опущенного из точки O на линию XY . Если θ — угол между стержнем и линией, проходящей через точку O параллельно XY , то случайное значение θ при вращении стержня будет лежать в пределах от 0 до π .

С точки зрения физики вращение рычага AB похоже на вращение «колеса счастья». Импульс, сообщаемый стержню во время раскручивания, имеет случайную величину. Это приводит к тому, что и значение угла θ , под которым остановится рычаг, также будет случайным. Переменная x — не случайная величина, но функция случайной переменной θ :

$$x = a \operatorname{ctg} \theta. \quad (6.2)$$

Важным обстоятельством является то, что случайная переменная θ может принимать любые значения в указанных выше пределах *с равной вероятностью*.

Эту случайную переменную величину удобно преобразовать так, чтобы можно было воспользоваться прямой линией единичной длины для изображения возможных пределов изменения вероятностей, как это было сделано на рис. 6.2 и 6.3. Если определять случайную величину F из выражения $F = \theta/\pi$, то при изменении θ от 0 до π величина F будет меняться в пределах от 0 до 1. Наоборот, выбирая переменную $F = \frac{\pi - \theta}{\pi}$, получим, что величина F меняется от 0 до 1 при изменении θ в пределах от π до 0. Вторая форма для F более предпочтительна, поскольку при этом x является возрастающей, а не убывающей функцией θ . Для x можно записать выражение

$$x = -a \operatorname{ctg}(\pi F). \quad (6.3)$$

Эту зависимость можно изобразить графическим способом (рис. 6.5): на прямой единичной длины нанесена (снизу) равномерная шкала для показа распределения случайной функции F .

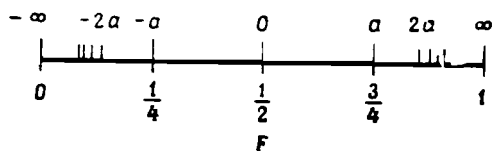


Рис. 6.5.

Величина a , вычисленная по формуле (6.5), записана сверху. Вероятность того, что x лежит между двумя некоторыми значениями x_1 и x_2 , равна длине соответствующего отрезка этой линии, определенного по шкале F . Математически это выражается так:

$$P = F_2 - F_1 = -\frac{1}{\pi} \operatorname{arc} \operatorname{ctg} \left(\frac{x_2}{a} \right) + \frac{1}{\pi} \operatorname{arc} \operatorname{ctg} \left(\frac{x_1}{a} \right). \quad (6.4)$$

Это тот же самый принцип, который был применен для сравнения результатов случайного выбора точек на линии и выбрасывания игральной кости (рис. 6.3): вероятность попадания точки на отрезок, обозначенный цифрой 5, равна $\frac{5}{6} - \frac{4}{6} = \frac{1}{6}$ всей длины прямой, на которой вообще точка может случайно оказаться.

В задачах такого рода, как задача о вращающемся стержне, величина θ обычно называется случайной переменной, а величина x — *стохастической* переменной. Обычно стохастическая

переменная — это величина, определяемая экспериментальным путем. Как раз она-то нас и интересует.

Записав соотношения между стохастической и случайной переменными, мы получаем возможность использовать хорошо известные свойства случайных величин для определения вероятностных характеристик стохастической переменной, которые обычно мало известны. В дальнейшем для обозначения случайной переменной введем обозначение ξ , сохранив обозначение x для стохастической переменной (случайной функции). Для удобства анализа стоящей перед нами задачи выберем начало отсчета и масштаб измерения для случайной переменной такими, чтобы значение ξ лежало в пределах от 0 до 1, точно так же, как мы поступили в задаче с вращающимся стержнем. Это можно сделать, применяя при преобразовании этой переменной постоянные значения, которые она принимает на границах интервала. Если это сделать, то численные значения величины ξ , полученные из многих испытаний, будут более или менее равномерно распределены внутри интервала от 0 до 1. В пределе, когда количество испытаний стремится к бесконечности, могут иметь место все возможные значения ξ в этом интервале.

Если переменную ξ , которая, по определению, изменяется теперь в пределах от 0 до 1, представить как функцию от x , то можно записать

$$\xi = F(x); \quad 0 \leq \xi \leq 1. \quad (6.5)$$

Функция $F(x)$ такова, что процесс выбора величины x аналогичен случайному выбору значения ξ в интервале между 0 и 1. Поэтому $F(x)$ называется *функцией распределения* стохастической переменной x .

Вероятность того, что x лежит в интервале от x_1 до x_2 , равна

$$P = F(x_2) - F(x_1). \quad (6.6)$$

Для бесконечно малого интервала dx , расположенного у точки x , вероятность того, что стохастическая переменная лежит внутри этого интервала, равна

$$P = F(x + dx) - F(x) = \left(\frac{dF}{dx} \right) dx.$$

Функция $f(x) = \frac{dF}{dx}$ известна под названием *плотности вероятности* в точке x .

Общая трактовка вероятности в континууме принимает плотность вероятности в качестве основного понятия. Однако при работе со статистическими данными применение $f(x)$ приводит к определенным трудностям и неточностям, присущим численному дифференцированию. Этого в значительной степени можно

избежать, если использовать вместо $f(x)$ функцию $F(x)$. (Кроме того, если $F(x)$ является прерывной функцией, то усложняется само понятие плотности вероятности.)

Посмотрим, как сказанное выше можно применить к случаю с вращающимся стержнем. Здесь θ является случайной переменной, которая может принимать значения от 0 до π , а x есть стохастическая переменная, причем $x = a \operatorname{ctg} \theta$. Масштаб и начало отсчета θ можно изменить таким образом, чтобы получить новую случайную переменную, меняющуюся в пределах от 0 до 1, т. е. $\frac{(\pi - \theta)}{\pi}$. Эта новая случайная переменная, взятая как функция стохастической переменной x , является функцией распределения для x :

$$F(x) = -\frac{1}{\pi} \operatorname{arc} \operatorname{ctg} \left(\frac{x}{a} \right).$$

Плотность вероятности определяется, следовательно, следующей формулой:

$$f(x) = \frac{1}{\pi} \left(\frac{a}{x^2 + a^2} \right).$$

Все вышеприведенные рассуждения почти целиком взяты из книги [1], где приведен ряд замечательных примеров, иллюстрирующих изложенный выше материал. Один из этих примеров относится к области теории поиска и служит не только для пояснения взаимосвязи между случайной и стохастической переменными, но затрагивает сущность этой актуальной проблемы.

Обратимся к рис. 6.6. Предположим, что ведущий поиск корабль находится в точке O и движется с постоянной скоростью V в направлении, показанном стрелкой. Разыскиваемый объект (спасательная лодка с людьми, вражеский корабль и т. д.) расположен, вероятно, где-то в океане. Для простоты предположим, что он неподвижен. Сделаем также упрощающее предположение (кстати сказать, для ряда случаев не очень грубое), что если искомый объект попадет в окружающую корабль зону с радиусом R , то он будет обнаружен. Требуется ответить на такой вопрос: какова вероятность того, что объект по его обнаружения *будет виден с корабля под азимутом α* ?

Для удобства можно предположить, что корабль стоит на месте, а океан движется вдоль параллельных линий, показанных на рисунке. Объект также будет двигаться вдоль одной из этих линий, скажем вдоль линии, кратчайшее расстояние до которой

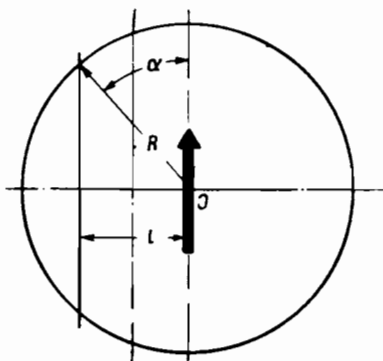


Рис. 6.6.

от корабля равно l^1 . Нетрудно заметить, что если местонахождение объекта является случайным, то в момент его обнаружения l может принять любое значение в пределах от $-R$ до $+R$. Таким образом, мы видим, что поскольку все значения l (от $-R$ до $+R$) равновероятны, то l является случайной переменной. Угол α , который должен быть определен эмпирическим путем, является стохастической переменной и связан со случайной переменной уравнением $l = R \sin \alpha$. Изменим теперь случайную переменную так, чтобы ее возможные значения лежали в пределах от 0 до 1:

$$\xi = \frac{R+l}{2R}; \quad 0 \leq \xi \leq 1,$$

когда

$$-R \leq l \leq +R.$$

Для этих условий функция распределения будет определяться выражением

$$F(\alpha) = \frac{R + R \sin \alpha}{2R} = \frac{1}{2}(1 + \sin \alpha).$$

Рис. 6.7. Вероятность обнаружения объекта под относительным азимутом α .

Вероятность того, что искомый объект будет виден в секторе, определяемом азимутами α_1 и α_2 (где $-\frac{\pi}{2} < \alpha_1$ и $\alpha_2 < \frac{\pi}{2}$), равна

$$F(\alpha_2) - F(\alpha_1) = \frac{1}{2}(\sin \alpha_2 - \sin \alpha_1).$$

В частности, вероятность того, что объект будет находиться в секторе, ограниченном углами α и $d\alpha$ (т. е. будет обнаружен «под азимутом α » в элементарном секторе $d\alpha$) составит

$$f(\alpha) d\alpha = \frac{1}{2} \cos \alpha d\alpha.$$

Величина $f(\alpha) = \frac{1}{2} \cos \alpha$ является плотностью вероятности. Кривые, характеризующие F и f , показаны на рис. 6.7. Мы видим, что если справедливы наши допущения (эффективность станции обнаружения равна во всех направлениях, все объекты обнаруживаются на дальности R), то более вероятно, что искомый объект будет замечен в передней по ходу корабля четверти, нежели где-то сбоку, поскольку плотность вероятности имеет максимальное значение для угла $\alpha = 0$. Более того, если ограничить сектор обзора только передней четвертью, то вероятность обнаружения уменьшится всего примерно на 30%.

¹ Читатель может заметить, что рассматриваемый пример похож на задачу о перехвате воздушной цели, приведенную в главе 4 данной части.

6.6. Законы распределения

При анализе большинства военных операций приходится иметь дело с многими случайными факторами. Исследование операций имеет целью дать возможность выбрать наилучшие методы использования сил и средств в предстоящей операции и предвидеть ее результаты. Обычно такой анализ сводится к оценке вероятностей наступления тех или иных событий, что может быть выражено через функцию распределения. Если требуется, чтобы вероятность успеха была большой, мы вправе ожидать, что исход большинства испытаний будет благоприятным для интересующего нас события. При большом количестве испытаний предсказание может быть очень хорошим.

В анализах такого рода обычно используются следующие три закона распределения вероятностей:

1. Биномиальное распределение.
2. Распределение Пуассона.
3. Нормальное распределение (закон Гаусса).

Биномиальное распределение. Основная теорема теории вероятностей гласит:

Если вероятность события в единичном испытании равна p , то вероятность того, что это событие произойдет точно n раз в m независимых испытаниях, равна

$$P_m(n) = \frac{m!}{n!(m-n)!} p^n (1-p)^{m-n}, \quad (6.7)$$

где

$P_m(n)$ — вероятность того, что событие произойдет n раз в m независимых испытаниях;

p — вероятность появления события в единичном испытании.

Это выражение известно под названием *биномиального закона распределения*, а графическая зависимость $P_m(n)$ от n называется *биномиальным распределением*. При очень большом m и при n , близком к mp , формула (6.7) содержит факториалы трех больших чисел, что очень усложняет вычисления. Применяя формулу Стирлинга (см. [2], стр. 106), можно получить довольно хорошее приближение:

$$m! = \sqrt{2\pi m} m^m e^{-m} \left(1 + \frac{1}{12m} + \frac{1}{288m^2} - \frac{139}{51840m^3} + \dots \right). \quad (6.8)$$

На рис. 6.8 приведены четыре графика зависимости $P_m(n)$ от n для разных значений m ($m=5$, $m=10$, $m=50$, $m=100$) и для одного значения вероятности при единичном испытании $p = \frac{1}{3}$.

Поскольку биномиальный закон применяется только для целых чисел, то функция $P_m(n)$ принимает ряд дискретных значений, что показано на рис. 6.8 в виде серии линий определенной длины с промежутками между ними. Эти графики позволяют проиллюстрировать ряд интересных свойств биномиального распределения. Во-первых, для каждого значения m имеет место

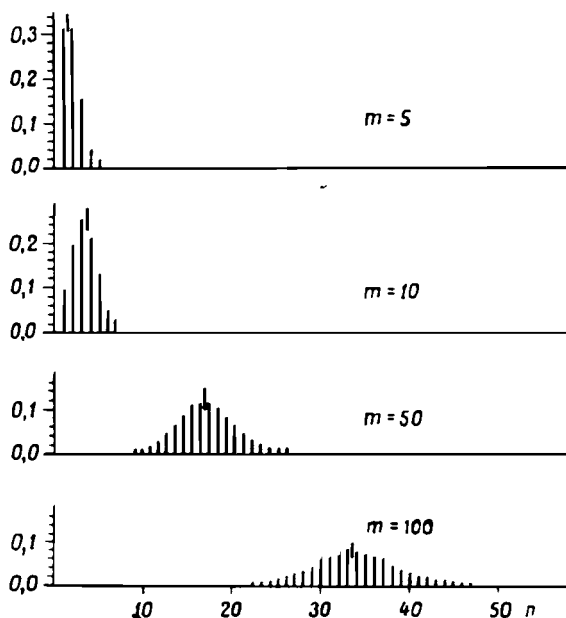


Рис. 6.8. Вероятность наступления события при m опытах, когда вероятность наступления события в одном опыте равна $1/8$.

максимум вероятности. Во-вторых, число благоприятных случаев, соответствующих этой максимальной вероятности (наиболее вероятное число (благоприятных случаев), возрастает при увеличении m . В-третьих, вероятность наступления наиболее вероятного количества благоприятных случаев уменьшается с возрастанием m . В-четвертых, чем больше число испытаний m , тем сильнее растягивается график вдоль оси n , так что по мере увеличения числа опытов меньше шансов получить наиболее вероятный результат. В-пятых, наиболее вероятное число благоприятных исходов во всех случаях примерно равно одной трети от всего количества испытаний.

Так как графики, приведенные на рис. 6.8, построены только для одного значения вероятности при одном испытании $p = \frac{1}{3}$,

то отсюда следует, что наиболее вероятное число благоприятных случаев при m испытаниях равно mr , где r есть вероятность появления благоприятного события при единичном испытании; при этом предполагается, что mr есть целое число. Если mr не является целым числом, то наиболее вероятное число благоприятных случаев равно любому ближайшему целому числу, лежащему справа или слева от числа mr .

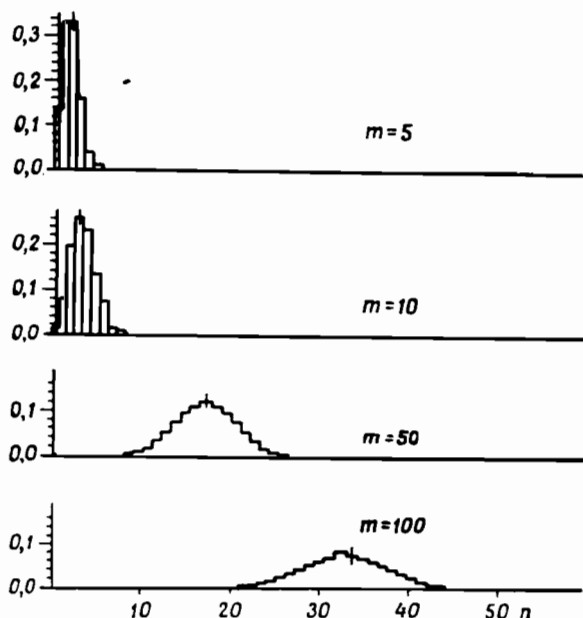


Рис. 6.9. Видоизмененный-график рис. 6.8.

Если мы на каждой ординате графиков построим прямоугольники единичной ширины, как показано на двух верхних графиках рис. 6.9, то площадь каждого прямоугольника будет равна вероятности величины n , служащей основанием этого прямоугольника. На двух нижних графиках вертикальных линий нет, поскольку их можно рассматривать лишь как вспомогательные линии, необходимые только для построений. В результате имеем ступенчатые кривые, обладающие следующими свойствами:

1. Площадь, расположенная под каждой ступенькой, представляет собой вероятность соответствующей величины n .

2. Площадь, ограниченная всей ступенчатой кривой, равна 1.

Поскольку наивероятнейшее число благоприятных случаев, как показано на рис. 6.8 и 6.9, почти равно $1/3$ от количества испытаний, то интересно посмотреть, как изменятся графики,

если их перестроить, взяв в качестве абсциссы вместо n отношение n/m .

Мы получаем кривую распределения для отношения благоприятных случаев, а не для числа таких случаев; она может быть названа *кривой процентного распределения*. Чтобы сохранить отмеченные выше два свойства кривых, площади прямоугольников необходимо сделать равными площадям соответствующих прямоугольников, показанных на рис. 6.8, независимо от того, что произойдет с ординатами. Это приводит к тому, что график сужается, а его ординаты увеличиваются по мере увеличения числа событий. На рис. 6.10 представлен результат указанного перестроения графиков для $m = 50$, $m = 100$ и $m = 1000$.

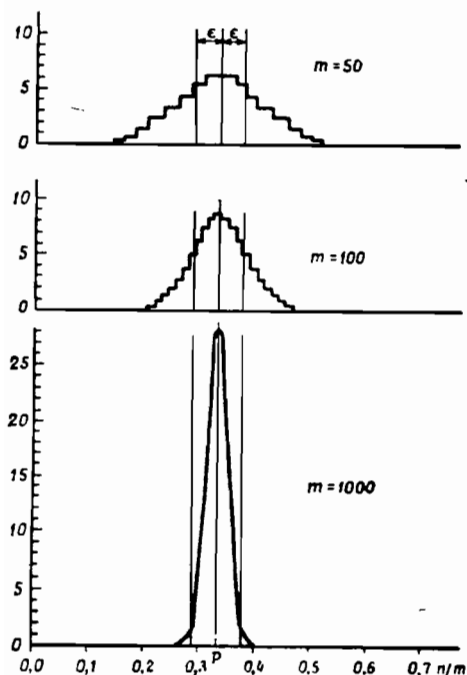


Рис. 6.10. Видоизмененный график рис. 6.8.

Эти графики иллюстрируют ряд интересных свойств *кривых процентного распределения*, отличающихся в некоторой степени от свойств кривых для числа благоприятных случаев. Во-первых, наиболее вероятное отношение благоприятных случаев к числу всех возможных случаев при увеличении m остается примерно постоянным. Во-вторых, это наиболее вероятное отношение всегда близко к p — настолько, насколько это возможно, если учесть, что n должно быть целым числом. В-третьих, высота прямоугольника, соответствующего этому наиболее вероятному отношению, *возрастает* с увеличением числа испытаний. В-четвертых, по мере увеличения числа испытаний ширина кривой процентного распределения *уменьшается*. Таким образом, возможность пропустить наиболее вероятное значение n при данном процентном отношении уменьшается с увеличением числа испытаний.

Рассмотрим теперь, какова вероятность получить отношение n/m , отличающееся от наиболее вероятного значения $\frac{1}{3}$ на вели-

чину, меньшую чем наперед заданная величина ϵ . На рис. 6.10 величина ϵ взята равной 0,04. Проведем две вертикальные прямые на расстоянии ϵ от $n/m = \frac{1}{3}$; площадь, ограниченная кривой за пределами этих линий, показывает вероятность того, что отношение благоприятных случаев будет лежать вне пределов $\frac{1}{3} - \epsilon$ и $\frac{1}{3} + \epsilon$. При сравнительно малом количестве испытаний, например при $m = 50$, более половины площади, ограниченной кривой, лежит вне упомянутых пределов, указывая на то, что отношение числа благоприятных случаев к числу всех возможных случаев должно с большей вероятностью находиться не внутри этих пределов, а вне их (т. е. за пределами 0,293 и 0,373). В случае же 100 испытаний площадь, лежащая вне этих границ, уже значительно меньше, т. е. отношение числа благоприятных случаев к числу всех возможных случаев с большей вероятностью должно находиться внутри заданных пределов, а не вне их. При 1000 испытаниях почти вся площадь лежит внутри этих границ, поэтому вероятность того, что отношение числа благоприятных событий к числу испытаний будет отличаться от $\frac{1}{3}$ больше чем на 0,04, очень мала. При дальнейшем увеличении m наступает в конце концов такой момент, когда вероятность получить рассматриваемое отношение, лежащее вне заданных пределов, будет меньше любой наперед заданной величины.

Таким образом, при увеличении m до бесконечности вероятность нахождения отношения n/m вне пределов $p - \epsilon$, $p + \epsilon$ стремится к нулю. Это пояснено на разобранном примере, когда $p = \frac{1}{3}$ и $\epsilon = 0,04$; однако, взяв любые другие числа, мы пришли бы к точно такому же выводу. Если взять, например, $\epsilon = 0,000001$, то вероятность того, что $\frac{n}{m}$ будет лежать внутри пределов $p - \epsilon$, $p + \epsilon$, оказывается чрезвычайно малой для 100 и даже для 1000 испытаний.

При дальнейшем увеличении числа испытаний эта вероятность будет возрастать, пока при большом количестве испытаний, скажем одном триллионе, она не станет почти достоверностью.

Указанное обстоятельство составляет основу теоремы Бернулли:

Если вероятность наступления какого-либо события в одном испытании равна p и если проведено несколько независимых испытаний, то вероятность того, что отношение числа благоприятных случаев к общему числу испытаний будет отличаться от p меньше, чем на наперед заданную сколь угодно малую величину, может быть сделана как угодно близкой к достоверности путем проведения достаточно большого числа испытаний.

В книге [2] эта теорема формулируется несколько иначе: «Если вероятность события равна p , то при неограниченном количестве испытаний отношение числа благоприятных случаев к числу всех возможных случаев непременно будет равно p ».

Распределение Пуассона. В книге [2] даются следующие два выражения для функции распределения Пуассона:

$$P_m(n) = C_m^n \left(\frac{\epsilon}{m}\right)^n \left(1 - \frac{\epsilon}{m}\right)^{m-n} \quad (6.9)$$

и

$$P_m(n) = \frac{m!}{n!(m-n)!} \left(\frac{\epsilon}{m}\right)^n \left(1 - \frac{\epsilon}{m}\right)^{m-n}, \quad (6.10)$$

где

$P_m(n)$ — вероятность того, что событие наступит точно n раз в m независимых испытаниях;

C_m^n — число сочетаний из m по n ;

ϵ — математическое ожидание величины n (числа положительных результатов), в случае биномиального закона равно mp ;

p — вероятность положительного результата в одном испытании;

m — число независимых испытаний.

Закон Пуассона¹ применим только к дискретным величинам. Он дает хорошее приближение к биномиальному закону в случаях, когда число испытаний очень велико, а вероятность p очень мала. В книге [2] указывается также, что уравнение (6.9) хорошо аппроксимируется выражением

$$P_m(n) = \frac{e^{-\epsilon} \epsilon^n}{n!}. \quad (6.11)$$

В таком виде обычно и применяется закон Пуассона. В книге [4] приведен график для уравнения (6.11), которое мы можем представить как

$$P_m(n) = \frac{e^{-mp} (mp)^n}{n!}. \quad (6.12)$$

Этот график показан на рис. 6.11; здесь только изменены обозначения, чтобы привести его в соответствие с уравнением (6.12).

Уравнение (6.12) дает достаточно хорошую точность при больших m и достаточно малых p , когда выполняется неравенство

$$mp \leq 5. \quad (6.13)$$

¹ Изложение закона Пуассона дается по книге [5].

Функция распределения частоты наступления событий по закону Пуассона, $(PPFF) n$

$$(PPFF) n = \frac{e^{-mp} (mp)^n}{n!},$$

где m — число событий или опытов;

p — вероятность наступления события при единичном опыте;

n — число благоприятных событий.

n	mp									
	0,2	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0			
0	0,81873	0,60653	0,36788	0,13535	0,049787	0,018322	0,006738			
1	0,16375	0,30304	0,36788	0,27067	0,14936	0,07329	0,03369			
2	0,016375	0,075826	0,18394	0,27067	0,22406	0,14652	0,084225			
3	0,0010916	0,012636	0,061314	0,18045	0,22406	0,19537	0,14042			
4	0,000054582	0,0015762	0,01533	0,090224	0,16803	0,19537	0,17547			
5		0,00015762	0,0030657	0,036090	0,10082	0,15629	0,17547			
6			0,00049021	0,012030	0,050410	0,10420	0,14622			
7				0,0034371	0,021604	0,05954	0,10445			
8				0,00085933	0,0081015	0,029770	0,065279			
9				0,00019095	0,0027001	0,013230	0,036266			
10					0,00081016	0,0052925	0,018133			
11					0,00022095	0,0019245	0,0082421			
12						0,0006415	0,0034342			
13						0,00019739	0,0013209			
14							0,00047176			

$(PPFF)$ выражает вероятность наступления события точно n раз при m независимых опытах; p есть вероятность наступления события при единичном опыте.

Таблица 6.2

**Интегральная функция распределения вероятностей
величины n по закону Пуассона, $(PPDF)n$**

$$(PPDF)n = \sum_{k=0}^n (PPDF)k$$

n	mp						
	0,2	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
0	0,81973	0,60653	0,36788	0,13535	0,04979	0,01832	0,00674
1	0,98248	0,90957	0,73576	0,40602	0,19915	0,09161	0,04043
2	0,99886	0,98540	0,91970	0,67669	0,42321	0,23813	0,12466
3	0,99995	0,99804	0,98101	0,85714	0,64727	0,43350	0,26508
4		0,99962	0,99634	0,94736	0,81530	0,62887	0,44055
5		0,99978	0,99941	0,98345	0,91612	0,78516	0,61602
6			0,99990	0,99548	0,96653	0,88936	0,76224
7				0,99892	0,98813	0,94890	0,86669
8				0,99978	0,99623	0,97867	0,93197
9				0,99997	0,99893	0,99190	0,96824
10					0,99974	0,99719	0,98637
11					0,99996	0,99911	0,99461
12						0,99975	0,99804
13						0,99995	0,99936
14							0,99983

$(PPDF)n$ выражает (в функции mp) вероятность того, что при m опытах число наступлений события будет находиться в пределах от 0 до n включительно.

В книге [4] функция распределения вероятностей по закону Пуассона (Poisson's Probability Distribution Function) для величины n определяется так:

$$(PPDF)n \equiv \sum_{k=0}^n P_m(k) \equiv \sum_{k=0}^n \frac{e^{-mp} (mp)^k}{k!} \quad (6.14)$$

Эта функция выражает вероятность того, что событие произойдет любое число раз от 0 до n включительно. В таблицах 6.1—6.3 приведены функции $P_m(n)$ (функция распределения частоты наступления событий по закону Пуассона)¹, $(PPDF)n$ (интегральная функция распределения вероятностей по закону Пуассона) и $1 - (PPDF)n$. На рис. 6.12 изображены $(PPDF)n$ и $1 - (PPDF)n$ в функции mp .

¹ Это не что иное, как функция плотности вероятности, или дифференциальная функция распределения. — Прим. перев.

Таблица 6.3

Единица минус функция распределения вероятностей
величины n по закону Пуассона

$[1 - (PPDF) n]$

n	mp						
	0,2	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
0	0,18127	0,39347	0,63212	0,86465	0,95021	0,98168	0,99326
1	0,01752	0,09043	0,26424	0,59398	0,80085	0,90839	0,95957
2	0,00114	0,01460	0,08030	0,32331	0,57679	0,76187	0,87534
3	0,00005	0,00196	0,01899	0,14286	0,35273	0,56650	0,73492
4		0,00038	0,00366	0,05264	0,18470	0,37113	0,55945
5		0,00022	0,00059	0,01655	0,08388	0,21484	0,38398
6			0,00010	0,00452	0,03347	0,11064	0,23776
7				0,00108	0,01187	0,05110	0,13331
8				0,00022	0,00377	0,02133	0,06803
9				0,00003	0,00107	0,00810	0,03176
10					0,00026	0,00281	0,01363
11					0,00004	0,00089	0,00539
12						0,00025	0,00196
13						0,00005	0,00064
14							0,00017

$[1 - (PPDF) n]$ выражает как функция mp вероятность того, что событие произойдет больше чем n раз.

Теперь подытожим все, что нам известно о законе Пуассона.

1. Уравнение

$$P_m(n) = \frac{e^{-mp} (mp)^n}{n!} \quad (6.12)$$

является приближенным выражением функции плотности вероятности по закону Пуассона¹.

Она показывает вероятность того, что некоторое событие наступит ровно n раз при m независимых опытах. Величина p есть вероятность наступления события при единичном опыте.

Это уравнение дает достаточно точный результат (и весьма близко приближается к биномиальному закону) в случаях, когда m велико, а p в то же время достаточно мало, так что выполняется неравенство $mp \leq 5$.

¹ В тексте — функция распределения частоты наступления события. — Прим. перев.

2. Уравнение

$$(PPDF)n = \sum_{k=0}^n \frac{e^{-mp} (mp)^k}{k!} \quad (6.14)$$

является интегральной функцией *распределения* вероятностей величины n по закону Пуассона. Как функция mp она показывает вероятность того, что число наступлений некоторого события будет лежать в пределах от 0 до n включительно.

3. Выражение $1 - (PPDF)n$, если также рассматривать его как функцию mp , определяет вероятность того, что событие произойдет больше чем n раз.

В книге [4] дается хороший пример использования закона Пуассона, который мы сейчас приведем.

Пример. Поверхность жизненно важных частей вражеского самолета, попадание в пределы которой приводит к его уничтожению, равна 3 кв. фута. Какова вероятность уничтожения самолета, если в среднем можно считать, что во время одной атаки одно попадание приходится на 15 кв. футов площади самолета? Какова должна быть плот-

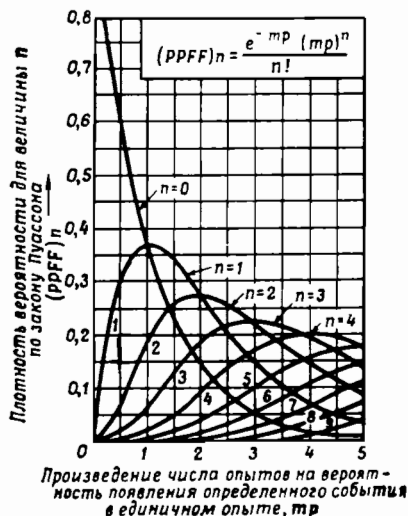


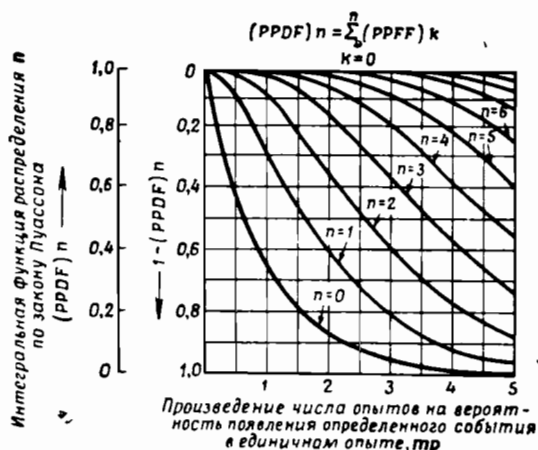
Рис. 6.11. Плотность вероятности для величины n по закону Пуассона.

ность попадания, чтобы вероятность уничтожения самолета была равна 50%? 90%?

Поскольку поверхность самолета, в которую необходимо попасть, равна 3 кв. фута и поскольку можно считать, что одно попадание приходится в среднем на 15 кв. футов, то средняя плотность попаданий, приходящихся на данную площадь, равна $\frac{3}{15} = 0,2$.

Для уничтожения самолета необходимо одно попадание; однако и при большем числе попаданий самолет будет также разрушен. Следовательно, надо найти вероятность одного или более попаданий (вероятность хотя бы одного попадания), т. е. вероятность того, что число попаданий будет больше нуля. Эта вероятность равна $1 - (PPDF)n$, причем в данном случае $n=0$, $mp=0,2$. Согласно таблице 6.3, вероятность разрушения в этом случае равна 0,18127.

Рассмотрим теперь условия, необходимые для обеспечения вероятности разрушения, равной 0,5 и 0,9. Согласно рис. 6.12, если $n=0$ и $1 - (PPDF)n = 0,5$, то $mp = 0,7$, т. е. если в среднем на 1 кв. фут приходится 0,7 попадания, то это дает 50%-ную вероятность уничтожения самолета. Точно так же при $n=0$ и $1 - (PPDF)n = 0,90$, $mp = 2,3$, или иначе 2,3 попадания на 1 кв. фут обеспечивает вероятность вывода из строя самолета, равную 90%.



Р и с. 6.12. Интегральная функция распределения n по закону Пуассона.

Нормальный закон распределения.

Определение. Пусть n — переменная, подчиняющаяся нормальному закону распределения. Среднее значение величины n определяется как

$$n_{av} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m n_i,$$

где

n_i — частое значение n ;

m — количество рассматриваемых частных значений.

Отклонение каждого частного значения n_i от среднего значения n_{av} равно $\delta = n_i - n_{av}$ и обозначается $\delta(n)$.

Средняя величина отклонения n определяется как среднее значение величин отклонений каждого частного значения:

$$(AD)_n = \text{сред. знач. } \delta.$$

Стандартное отклонение величины n определяется как среднее квадратическое (root-mean-square) отдельных отклонений n :

$$\sigma = \text{rms}(\delta) = \sqrt{\text{сред. знач. } (\delta)^2}.$$

В книге [2] дается выражение для нормального закона в виде

$$P_m(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{y^2}{2}}, \quad (6.15)$$

где

$$y = \frac{n - mp}{\sqrt{mp(1-p)}} = \frac{\delta}{\sigma};$$

m — число независимых опытов;

n — число благоприятных событий;

p — вероятность наступления события в единичном опыте;

$\sigma = n - mp$ — отклонение от ожидаемого числа благоприятных случаев;

σ — стандартное (среднее квадратическое) отклонение, $\sqrt{mp(1-p)} = \text{rms}(\delta) = \sqrt{\text{сред. знач. } \delta^2}$

$P_m(y)$ — вероятность δ/σ .

Основные свойства нормального закона распределения:

1. Он симметричен, т. е. вероятность появления как положительных, так и отрицательных отклонений, равных по абсолютной величине, одинакова.

2. Нормальный закон является непрерывной функцией, а не дискретной. Каждому определенному отклонению соответствует вполне определенная вероятность, без всяких исключений.

3. Имеется только одно наиболее вероятное значение, и оно совпадает с математическим ожиданием.

Несмотря на то, что большая группа опытных данных не обладает всеми тремя указанными свойствами, нормальный закон исключительно важен и применяется очень часто.

В книге [2] утверждается, что этот закон «является в известном смысле центральным пунктом в теории вероятностей».

В книге [4] мы встречаем наглядный и интересный подход к описанию и применению нормального закона. Этот подход изложен ниже с некоторыми изменениями в обозначениях.

Перепишем уравнение (6.15) в следующем виде:

$$P_m\left(\frac{\delta}{\sigma}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\delta}{\sigma}\right)^2}. \quad (6.16)$$

Это нормальный закон, выраженный непосредственно через отношение отклонения к стандартному отклонению. В книге [4] используются несколько видов функций нормального распределения¹. Первая из них — плотность вероятности по закону Пу-

¹ Этот вопрос излагается в основном по книге Draper, McKay and Lees, Instrument Engineering, vol. I, McGraw-Hill Book Co., Inc., 1952.

ассона; она определяется как

$$(NPFF) n = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\delta}{\sigma}\right)^2}. \quad (6.17)$$

Заметим, что левая часть этого уравнения в обозначениях, принятых в книге [4], читается как нормальная функция распределения частоты появления события n — *the Normal Probability*

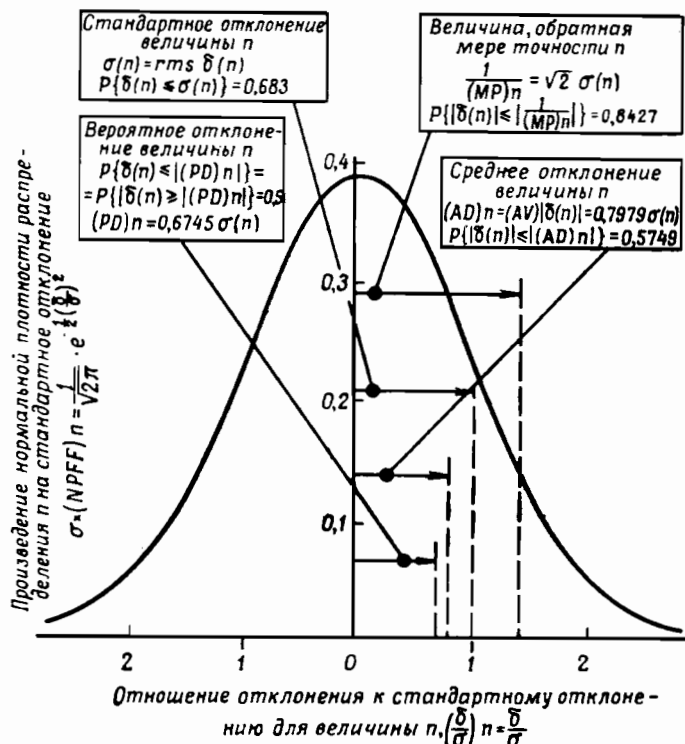


Рис. 6.13. Плотность вероятности величины n при нормальном распределении.

Frequency Function of n . Эта функция связана с нормальным законом, как видно из (6.16), следующим соотношением: $(NPFF) n$

есть просто $\frac{P_m\left(\frac{\delta}{\sigma}\right)}{\sigma}$, а правая часть уравнения (6.17) представляет собой просто правую часть уравнения (6.16), деленную на σ .

Графическое изображение уравнения (6.17) часто называют «колоколообразной кривой»; эта кривая представлена на рис. (6.13). Она изображает относительную частоту появления или

«плотность вероятности» любой переменной, которая подчиняется нормальному закону.

Рассмотрим рис. 6.13. Можно видеть, что:

1. Площадь, ограниченная сверху кривой $\sigma \times (NPFF)n$, а с боков — двумя любыми пределами, представляет собой вероятность того, что частное значение δ/σ будет находиться внутри этих пределов

$$\int_{\left(\frac{\delta}{\sigma}\right)_{\lim a}}^{\left(\frac{\delta}{\sigma}\right)_{\lim b}} \sigma \times (NPFF) n \cdot d\left(\frac{\delta}{\sigma}\right) = P\left\{\left(\frac{\delta}{\sigma}\right)_{\lim a} < \left(\frac{\delta}{\sigma}\right) < \left(\frac{\delta}{\sigma}\right)_{\lim b}\right\}. \quad (6.18)$$

Левая часть уравнения (6.18) является мерой площади, заштрихованной на рис. 6.13, а между пределами a и b . Необходимо помнить, что рис. 6.13, а является упрощенным изображением рис. 6.13, на котором абсциссой служит величина δ/σ , а ординатой $\sigma \times (NPFF)n$.

Правая часть уравнения (6.18) читается как вероятность того, что δ/σ — отношение действительного отклонения к стандартному отклонению — лежит между пределами a и b .

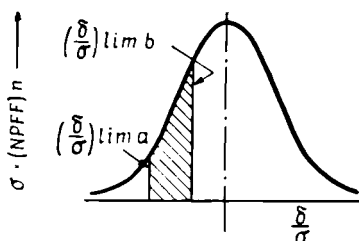
2. Суммарная площадь, лежащая ниже кривой $\sigma \times (NPFF)n$, равна единице. Вероятность нахождения величины δ/σ вне некоторых пределов равна единице минус вероятность нахождения ее внутри этих пределов. Это положение проиллюстрировано на рис. 6.13, б. Для пределов, показанных на рис. 6.13, б:

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\left(\frac{\delta}{\sigma}\right)_{\lim a}} \sigma \times (NPFF) n \cdot d\left(\frac{\delta}{\sigma}\right) + \int_{\left(\frac{\delta}{\sigma}\right)_{\lim b}}^{+\infty} \sigma \times (NPFF) n \cdot d\left(\frac{\delta}{\sigma}\right) = \\ = 1 - \int_{\left(\frac{\delta}{\sigma}\right)_{\lim a}}^{\left(\frac{\delta}{\sigma}\right)_{\lim b}} \sigma \times (NPFF) n \cdot d\left(\frac{\delta}{\sigma}\right). \end{aligned} \quad (6.19)$$

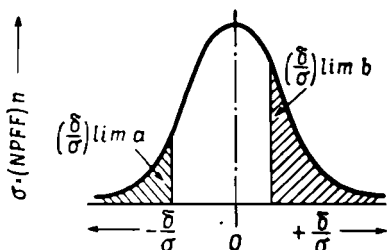
Правая часть уравнения (6.19) представляет собой также

$$P\left\{\begin{array}{l} \left(\frac{\delta}{\sigma}\right) < \left(\frac{\delta}{\sigma}\right)_{\lim a} \\ \text{или} \\ \left(\frac{\delta}{\sigma}\right) > \left(\frac{\delta}{\sigma}\right)_{\lim b} \end{array}\right\} = 1 - P\left\{\left(\frac{\delta}{\sigma}\right)_{\lim a} < \left(\frac{\delta}{\sigma}\right) < \left(\frac{\delta}{\sigma}\right)_{\lim b}\right\}. \quad (6.20)$$

Словами можно сформулировать выражение, стоящее в правой части уравнения (6.19), так: это есть вероятность того, что δ/σ будет меньше $(\delta/\sigma)_{\lim a}$ или больше $(\delta/\sigma)_{\lim b}$. Правая часть

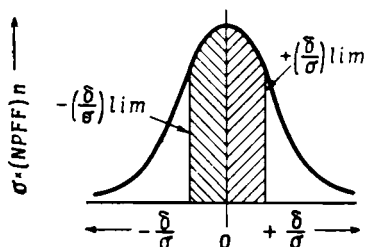


Р и с. 6.13, а.

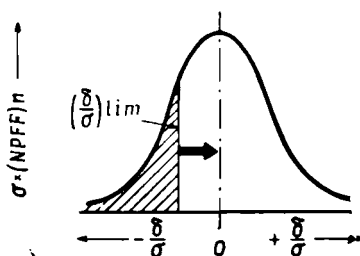


Р и с. 6.13, б.

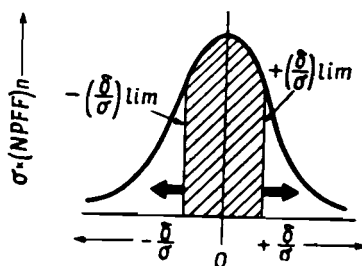
уравнения (6.20) читается как единица минус вероятность того, что δ/σ лежит между пределами a и b .



Р и с. 6.13, в.



Р и с. 6.13, г.



Р и с. 6.13, д.

3. Кривая $\sigma \times (NPFF)n$ симметрична, так что равные по абсолютной величине положительные и отрицательные отклонения ограничивают одинаковые площади с одинаковыми вероятностями (рис. 6.13, в).

Для пределов, показанных на рис. 6.13, в,

$$\int_{-(\frac{\delta}{\sigma})_{\lim}}^0 \sigma \times (NPFF) n \cdot d\left(\frac{\delta}{\sigma}\right) = \int_0^{+(\frac{\delta}{\sigma})_{\lim}} \sigma \times (NPFF) n \cdot d\left(\frac{\delta}{\sigma}\right) \quad (6.21)$$

$$= P\left\{-\left(\frac{\delta}{\sigma}\right)_{\lim} < \left(\frac{\delta}{\sigma}\right) < 0\right\} \quad (6.22)$$

$$= P\left\{0 < \left(\frac{\delta}{\sigma}\right) < +\left(\frac{\delta}{\sigma}\right)_{\lim}\right\}. \quad (6.23)$$

Правая часть уравнения (6.22) формулируется как вероятность того, что δ/σ лежит между $-(\delta/\sigma)_{\lim}$ и 0 (т. е. на заштрихованной площади слева от нуля).

Правая часть уравнения (6.23) формулируется как вероятность того, что δ/σ лежит между 0 и $+(\delta/\sigma)_{\lim}$ (т. е. на заштрихованной площади справа от нуля).

Заслуживают внимания два способа выбора пределов интегралов функции $\sigma \times (NPFF)n$, которым ввиду их важности даны наименования: *нормальная функция распределения вероятностей* (Normal Probability Distribution Function) и *нормальная функция распределения модуля величины* (Normal Magnitude Probability Function).

Нормальная функция распределения вероятностей величины n определяется как вероятность того, что некоторая величина $(\delta/\sigma)n$ будет находиться в пределах от $-\infty$ до $(\delta/\sigma)_{\lim}$ (рис. 6.13, з)

$$\begin{aligned} (NPDF)n &\equiv P\left\{-\infty < \left(\frac{\delta}{\sigma}\right) < \left(\frac{\delta}{\sigma}\right)_{\lim}\right\} \\ &= \int_{-\infty}^{(\frac{\delta}{\sigma})_{\lim}} \sigma \times (NPFF) n \cdot d\left(\frac{\delta}{\sigma}\right). \end{aligned} \quad (6.24)$$

Словами это уравнение формулируется так: нормальная функция распределения величины n , по определению, равна вероятности того, что δ/σ находится между $-\infty$ и $(\delta/\sigma)_{\lim}$ (т. е. лежит в пределах заштрихованной части рис. 6.13, з) и равна интегралу $\sigma \times (NPFF)n$ в пределах $-\infty$ и $(\delta/\sigma)_{\lim}$ (т. е. она равна площади заштрихованной части рис. 6.13, з).

Заметим, что $(NPDF)n$ является функцией верхнего предела $(\delta/\sigma)_{\lim}$, если этот предел может изменяться от $-\infty$ до $+\infty$. Функция $(NPFF)n$ может быть также выражена в виде функции любого из трех нижеперечисленных пределов:

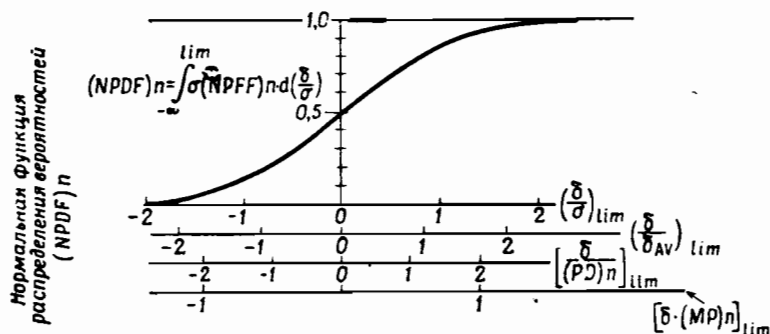
1. $(\delta/\delta_{av})_{\lim}$ — предела отношения отклонения величины к среднему отклонению.

2. $\delta/\delta_{\text{проб}}$ — предела отношения отклонения к вероятному отклонению.

3. $[\delta \cdot (MP)n]_{\text{lim}}$ — предела произведения отклонения на меру точности величины n .

Упомянутые выше пределы требуют некоторых дополнительных определений, которые мы здесь и приведем:

Отклонение величины n , равное $\delta(n) = \delta = n - m_p$, есть разность между каким-то конкретным значением n и ожидаемой величины n .



Р и с. 6.14.

Среднее отклонение n есть среднее значение отклонений δ .

Мера точности величины $n = \frac{1}{\sigma \sqrt{2}}$.

График функции $(NPDF)n$ приведен на рис. 6.14.

Нормальная функция распределения модуля (абсолютного значения) величины по определению равна вероятности того, что δ/σ по абсолютной величине будет меньше, чем $(\delta/\sigma)_{\text{lim}}$. Она представляет собой также вероятность того, что δ/σ лежит между $-(\delta/\sigma)_{\text{lim}}$ и $+(\delta/\sigma)_{\text{lim}}$ (рис. 6.13, δ ; здесь численные значения обоих пределов одинаковы). Для пределов, отмеченных на рис. 6.13, δ ,

$$\begin{aligned}
 (NMPF)n &\equiv P\left\{\left|\frac{\delta}{\sigma}\right| < \left|\left(\frac{\delta}{\sigma}\right)_{\text{lim}}\right|\right\} \\
 &= P\left\{-\left(\frac{\delta}{\sigma}\right)_{\text{lim}} < \left(\frac{\delta}{\sigma}\right) < +\left(\frac{\delta}{\sigma}\right)_{\text{lim}}\right\} \\
 &\quad + \left(\frac{\delta}{\sigma}\right)_{\text{lim}} \\
 &= \int_{-\left(\frac{\delta}{\sigma}\right)_{\text{lim}}}^{+\left(\frac{\delta}{\sigma}\right)_{\text{lim}}} \sigma \times (NPDF)n \cdot d\left(\frac{\delta}{\sigma}\right). \quad (6.25)
 \end{aligned}$$

Таблица 6.4

Наименование	Обозначение	Биномальный закон	Закон Пуассона	Нормальный закон
Количество опытов	m	m — малое целое число	m — большое целое число (обычно неизвестное)	m становится неограниченным числом бесконечно малых приращений
Единичная вероятность	p	$p = \frac{1}{\text{малое целое число}}$	$p \rightarrow 0$ $mp \rightarrow \text{const}$	Не определяется
Переменная	n	$n = 0, 1, 2, \dots, m$ (целые числа)	$n = 0, 1, 2, \dots, m$ (целые числа)	$-\infty < n < +\infty$ (непрерывная величина)
Среднее значение	$(av) n$	$(av) n = mp$	$(av) n = mp$	Рассчитывается по данным опытов
Стандартное отклонение	σ	$\sigma = \sqrt{mp(1-p)}$	$\sigma = \sqrt{mp(1-p)} \approx \sqrt{mp}$	
Пределы применимости		$m \leq 20$	Используется как приближение к биномальному закону, когда $mp \leq 5$ $m > 20$	Используется как приближение к биномальному закону, когда $mp > 5$ $m > 20$

Уравнение (6.25) читается так: согласно определению, нормальная функция распределения модуля величины равна вероятности того, что δ/σ меньше численного (абсолютного) значения величины $(\delta/\sigma)_{lim}$. Она представляет собой также вероятность того, что δ/σ лежит между $-(\delta/\sigma)_{lim}$ и $+(\delta/\sigma)_{lim}$, т. е. находится в пределах заштрихованной площади на рис. 6.13, д. Площадь (а следовательно, вероятность) определяется интегралом. Можно показать, что

$$(NPDF) n = \frac{1}{2} [1 \pm (NMPF) n], \quad (6.26)$$

где $+$ или $-$ выбирается в соответствии с положительным или отрицательным значением отклонения.

Нормальная функция распределения модуля переменной n показана на рис. 6.15.

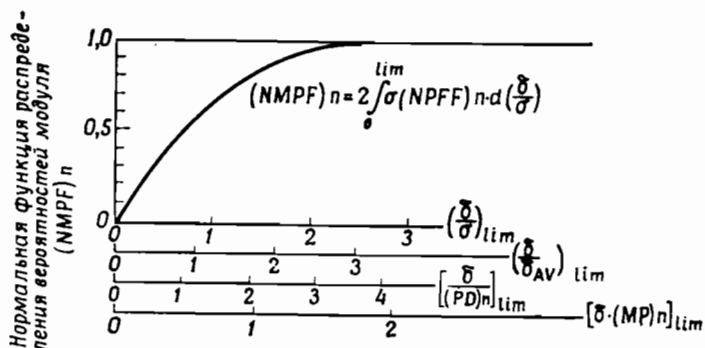


Рис. 6.15.

В таблице 6.4 дается сравнение трех законов распределения вероятностей. Эта таблица взята из книги [4], изменены лишь обозначения.

6.7. Нормальное распределение применительно к одному, двум и трем измерениям

Применение теории вероятностей для решения военных задач в большинстве случаев состоит в анализе ошибок, относящихся не к одному измерению, а к двум или трем. Например, область попаданий баллистического управляемого снаряда класса «земля — земля» характеризуется двумя измерениями (двумя переменными): отклонениями по дальности и по направлению.

Часто для упрощения область попаданий снарядов представляют в виде круга и характеризуют круговой вероятной ошибкой. В действительности же отклонения по дальности всегда отличаются от боковых отклонений, поэтому область попаданий на самом деле представляет собой эллипс и должна именно в таком виде анализироваться, если хотят избежать серьезных ошибок. Аналогично область разрывов зенитного снаряда часто будет иметь форму эллипсона и в таком виде должна анализироваться.

Математические основы применения нормального распределения к анализу одной случайной величины (измерения) или систем из двух или трех случайных величин очень хорошо изложены в статье, озаглавленной «Заметки о параметрах нормального распределения», подготовленной к печати отделением прикладной математики Национального исследовательского комитета по оборонным мероприятиям. Ниже дается изложение этой статьи с небольшими редакционными изменениями.

ВВЕДЕНИЕ

Данная статья предназначена не для лиц, специально занимающихся математической статистикой, а для тех, кому приходится иметь дело с применением некоторых ее положений к решению военных проблем.

Поскольку под такими проблемами понимаются главным образом вопросы точности ведения огня (в том числе точности бомбометания), то в статье речь будет идти о распределении *ошибок*.

Рассмотрим простой опыт — положим, измерение диаметра снаряда. Практически такой опыт можно проделать ограниченное число раз, скажем, n раз. Эти n опытов образуют выборку в отличие от *генеральной совокупности*, получающейся при бесконечно большом количестве опытов, которые можно представить себе происходящими при тех же условиях, что и опыты, осуществляемые при выборке. Говоря о различных параметрах, характеризующих распределение ошибок, следует делать различие между характеристиками, получаемыми на основе выборки (эмпирическими характеристиками), и характеристиками генеральной совокупности (статистическими характеристиками). Так, среднее значение величины, получаемое на основе рассмотрения генеральной совокупности (в предположении, что устранены всякие причины, которые могут повлиять на результаты измерений), является истинным диаметром снаряда; в то же время ясно, что нет никаких надежд на то, что среднее значение, полученное на основании выборочных измерений, будет в точности равно истинному диаметру. Кроме того, при теоретическом исследовании проблем, связанных с рассмотрением ошибок, обычно оперируют характеристиками генеральной совокупности, тогда как ясно, что все данные, получаемые из эксперимента, представляют собой характеристики выборки.

Таким образом, необходимо знать, как использовать данные, полученные в результате выборки, для возможно более точной оценки параметров той генеральной совокупности, из которой эта выборка сделана.

СЛУЧАЙ ОДНОЙ ПЕРЕМЕННОЙ (ОДНОГО ИЗМЕРЕНИЯ)

Если при проведении опытов, о которых идет речь, производится изучение одной переменной x (это может быть одна координата точки разрыва снаряда или координата точки падения бомбы), то утверждение, что функция распределения генеральной совокупности переменной x есть $p(x)$, означает: «если провести опыт, то вероятность того, что величина x будет находиться в пределах от x до $x + dx$, равна $p(x)dx$ ».

В свою очередь это значит, что если повторить опыт n раз (причем n очень велико), то число опытов, в которых величина x лежит между x и $x + dx$, будет приближенно равна $np(x)dx$.

А. Нормальное распределение одной переменной. Графики таких функций распределения $p(x)$ в действительности могут сильно отличаться друг от друга. Однако на основании данных, полученных опытным путем, часто оказывается возможным допустить, что переменная x в данных условиях является *нормально распределенной* или что она подчиняется закону распределения Гаусса¹; иными словами, предполагают, что

$$p(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma^2} (x - a)^2 \right\}. \quad (6.27)$$

В этом законе распределения

- a — математическое ожидание;
- $(x - a)$ — ошибка;
- $|x - a|$ — абсолютная ошибка;
- σ — стандартная ошибка или стандартное отклонение;
- σ^2 — дисперсия.

Если $y(x)$ есть некоторая функция x , то ожидаемое значение величины y определяется как

$$E[y(x)] \equiv \int_{-\infty}^{+\infty} y(x) p(x) dx. \quad (6.28)$$

Если в частном случае $y(x)$ есть просто x , то $E(x) = a$, т. е. равно математическому ожиданию величины x .

На основании этого определения ожидаемой величины *математическое ожидание абсолютной ошибки*² определяется как ожидаемое значение абсолютной ошибки

$$\text{м. а. е.} \equiv E(|x - a|). \quad (6.29)$$

Величина математического ожидания абсолютной ошибки находится как

$$\text{м. а. е.} = \sigma \sqrt{\frac{2}{\pi}} = 0,7979\sigma. \quad (6.30)$$

¹ Даже если сама переменная в генеральной совокупности не является нормально распределенной, ряд важных количественных характеристик (например, среднее значение выборки, взятой из этой генеральной совокупности) часто имеет распределение, близкое к нормальному. Этот факт лишь раз показывает важность нормального закона.

² Математическое ожидание абсолютной ошибки *м. а. е.* (mean absolute error) иногда неверно обозначают *м. е.* — mean error, т. е. срединная ошибка. Это название неудачно, поскольку термин «срединная ошибка» широко применяется (особенно в Европе и преимущественно в астрономии) к понятию средней квадратической ошибки.

Ожидаемое значение квадрата ошибки подсчитывается по формуле

$$E[(x-a)^2] = \sigma^2, \quad (6.31)$$

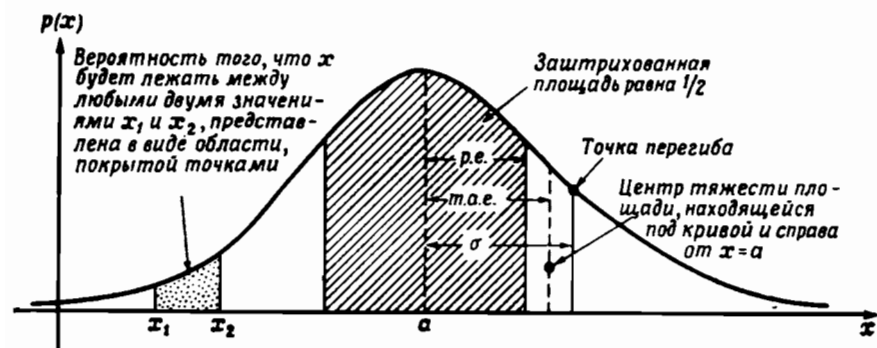
и в этом смысле стандартная ошибка, находящаяся для генеральной совокупности, может рассматриваться как *средняя квадратическая ошибка*. *Вероятная ошибка* (probable error — р. е.) определяется как

$$\int_{a-p.e.}^{a+p.e.} p(x) dx = \frac{1}{2}. \quad (6.32)$$

Численное значение вероятной ошибки равно

$$p.e. = 0,6745\sigma. \quad (6.33)$$

Статистические характеристики, определенные выше, графически представлены на рис. 6.16.



Р и с. 6.16.

Уравнение (6.27) иногда удобно переписать в виде

$$p(x) = \frac{h}{\sqrt{\pi}} \exp \{-h^2(x-a)^2\}, \quad (6.34)$$

где h называется мерой точности, а соотношение между h и σ дается выражением

$$h = \frac{1}{\sigma \sqrt{2}} = \frac{0,7071}{\sigma}. \quad (6.35)$$

Б. Выборка: n независимых наблюдений $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ одной переменной. Допустим, что проведено n независимых наблюдений переменной x , причем предполагается, что она имеет закон распределения, выражаемый уравнением (6.27). Эта серия наблюдений носит название *выборки*.

Среднее значение выборки $\bar{x}$ определяется как ¹

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}. \quad (6.36)$$

Эмпирическая дисперсия обозначается s^2 , а эмпирическое стандартное отклонение или эмпирическая стандартная ошибка выражается как $s = \sqrt{s^2}$, где

$$s^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1} = \frac{\sum x_i^2 - n\bar{x}^2}{n-1}. \quad (6.37)$$

Если известно математическое ожидание a генеральной совокупности, то наилучшая оценка σ^2 получается из выражения

$$s^2 = \frac{\sum (x_i - a)^2}{n} = \frac{\sum x_i^2}{n} - a^2. \quad (6.38)$$

(Это замечание не имеет, однако, большого практического значения, поскольку в действительности обычно величина a неизвестна.)

Для тех, кто недостаточно знаком с математической статистикой, может показаться странным, что в знаменателе уравнения (6.37) стоит выражение $n-1$ вместо кажущегося более естественным знаменателя n , как в уравнении (6.38). Однако следует помнить, что $\bar{x} \neq a$ и что

$$\sum (x_i - a)^2 > \sum (x_i - \bar{x})^2.$$

В действительности знаменатель $n-1$ в уравнении (6.37) как раз гарантирует, что ожидаемая величина s^2 равна σ^2 , так что уравнение (6.37) дает лучшую оценку σ^2 , даже если $\bar{x}$ не равно a .

Эмпирическая медиана $\tilde{x}$ в случае n нечетного представляет собой число, находящееся посередине ряда чисел $x_1, x_2, \dots, x_n$, расположенных в порядке возрастания. Когда n — четное число, медиана определяется как среднее из двух чисел, находящихся посередине.

Среднее значение абсолютной ошибки выборки равно

$$\frac{\sum |x_i - \bar{x}|}{n}. \quad (6.39)$$

Эмпирическое среднее значение абсолютного отклонения от медианы определяется как

$$\frac{\sum |x_i - \tilde{x}|}{n}; \quad (6.40)$$

¹ Для простоты мы опускаем пределы суммирования у знака Σ , подразумевая, что суммирование производится от $i=1$ до $i=n$.

оно меньше, чем среднее значение абсолютного отклонения от любой другой величины.

Размахом варьирования (или широтой распределения выборки) называется разность между наибольшим и наименьшим наблюдаемыми значениями.

В. Оценка параметров генеральной совокупности (статистических характеристик) по характеристикам выборки. Рассмотрим выборку $x_1, x_2, \dots, x_n$, взятую из генеральной совокупности, в которой величина x распределена в соответствии с нормальным законом [уравнение (6.27)]. Основной проблемой является проблема получения «наилучшей» оценки статистических характеристик, таких, как a и σ , по эмпирическим характеристикам, полученным из выборки.

Под «наилучшим» методом оценки статистических характеристик понимается, грубо говоря, такой метод расчета какого-то числа из выборки, который, будучи применен к большому количеству выборок такого же размера и взятых из той же генеральной совокупности, дает ряд чисел, группирующихся вокруг действительного значения параметра более близко, чем при любом другом методе расчета.

Наилучшей оценкой математического ожидания a генеральной совокупности является $\bar{x}$.

Наилучшей оценкой стандартной ошибки σ является величина s , определяемая из уравнения (6.37).

Наилучшей оценкой среднего значения абсолютной ошибки генеральной совокупности (т. а. е.) является 0,7979 s .

Наилучшей оценкой вероятной ошибки генеральной совокупности (р. е.) является 0,6745 s .

Для оценки математического ожидания a генеральной совокупности можно использовать *эмпирическую медиану* $\tilde{x}$, хотя эффективность этой оценки составляет лишь 64% от эффективности среднего арифметического $\bar{x}$. Грубо говоря, это означает, что величина $\tilde{x}$, подсчитанная для выборки из 64 наблюдений, дает такую же хорошую оценку a , что и величина $\bar{x}$, подсчитанная для выборки из 100 наблюдений.

Величина эмпирического среднего значения абсолютной ошибки, умноженная на 1,2533, может быть использована для оценки стандартной ошибки генеральной совокупности σ , хотя эффективность такой оценки составляет около 88% от эффективности s .

Такой способ можно, по-видимому, применять только в некоторых особых случаях, когда известно среднее значение абсолютной ошибки, но величины $x_1, x_2, \dots, x_n$, составляющие выборку, неизвестны, и неизвестно также s .

Стандартное отклонение генеральной совокупности σ можно найти из размаха варьирования путем умножения этой величины

на один из множителей, приведенных в нижеследующей таблице. Каждый из множителей соответствует числу наблюдений n в выборке.

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Множитель	0,887	0,591	0,486	0,430	0,395	0,370	0,351	0,337	0,325

Размах варьирования не обладает, однако, такой эффективностью для оценки σ , как s . Однако при малых n эта потеря эффективности незначительна.

Г. Численные соотношения между параметрами нормального распределения. Ниже приводятся соотношения между математическим ожиданием абсолютной ошибки (м. а. е.), стандартной ошибкой σ и вероятной ошибкой (р. е.) для нормально распределенной генеральной совокупности.

Те же самые множители должны использоваться и в случаях, когда параметры заменяются их оценками из выборки:

$$\text{м. а. е.} = 0,7979\sigma = 1,1829 \text{ р. е.}$$

$$\sigma = 1,2533 \text{ м. а. е.} = 1,4826 \text{ р. е.}$$

$$\text{р. е.} = 0,6745\sigma = 0,8453 \text{ м. а. е.}$$

Или в приближенном виде

$$\text{м. а. е.} = \frac{4}{5}\sigma = \frac{6}{5} \text{ р. е.}$$

$$\sigma = \frac{5}{4} \text{ м. а. е.} = \frac{3}{2} \text{ р. е.}$$

$$\text{р. е.} = \frac{2}{3}\sigma = \frac{5}{6} \text{ м. а. е.}$$

Д. Вероятность ошибки, равной или меньшей чем k (м. а. е.), k (р. е.) или $k\sigma$. Часто бывает желательно знать вероятность того, что абсолютная ошибка не превзойдет данной величины, которая выражается как увеличенная в k раз вероятная или стандартная ошибка или же умноженное на k математическое ожидание абсолютной ошибки, причем каждая из этих ошибок представляет собой статистическую характеристику. Таким образом, можно спросить, какова вероятность того, что абсолютная ошибка не превысит в 2 раза вероятную ошибку (т. е. $k = 2$)?

Приводимая ниже таблица показывает вероятность того, что абсолютная ошибка будет не больше чем k (р. е.), k (м. а. е.) и $k\sigma$ для $k = 1, 2, 3, 4$.

Вероятность, что абсолютная ошибка

k	$\leq k$ (р. е.)	$\leq k$ (м. а. е.)	$\leq k\sigma$
1	0,500	0,575	0,683
2	0,823	0,889	0,955
3	0,957	0,983	0,997
4	0,993	0,999	0,9998

СЛУЧАЙ ДВУХ ПЕРЕМЕННЫХ (ДВУХ ИЗМЕРЕНИЙ)

Рассмотрим событие, для описания которого требуется не одна, а две переменных, например бомбардировку цели; после сбрасывания бомбы мы можем определить ее точку падения двумя координатами x и y , где x можно рассматривать как расстояние от цели до точки падения, измеренное вдоль направления полета (ошибка по дальности), а y — как расстояние от цели до точки падения по перпендикуляру к направлению полета (ошибка по направлению). Этот случай представлен на рис. 6.17.

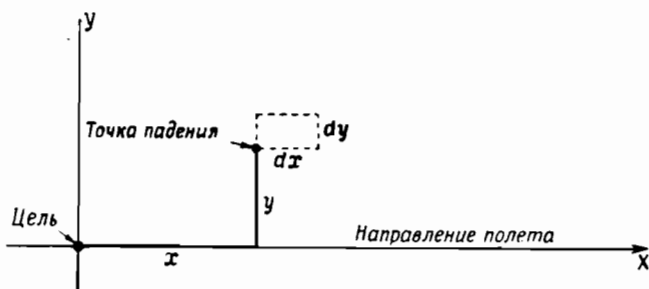


Рис. 6.17. Нормальная функция распределения величины n .

Если предположить, что одновременно сброшено неограниченное количество бомб при одних и тех же условиях, то можно построить «полигон распределения», или «область распределения» точек падения, которую можно характеризовать функцией распределения $p(x, y)$ от двух переменных x и y .

Этот вероятностный закон означает, что «если сбросить бомбу при данных условиях, то вероятность того, что она попадет в прямоугольник (обозначенный пунктиром на рис. 6.17), координата которого x будет находиться между x и $x + dx$, а координата y между y и $y + dy$, будет равна $p(x, y) dx dy$ ». В свою очередь это означает, что если сбросить большое количество бомб n , то ожидаемая часть бомб, которая попадет в пунктирный прямоугольник, будет равна $np(x, y) dx dy$.

А. Двумерный нормальный закон распределения. Эллипс рассеивания. Одним из наиболее важных и наиболее употребитель-

ных двумерных законов распределения и одним из законов, который часто может применяться в различных целях для рассматриваемых условий, является *двумерный нормальный закон распределения Гаусса*¹:

$$p(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma_x^2}(x-a)^2 - \frac{1}{2\sigma_y^2}(y-b)^2 \right\}. \quad (6.41)$$

В этом законе распределения

- a — математическое ожидание переменной x ;
 $(x-a)$ — ошибка x ;
 $|x-a|$ — абсолютная ошибка x ;
 σ_x — стандартная ошибка, или стандартное отклонение x ;
 σ_x^2 — дисперсия x .

Аналогичные термины употребляются и для количественных характеристик переменной y : b , $(y-b)$, $|y-b|$, σ_y и σ_y^2 .

Ожидаемое значение любой функции $f(x, y)$ двух переменных x и y определяется как

$$E[f(x, y)] = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) p(x, y) dx dy. \quad (6.42)$$

Если заменить $f(x, y)$ на x , $|x-a|$, $(x-a)^2$, то получим, как и в случае одной переменной,

$$E(x) = a,$$

$$E(|x-a|) = \sigma_x \sqrt{\frac{2}{\pi}} = m. a. e. x,$$

$$E[(x-a)^2] = \sigma_x^2.$$

¹ Данное выражение не является наиболее общим выражением для двумерного нормального закона распределения Гаусса, но для наших целей оно имеет достаточно общий вид. В данном случае переменные x и y статистически независимы. В более общем случае

$$p(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-\rho^2}} \exp \times \\ \times \left\{ -\frac{1}{2(1-\rho^2)} \left[\frac{(x-a)^2}{\sigma_x^2} + \frac{(y-b)^2}{\sigma_y^2} - 2\rho \frac{(x-a)(y-b)}{\sigma_x\sigma_y} \right] \right\},$$

где ρ — коэффициент корреляции между переменными x и y , определяется из выборки путем подсчета эмпирической корреляции r_{xy} .

$$r_{xy} = \frac{\sum (x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sqrt{\sum (x-\bar{x})^2 \sum (y-\bar{y})^2}} = \frac{\sum xy - n\bar{x}\bar{y}}{\sqrt{(\sum x^2 - n\bar{x}^2)(\sum y^2 - n\bar{y}^2)}}.$$

Аналогичные операции можно произвести и для переменной y .

Из предыдущих рассуждений ясно, что, рассматривая каждую из переменных x и y в отдельности, мы, попросту говоря, имеем дело со случаем одной переменной, рассмотренным ранее.

В самом деле, $p(x, y)dx dy$ можно записать в виде

$$\frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma_x^2} (x-a)^2 \right\} dx \cdot \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma_y^2} (y-b)^2 \right\} dy$$

и рассматривать как вероятность нахождения переменной x в интервале от x до $x + dx$, умноженную на вероятность нахождения переменной y в интервале от y до $y + dy$. Подобный способ выражения вероятности и такая интерпретация возможны лишь благодаря тому обстоятельству, что мы имеем здесь дело только со случаем, когда переменные x и y статистически независимы.

Однако при совместном рассмотрении переменных x и y возникает ряд вопросов, из которых наибольший интерес представляют следующие:

1) Какова вероятность, что точка (падения бомбы) будет находиться в какой-либо особой области, например внутри прямоугольника, эллипса и т. д., находящейся в плоскости xy ?

2) Какой величины необходимо выбрать прямоугольник (эллипс и т. п.) из данной серии, чтобы обеспечить заданную вероятность попадания точки в такую область?

Вероятность попадания точки внутри данной области R находится путем интегрирования $p(x, y)$ по данной области R . В частности, если область R представляет собой прямоугольник, для которого $x_1 < x < x_2$ и $y_1 < y < y_2$, то вероятность попадания точки в область R определяется путем умножения вероятности $x_1 < x < x_2$ на вероятность $y_1 < y < y_2$.

Это свойство произведения, как было только что отмечено выше, является следствием *статистической независимости* переменных в законе распределения (уравнение 6.41).

Следует заметить, что закон изменения вероятности $p(x, y)$ остается постоянным для любого эллипса вида

$$\frac{(x-a)^2}{\sigma_x^2} + \frac{(y-b)^2}{\sigma_y^2} = C^2. \quad (6.43)$$

Центром этого эллипса является точка с координатами (a, b) , а полуоси его $C\sigma_x$ и $C\sigma_y$.

Если цель находится в начале координат, то координаты (a, b) определяют ошибку между точкой прицеливания и центром эллипса рассеивания.

Чем больше величина C^2 (а следовательно, чем больше эллипс), тем меньше величина $p(x, y)$. Выбирая все возможные значения C^2 от 0 до ∞ , мы получим «семейство» эллипсов,

центры которых будут находиться в точке (a, b) , а отношение между осями будет равно $\sigma_x : \sigma_y$, как показано на рис. 6.18.

Все это означает, что плотность вероятности имеет наибольшую величину в точке (a, b) , и если брать точки все дальше и дальше от (a, b) , то вероятность уменьшается, причем так, что линии равных плотностей вероятности представляют собой эллипсы.

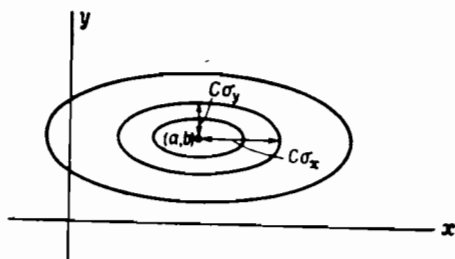


Рис. 6.18. Нормальная функция распределения абсолютной величины λ .

Нетрудно показать, что вероятность попадания точки внутрь эллипса, описываемого уравнением (6.43), будет равна

$$\int_0^C t \exp \left\{ -\frac{1}{2} t^2 \right\} dt = 1 - \exp \left\{ -\frac{1}{2} C^2 \right\}. \quad (6.44)$$

Величина C , для которой эта вероятность будет равна $1/2$, составляет 1,1774.

Таким образом, эллипс 50%-ного рассеивания будет

$$\frac{(x-a)^2}{\sigma_x^2} + \frac{(y-b)^2}{\sigma_y^2} = (1,1774)^2, \quad (6.45)$$

координаты центра этого эллипса равны a и b , а полуоси равны $1,1774 \sigma_x$ и $1,1774 \sigma_y$.

Приведем числовые значения C , соответствующие h %-ному эллипсу рассеивания для определенных, наиболее употребительных значений h :

h	C
25	0,7885
50	1,177
75	1,665
90	2,146
95	2,448
99	3,035

Б. Двумерный нормальный закон распределения. Случай кругового рассеивания. Часто случается, например при бомбометании с больших высот, что ошибки в x и y примерно равны,

так что упомянутый выше закон распределения переменных x и y можно приближенно описать *круговым законом распределения Гаусса*:

$$p(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma^2} [(x-a)^2 + (y-b)^2] \right\}. \quad (6.46)$$

Этот закон является частным случаем уравнения (6.41) при $\sigma_x^2 = \sigma_y^2 = \sigma^2$. Линии равных плотностей вероятности представляют собой теперь уже не эллипсы, а окружности.

Поскольку $p(x, y)$, выражаемая уравнением (6.46), совершенно симметрична относительно точки (a, b) , то при решении определенных задач естественно заменить прямоугольные координаты x и y расстоянием r по радиусу от точки (a, b) до (x, y) :

$$r = \sqrt{(x-a)^2 + (y-b)^2}.$$

С учетом этого закон распределения (6.46) можно представить в виде

$$p(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp \left\{ -\frac{r^2}{2\sigma^2} \right\}. \quad (6.47)$$

Этот закон следует понимать так: если провести опыт, то вероятность того, что расстояние от точки (a, b) до опытной точки будет лежать в пределах от r до $r + dr$, будет равна $p(r)dr$.

Круг 50%-ной вероятности (50%-ного рассеивания) определяется как

$$(x-a)^2 + (y-b)^2 = (1,1774\sigma)^2; \quad (6.48)$$

центр его находится в точке (a, b) , а радиус $r = 1,1774\sigma$. Этот круг с центром, находящимся в центре группирования, включает в себя половину общей вероятности.

Круговая вероятная ошибка (circular probable error — с.р.е.)[†] определяется как радиус круга 50%-ного рассеивания и находится из выражения

$$\text{с. р. е.} = 1,1774\sigma. \quad (6.49)$$

Диаметр δ окружности с центром (a, b) , которая содержит 75% наблюдений, иногда (главным образом в ВВС США) определяется как *дисперсия*.

Величина этого диаметра равна

$$\delta = 3,330\sigma. \quad (6.50)$$

Математическое ожидание круговой ошибки (mean radial error — m.r.e.) при нормальном круговом законе распределения

[†] Иногда она обозначается с.е.р.

определяется как ожидаемая величина расстояния от центра распределения (центра группирования) до любой точки в плоскости xy , т. е. $E\sqrt{(x-a)^2 + (y-b)^2}$. Оказывается, что она равна

$$\text{т. г. е.} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sigma = 1,2533\sigma. \quad (6.51)$$

Заметим, что в случае одной переменной σ представляла собой квадратный корень из ожидаемой величины квадрата ошибки. Здесь σ также есть квадратный корень из ожидаемой величины квадрата x или y , однако в рассматриваемом случае симметричного двумерного распределения σ не является квадратным корнем из ожидаемой величины квадрата круговой ошибки.

В самом деле,

$$E(r^2) = 2\sigma^2,$$

так что

$$\sqrt{E(r^2)} = \sigma\sqrt{2}.$$

Между величинами σ , с. р. е. и т. г. е. существуют следующие соотношения:

$$\sigma = 0,8493 \text{ с. р. е.} = 0,7979 \text{ т. г. е.}$$

$$1,1774\sigma = \text{с. р. е.} = 0,9394 \text{ т. г. е.}$$

$$1,2533\sigma = 1,0645 \text{ с. р. е.} = \text{т. г. е.}$$

Радиусы окружностей $h\%$ -ного рассеивания для нескольких наиболее употребительных значений h даны в следующей таблице

h	Радиус		
	σ	с. р. е.	т. г. е.
25	0,7585	0,6442	0,6052
50	1,177	1,000	0,9394
75	1,665	1,414	1,329
90	2,146	1,823	1,712
95	2,448	2,079	1,953
99	3,035	2,578	2,421

В. Выборка: n независимых пар наблюдений $(x_1, y_1; x_2, y_2; \dots; x_n, y_n)$ двух переменных x и y . Если проделать n независимых наблюдений двух переменных, то получим n пар: $x_1, y_1; x_2, y_2; \dots; x_n, y_n$. Эта серия наблюдений называется *выборкой* двух переменных x и y .

Проблема оценки в случае эллиптического распределения

Предположим, что выборка произведена из генеральной совокупности, имеющей распределение согласно уравнению (6.41).

Наилучшей оценкой a и σ_x^2 являются $\bar{x}$ и s_x^2 , где $\bar{x}$ определяется уравнением (6.36), а s_x^2 находится точно так же, как и s^2 из уравнения (6.37).

Наилучшей оценкой b и σ_y^2 являются $\bar{y}$ и s_y^2 , которые определяются аналогично из $y_1, y_2, \dots, y_n$.

Все характеристики выборки, определенные для случая одной переменной, можно, очевидно, применить по отдельности к каждой из переменных для случая выборки двух переменных.

Наилучшей оценкой уравнения эллипса 50%-ного рассеивания является

$$\frac{(x - \bar{x})^2}{s_x^2} + \frac{(y - \bar{y})^2}{s_y^2} = 1,1774^2. \quad (6.52)$$

Другой оценкой этого уравнения (правда, менее эффективной) является то же уравнение, в котором s_x заменена величиной $1,2533 \frac{(\sum |x_i - \bar{x}|)^2}{n}$, а s_y — аналогичной величиной, но выраженной через переменную y .

Проблема оценки для случая кругового распределения

Если выборка производится из генеральной совокупности, имеющей круговой нормальный закон распределения (6.46), то:

Наилучшей оценкой a и b являются $\bar{x}$ и $\bar{y}$ соответственно.

Наилучшей оценкой σ^2 является

$$s^2 = \frac{s_x^2 + s_y^2}{2}. \quad (6.53)$$

Другой, но менее эффективной оценкой σ является

$$0,7979\bar{r}, \quad (6.54)$$

где $\bar{r}$ представляет собой математическое ожидание круговой ошибки, определяемое как

$$\bar{r} = \frac{\sum r_i}{n}; \quad (6.55)$$

здесь $r_i = \sqrt{(x_i - \bar{x})^2 + (y_i - \bar{y})^2}$ есть расстояние между центром распределения выборки $(\bar{x}, \bar{y})$ и i -той точкой выборочного распределения (x_i, y_i) .

Наилучшей оценкой уравнения окружности 50%-ной вероятности является

$$(x - \bar{x})^2 + (y - \bar{y})^2 = (1,1774s)^2. \quad (6.56)$$

Это уравнение можно также оценить (но с меньшей эффективностью) путем замены s выражением (6.54).

Наилучшей оценкой с. р. е. является

$$1,1774s.$$

Здесь мы можем опять заменить s его выражением из (6.54), но при этом оценка с. р. е. будет менее эффективной. Другой малоэффективной оценкой с. р. е. является $\tilde{r}$, *величина медианы расстояний*, определенных из выборки (между центром $(\bar{x}, \bar{y})$ и n -ой точкой выборки).

Теперь мы можем свести вместе различные оценки величин σ , с. р. е. и т. г. е. и составить следующую таблицу:

σ	с. р. е.	т. г. е.
s	1,1774s	1,2533s
0,8493 $\tilde{r}$	$\tilde{r}$	1,0645 $\tilde{r}$
0,7979 $\bar{r}$	0,9394 $\bar{r}$	$\bar{r}$

(6.57)

Оценки, содержащие s , являются *наилучшим приближением*.

СЛУЧАЙ ТРЕХ ПЕРЕМЕННЫХ (ТРЕХ ИЗМЕРЕНИЙ)

Существует много практически важных случаев, в которых для описания события необходимо три и более переменных. Например, для описания ошибок разрывов зенитных снарядов, измеряемых относительно положения цели, необходимо три переменных. В качестве таковых могут быть выбраны прямоугольные координаты в какой-либо заранее выбранной системе координат.

А. Трехмерный нормальный закон распределения. Эллипсоид рассеивания. Если рассматривать прямоугольную систему координат, то одним из наиболее важных и наиболее употребительных законов распределения трех переменных является *трехмерный нормальный закон распределения Гаусса*¹

$$p(x, y, z) = \frac{1}{\sigma_x \sigma_y \sigma_z \sqrt{(2\pi)^3}} \times \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma_x^2} (x - a)^2 - \frac{1}{2\sigma_y^2} (y - b)^2 - \frac{1}{2\sigma_z^2} (z - c)^2 \right\}, \quad (6.58)$$

где x, y, z являются *статистически независимыми*. Каждая из переменных x, y, z характеризуется своей совокупностью параметров точно так же, как и в случае одной переменной.

Закон распределения, выражаемый уравнением (6.58), обладает свойствами в трехмерном пространстве, совершенно анало-

¹ Это выражение не является наиболее общей формой записи трехмерного нормального закона распределения, однако для наших целей оно является вполне приемлемым.

гичными свойствам двумерного закона распределения, выражаемого уравнением (6.41).

Теперь мы имеем плотность вероятности в трех направлениях; она имеет наибольшую величину в центре эллипсоида (a, b, c) , служащем центром всего распределения, и уменьшается таким образом, что остается постоянной на любом эллипсоиде вида

$$\frac{(x-a)^2}{\sigma_x^2} + \frac{(y-b)^2}{\sigma_y^2} + \frac{(z-c)^2}{\sigma_z^2} = C^2. \quad (6.59)$$

При этом чем больше величина C , тем больше эллипсоид и тем меньше величина плотности вероятности $p(x, y, z)$. Задаваясь всеми возможными значениями C в пределах от 0 до ∞ , мы получим семейство эллипсоидов, центры которых расположены в точке (a, b, c) , а полуоси их относятся друг к другу как $\sigma_x : \sigma_y : \sigma_z$; это семейство изображает всю область распределения плотностей вероятности.

Если мы имеем событие, для описания которого необходимы три переменных в виде трех геометрических размеров, причем это событие таково, что закон распределения вероятностей $p(x, y, z)$ удовлетворительно дает распределение размеров в серии повторяющихся событий, то возникает естественный вопрос: какова вероятность, что некоторая точка, соответствующая этому событию, попадает внутрь эллипсоида, описываемого уравнением (6.59)? При каком значении C эта вероятность будет равна $1/2$ (0,99 или какой-либо другой величине)?

Нетрудно показать, что вероятность попадания некоторой точки, соответствующей событию, внутрь эллипсоида (6.59) равна

$$\sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^C t^2 \exp \left\{ -\frac{1}{2} t^2 \right\} dt. \quad (6.60)$$

Эллипсоид, для которого

$$C = 1,5382, \quad (6.61)$$

представляет собой эллипсоид 50%-ного рассеивания. Ниже приводятся величины C , соответствующие эллипсоиду $h\%$ -ного рассеивания для нескольких употребительных значений h :

h	C
25	1,101
50	1,538
75	2,027
90	2,500
95	2,795
99	3,368

(6.62)

Б. Трехмерное нормальное распределение. Случай сферического распределения. Если дисперсии трех переменных x, y, z равны, т. е.

$$\sigma_x^2 = \sigma_y^2 = \sigma_z^2 = \sigma^2,$$

то закон распределения вероятностей $p(x, y, z)$ принимает вид:

$$p(x, y, z) = \frac{1}{\sigma^3 \sqrt{(2\pi)^3}} \times \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma^2} [(x-a)^2 + (y-b)^2 + (z-c)^2] \right\}. \quad (6.63)$$

Теперь уже поверхность равной плотности вероятности будет определяться уравнением

$$(x-a)^2 + (y-b)^2 + (z-c)^2 = (C\sigma)^2. \quad (6.64)$$

Поскольку $p(x, y, z)$, определяемая уравнением (6.63), полностью симметрична относительно точки (a, b, c) , то при решении определенных задач естественно заменить прямоугольные координаты x, y, z расстоянием по радиусу от точки (a, b, c) до точки (x, y, z) , которое равно

$$\rho = \sqrt{(x-a)^2 + (y-b)^2 + (z-c)^2}.$$

При введении переменной ρ закон распределения генеральной совокупности, выражаемый уравнением (6.63), можно записать в виде

$$p(\rho) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\rho^2}{\sigma^3} \exp \left\{ -\frac{\rho^2}{2\sigma^2} \right\}. \quad (6.65)$$

Сфера 50%-ного рассеивания есть такая сфера, для которой $C = 1,5382$.

Сферическая вероятная ошибка (spherical probable error — s. p. e.) определяется как радиус сферы 50%-ного рассеивания и находится из выражения

$$\text{s. p. e.} = 1,5382\sigma. \quad (6.66)$$

Математическое ожидание сферической радиальной ошибки (mean spherical radial error — m.s.r.e.) при сферическом нормальном распределении определяется как ожидаемая величина расстояния по радиусу от центра распределения до каждой точки пространства x, y, z , т. е. $E[\sqrt{(x-a)^2 + (y-b)^2 + (z-c)^2}]$, которая равна

$$\frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}} \sigma = 1,5958\sigma. \quad (6.67)$$

Соотношение между σ , s. p. e. и m. s. r. e.:

$$\begin{aligned} \sigma &= 0,6501 \text{ s. p. e.} = 0,6267 \text{ m. s. r. e.} \\ 1,5382\sigma &= \text{s. p. e.} = 0,9639 \text{ m. s. r. e.} \\ 1,5958\sigma &= 1,0374 \text{ s. p. e.} = \text{m. s. r. e.} \end{aligned}$$

Радиусы сфер $h\%$ -ного рассеивания для нескольких важных величин даются в нижеследующей таблице:

h	Радиус		
	σ	а. р. е.	м. з. г. е.
25	1,101	0,7159	0,6900
50	1,538	1,000	0,9639
75	2,027	1,318	1,270
90	2,500	1,625	1,567
95	2,795	1,817	1,752
99	3,368	2,190	2,111

В. Выборка: n независимых троек наблюдений $(x_1, y_1, z_1; x_2, y_2, z_2; \dots; x_n, y_n, z_n)$ трех переменных x, y, z . Аналогично случаю двух переменных *выборка* для рассматриваемого случая состоит из n независимых троек наблюдений $(x_1, y_1, z_1; x_2, y_2, z_2; \dots; x_n, y_n, z_n)$.

Проблема наилучшей оценки для случая эллипсоидального распределения

Как и в случае двух переменных, наилучшими оценками математического ожидания и дисперсии каждой переменной являются эмпирическое математическое ожидание и эмпирическая дисперсия для этих переменных из выборки.

Наилучшей оценкой уравнения эллипсоида 50%-ного рассеивания является:

$$\frac{(x - \bar{x})^2}{s_x^2} + \frac{(y - \bar{y})^2}{s_y^2} + \frac{(z - \bar{z})^2}{s_z^2} = 1,5382^2. \quad (6.68)$$

Наилучшие оценки уравнений эллипсоидов рассеивания, соответствующих другим процентным выражениям, можно получить путем замены правой части уравнения (6.68) соответствующей величиной C^2 из (6.62).

Проблемы оценки для сферического распределения

В случае сферического распределения, для которого закон распределения генеральной совокупности выражается уравнением (6.63), *наилучшей оценкой* a, b и c является $\bar{x}, \bar{y}$ и $\bar{z}$ соответственно.

Наилучшей оценкой σ^2 является

$$s^2 = \frac{1}{3} [s_x^2 + s_y^2 + s_z^2]. \quad (6.69)$$

Другая, хотя и менее эффективная оценка σ , дается выражением

$$\sigma = 0,6267\bar{r}, \quad (6.70)$$

где $\bar{r}$ представляет собой математическое ожидание сферической радиальной ошибки, определяемое выражением

$$\bar{r} = \frac{\sum r_i}{n}, \quad (6.71)$$

где

$$r_i = \sqrt{(x_i - \bar{x})^2 + (y_i - \bar{y})^2 + (z_i - \bar{z})^2}$$

есть расстояние между центром распределения выборки x, y, z и i -той точкой выборки (x_i, y_i, z_i) .

Наилучшей оценкой уравнения сферы 50%-ного рассеивания является

$$(x - \bar{x})^2 + (y - \bar{y})^2 + (z - \bar{z})^2 = (1,5382s)^2. \quad (6.72)$$

Оценку этого уравнения можно также получить, заменив s на σ из выражения (6.70).

Наилучшей оценкой s р. е. является

$$1,5382s. \quad (6.73)$$

Другие, хотя и менее эффективные оценки получаются при применении $\tilde{r}$, эмпирической медианы расстояний $r_1, r_2, \dots, r_n$, а также при замене s в выражении (6.73) величиной σ из выражения (6.70).

Различные оценки σ , s р. е. и $m.s.g.e.$ могут быть сведены в следующую таблицу:

σ	s р. е.	$m.s.g.e.$
s	$1,5382s$	$1,5958s$
$0,6501\tilde{r}$	$\tilde{r}$	$1,0374\tilde{r}$
$0,6267\bar{r}$	$0,9639\bar{r}$	$\bar{r}$

Наилучшими являются оценки, включающие s .

6.8. Математические основы боевых действий

Введение. Древнейший и широко известный принцип ведения войны состоит в том, что сражения выигрываются при превосходстве сил над силами противника. Применяя этот принцип «сосредоточения сил», Цезарь, Наполеон и Нельсон добивались величайших побед, изменявших весь ход истории; однако лишь

в 1916 г. мало известный англичанин Ф. У. Ланчестер¹ дал математическое обоснование этого принципа.

Уравнения Ланчестера имеют очень сложное решение, изложение которого выходит за рамки данной книги. Однако вопросы динамики боя и сражения, вытекающие из этих уравнений, настолько важны, что специалисту, занимающемуся исследованием операций, следовало бы иметь четкое представление о принципах, заложенных в этих уравнениях. Для иллюстрации закона Ланчестера Айвэн Г. Дриггс² предложил остроумный метод, состоящий в использовании игральные кости с гранями различного цвета и разным количеством точек на каждой грани.

Сводка результатов. В 1916 г. Ланчестер высказал следующее утверждение: *боевую мощь данного количества живой силы и техники можно считать пропорциональной средней эффективности каждой боевой единицы, помноженной на квадрат числа действующих боевых единиц в предположении, что каждая из них может вести огонь по любой или сразу по всем боевым единицам противника.*

Это утверждение справедливо либо для однократного применения войск, либо при условии, что небоевых потерь³ нет, либо, наконец, в случае, когда не принимаются во внимание возможности воюющих сторон восполнять понесенные в ходе боевых действий потери. С другой стороны, если предположить, что скорость изменения численности воюющей стороны в единицу времени в течение всей войны будет равна скорости производства (или, более точно, скорости возмещения потерь) за вычетом небоевых потерь и потерь, понесенных в ходе боевых действий, то можно получить общее решение, выражаемое в виде двух дифференциальных уравнений — по одному для каждой из двух воюющих сторон.

Как было указано выше, эти уравнения довольно трудны для понимания. В качестве средства для наглядной иллюстрации результатов в упомянутой работе Дриггса предлагается использовать игру в кости, с помощью которой можно продемонстрировать исход боевых действий в любых тактических условиях, какие только можно себе представить.

При этом не исключено, что игра даст более точные результаты по анализу нескольких операций или даже войны в целом,

¹ Lanchester F. W., *Aircraft in Warfare; the Dawn of the Fourth Arm*, Constable and Co., London, 1916.

² Driggs I. H., *Monte Carlo Method of Operational Research*, Naval Air Development Center, Chief Scientist Report № 1, Johnsville Ra., April 1955.

³ Под небоевыми потерями здесь понимаются потери, происходящие вследствие естественного износа боевой техники, а также потери, имеющие место во время переброски живой силы и техники. — *Прим. ред.*

чем аналитическое решение, поскольку как в игре, так и в реальных условиях ведения войны случайность оказывает довольно большое влияние на каждый частный результат. Тем не менее при проведении большого числа игр результаты с большой вероятностью будут следовать уравнениям Ланчестера.

Если пренебречь небоевыми потерями и возмещением потерь, то, решая уравнения, составленные в соответствии с высказанным выше положением, можно достаточно легко получить результаты, непосредственно подтверждающие закон Ланчестера.

Для доказательства того, что игра в кости следует этому закону с точностью, по крайней мере достаточной для иллюстративных целей, были изготовлены два комплекта костей: в первом комплекте каждая из костей имела две грани, окрашенные в синий цвет, кости же другого комплекта имели одну грань, окрашенную в красный цвет. *Таким образом, игрок костями с синими гранями был как бы снабжен системой оружия (например, истребителем-перехватчиком), в два раза более эффективной, чем соответствующая система оружия игрока, игравшего костями с красной гранью.*

Каждому из игроков было роздано различное количество игровых костей. Игроки произвели большое количество бросаний, получив следующие результаты:

а) когда количество костей с красной гранью было в два раза больше, чем количество костей с синими гранями, то «синие» выигрывали редко, хотя количество очков (окрашенных граней) у обоих игроков было одинаковое;

б) когда же среднее отношение между количеством синих и красных костей было пропорционально $\sqrt{2}$, то победы распределялись примерно поровну между «красными» и «синими», а в 50 случаях игра заканчивалась вничью;

в) случай играет большую роль в определении победителя любой отдельно взятой партии или серии бросаний, однако при увеличении числа игр получался результат, близкий к тому, который определялся квадратичным законом Ланчестера в предположении, что кость с двумя синими гранями в два раза эффективнее кости с одной красной гранью.

На основе этих результатов была придумана более совершенная игра, с помощью которой можно представить самые разнообразные тактические ситуации. Так, окрасив одну из граней игровой кости в какой-то другой цвет, можно тем самым отразить небоевые потери, а после каждой серии бросаний судья может выдавать каждому из игроков дополнительное количество игровых костей, что является имитацией подхода пополнений к каждой из воюющих сторон.

Можно учесть и ряд других обстоятельств, таких, например, как мероприятие противника с целью ввести нас в заблуждение,

недостаточно хорошую работу службы дальнего обнаружения и т. п.

Выводы. Путем постановки большого количества опытов и тщательного анализа результатов было установлено, что эта игра в кости может достаточно точно отражать закон Ланчестера и, следовательно, может иметь громадное значение для понимания законов ведения войны в воздухе, а также для решения многих военных проблем. Кроме того, эта игра доставляет большое наслаждение играющим.

Обсуждение. В 1916 г. Ф. У. Ланчестер написал книгу, озаглавленную «Авиация в войне: зарождение 4-го рода оружия». В ходе работы над книгой Ланчестером были предложены уравнения, основанные на анализе вероятностей и позволяющие выразить различные виды тактической обстановки. Он показал, что лорд Нельсон в сражении при Трафальгаре должен был интуитивно прийти к выводу о существовании зависимости между численностью сосредоточенных сил и их эффективностью, так как его план сражения почти точно следует закону, предложенному Ланчестером. Результаты осуществления замысла Нельсона теперь широко известны.

В простейшем виде, как это было предложено Ланчестером, теорема или закон о многоэлементном бое гласит:

Общая эффективность данного количества живой силы и техники равна средней эффективности каждой боевой единицы, умноженной на квадрат числа таких единиц, участвующих в бою.

Термин «многоэлементный бой» означает такую обстановку, когда каждая боевая единица одной стороны может вести огонь по одной боевой единице другой стороны или по всем сразу. Следует отметить, что такой бой не является серией дуэлей, как это практиковалось в эпоху холодного оружия.

Это довольно простое положение было затем развито многими авторами, в том числе Ф. Морзом и Дж. Кимбеллом в книге «Методы исследования операций».

В этой работе авторы рассматривают вопросы ведения войны в целом, т. е. войны как серии отдельных боев и сражений, рассмотренных Ланчестером и выраженных его уравнениями. В результате такого обобщения получаются два дифференциальных уравнения, выражающих эффективность «красных» и «синих» в следующем виде:

$$\begin{aligned}\frac{dR}{dt} &= P_r - O_L N_r - e_b N_b, \\ \frac{dB}{dt} &= P_b - O_L N_b - e_r N_r,\end{aligned}\tag{6.74}$$

где P — скорость возмещения потерь;

O_L — процент небоевых потерь;

e — эффективность = $\frac{\text{Количество уничтоженных вражеских единиц}}{\text{Количество своих действовавших единиц}}$;

N — количество действовавших единиц;

r и b — индексы, обозначающие «красных» и «синих».

Эти уравнения означают, что скорость изменения сил «красных» («синих») в течение определенного периода времени равна скорости возмещения потерь за вычетом небоевых потерь и потерь, понесенных в ходе боевых действий.

В принципе можно получить аналитическое решение этих двух уравнений для ряда значений переменных, однако при этом оказывается, что полученное решение трудно представить в виде, доступном для понимания не искушенным в математике людям.

Можно, конечно, задаваясь большим числом значений переменных, входящих в уравнения, подсчитать соотношение сил «красных» и «синих» по истечении различных промежутков времени. Однако этот путь привел бы к необходимости построить такое большое количество графиков, что в итоге было бы невозможно разобраться в полученных результатах. Тем не менее для одного частного случая можно получить достаточно простое решение. Так, если предположить, что война будет выиграна одним коротким сражением и поэтому небоевые потери обеих сторон будут ничтожно малы, то первые два члена уравнений (6.74) исчезнут и решение запишется в виде

$$N_b^2 e_b > N_r^2 \cdot e_r, \quad (6.75)$$

если должны выиграть «синие» (это первоначальное уравнение Ланчестера).

Поскольку даже при объяснении смысла вышеприведенного простого неравенства лицам, имеющим дело с разработкой вооружения, возникли трудности, то попытка проиллюстрировать более сложные выражения представлялась почти безнадежной. Неоднократно стремились графически показать достигнутые результаты, но безуспешно. Более того, все большее число лиц, занимающихся исследованием операций, склоняется к тому, чтобы избавиться от математики. В конце концов оказалось, что лучшим решением является применение простой игры, основанной опять-таки на законах вероятностей или на изучении случайных величин. В этой игре каждый игрок (страна) должен был бы обладать такими единицами, которые: а) могли бы отразить численность введенных в действие сил; б) выражали бы относительную боевую эффективность и в) представляли бы небоевые потери. Кроме того, необходимо, чтобы каждый игрок

имел возможность после каждого сражения пополнять свои силы в соответствии с присущей ему скоростью возмещения потерь.

Оказалось, что всем перечисленным требованиям удовлетворяет старая игра в кости, в которой можно изменять численность войск, участвующих в сражении, менять их относительную эффективность путем увеличения относительного числа окрашенных граней, добавлять дополнительные окрашенные грани на каждой кости, обозначающие небоевые потери, и, наконец, можно раздать дополнительное количество костей каждому из игроков, чтобы отразить его скорость возмещения потерь. Совершенно ясно, что в определении победителя в этой игре большую роль играет случай. Но точно такую же роль играет он и в реальных боевых условиях. Тем не менее опытный командир не будет полагаться на случайный исход только одного боя, он примет во внимание общую среднюю вероятность благоприятного исхода.

Для проверки этой идеи было изготовлено два комплекта игровых костей: в первом комплекте каждая из костей имела две окрашенные грани, во втором комплекте — только одну. Небоевые потери, а также способность возмещения потерь во внимание не принимались.

При этом предполагалось, что если эта несложная игра при большом количестве партий (боев) подчиняется простому квадратичному закону Ланчестера, то можно затем подтвердить справедливость применения ее и для доказательства более сложных случаев.

Предположим, что играется большое число партий и что кости с двумя окрашенными гранями представляют «синих», а с одной окрашенной гранью — «красных».

Тогда, если отношение численности «синих» к численности «красных» в каждом «бою» меньше чем $1/\sqrt{2}$, то «красные» побеждают в большинстве случаев; если же численность «крас-

Таблица 6.5

$\frac{N_r}{N_b} = \frac{\text{Численность «красных»}}{\text{Численность «синих»}}$	Количество партий, выигранных «красными»	Количество партий, выигранных «синими»
0,5	0	10
1,00	0	10
1,4 (14/10)	14	11
1,455 (16/14)	11	14
1,545 (17/11)	6	4
2,0	10	0

ных» возрастает больше указанной величины, то «синие» очень редко выигрывают и в конце концов вообще перестают выигрывать. Чтобы проиллюстрировать это положение, допустим, что у «синих» было 10 костей, а у «красных» — 15. В таком случае «красные» выигрывали бы чаще, чем «синие». Однако если «красные» имели бы всего 12 костей, то в большинстве случаев выигрывали бы «синие».

В табл. 6.5 приведены результаты большого количества партий, сыгранных между «синими» и «красными».

Кости «синих» имели две окрашенные грани, кости «красных» — только одну. При соотношении, равном $\sqrt{2}$ или близком к нему, число партий, необходимое для получения лучшего среднего распределения, доходило до 25. Примечательно, что когда отношение N_r/N_b приближалось к указанной величине, то «синие» выигрывали примерно в половине случаев. Интересно отметить также, что при отношении, равном 1,4, «красные» выигрывали в 14 из 25 случаев, в то время как при более благоприятном соотношении сил для «красных», равном 1,455, столько же раз выигрывали и «синие». При среднем соотношении 1,4275 среднее число побед каждой стороны равнялось 25 при 50 сыгранных партиях. Отсюда следует, что такая игра в кости, в ее простейшей форме, действительно следует закону Ланчестера с достаточной точностью, поэтому были проделаны опыты по распространению этой игры и на более сложные случаи.

При анализе этих партий было установлено, что, как и следовало ожидать, важную роль в результатах бросаний играл случай. В некоторых партиях за один бросок бывали «разгромлены» все силы «синих», в некоторых случаях та же участь постигала «красных».

При увеличении количества партий выигрывающей стороной были вначале «красные», а затем «синие». Это особенно отчетливо проявлялось, когда отношение «красных» к «синим» приближалось к $\sqrt{2}$.

Чтобы проанализировать более сложные случаи, было изготовлено дополнительное количество игровых костей различного вида как для «красных», так и для «синих». Так, чтобы представить различную эффективность каждой из сторон, были изготовлены кости с различным числом красных и синих граней. Кроме того, некоторый процент костей каждой из играющих сторон имел белую грань, что давало возможность представить небоевые потери. Кости с белыми гранями могли бы также представлять потери во время транспортировки боевой техники с завода на фронт; этот же фактор можно было бы учесть и другим путем, добавив кости с гранями, окрашенными в любой другой цвет. Игра ведется следующим образом:

1. Выбирается судья, который раздает кости с синими и красными гранями в соответствии с принятыми правилами игры.

2. Каждый игрок бросает свои кости, и если, к примеру, выпадут красные грани, то судья убирает по одной кости «синих» за каждую выпавшую красную грань и наоборот (победа).

3. Если у любого из игроков наверху окажется белая грань, судья также убирает эту кость (небоевые потери).

4. Судья добавляет в резерв каждого из игроков новые кости, тем самым воспроизводя скорость возмещения потерь.

5. Игроки продолжают бросать кости до тех пор, пока одна из сторон не выиграет, т. е. пока один из игроков не потеряет все кости.

6. Один из игроков должен быть обороняющейся стороной, поэтому он может бросать кости только после своего атакующего противника. Следовательно, он может выбирать количество костей, при котором ему обеспечен успех, если, разумеется, он имеет нужное количество в своем резерве.

7. Броски атакующего могут производиться скрытно от обороняющегося; таким образом, обороняющийся вынужден строить предположения о необходимом количестве костей. (Это может соответствовать условиям, которые могут иметь место в случае неэффективности радарных установок оборонящегося.)

8. Атакующий может получить дополнительную чистую кость, означающую ложную цель, которую обороняющийся должен обнаружить и уничтожить.

9. Можно предположить, что обороняющийся имеет глубоко эшелонированные боевые порядки, т. е. он может восполнять потери один или несколько раз в течение партии.

Имея такой комплект игровых костей, можно проводить игру также и при следующих предположениях:

1. Один из игроков как бы ведет бой на территории другого, так что каждая единица, выведенная из строя в процессе игры, представляет собой невозполнимую потерю (сюда включаются также и боевые потери), в то время как другая сторона имеет возможность возмещать определенный процент боевых и боевых потерь. Можно предположить, что значительное число летчиков этой стороны в случае уничтожения их самолетов спасается на парашютах и используется вновь; можно допустить также, что часть неисправных самолетов, не пригодных для боя, впоследствии опять возвращается в строй и принимает участие в боевых действиях.

2. Можно менять количество игровых костей, раздаваемых каждому игроку, чтобы отразить степень сосредоточения сил и средств, предназначенных для ведения боевых действий.

3. Можно разрешить игрокам после каждой партии добавлять различное количество игровых костей в их резерв, тем самым меняя скорость возмещения потерь с каждой стороны.

4. Каждый из игроков (командиров) может изменять по своему желанию тактику ведения игры (боя).

5. Можно изменять процент небоевых потерь, тем самым показывая, что стремление повысить эффективность оружия влечет за собой его усложнение.

Очевидно, что для ведения указанной игры могут быть разработаны весьма гибкие правила. Тем не менее оказывается, что, каковы бы ни были исходные предположения, преимущество всегда остается на стороне того игрока, который при планировании каждой партии пользуется уравнением Ланчестера (6.75). Иными словами, если «синие» вводят в бой 10 боевых единиц и им противостоят 20 единиц «красных», то «синие» будут быстро разгромлены при условии, что боевая эффективность «синих» превосходит эффективность «красных» меньше чем в 4 раза.

До тех пор пока скорости возмещения потерь «красных» и «синих» примерно одинаковы и их силы в начале боя (игры) также равны, «синие» не имеют шансов на победу. Однако если силы «красных» в начале боя малы, а их скорость возмещения потерь низка, то хотя «красные» сначала могут и выиграть, однако в конце концов они не смогут противопоставить «синим» 20 игровых костей, поскольку количество игровых костей «красных» будет уменьшаться. В этом случае «синие» начнут одерживать победу за победой и в конечном счете разгромят «красных».

Замечания. Повторяя эту игру несколько раз, можно убедиться в том, что если «красные» располагают большими силами в начале боя и если их скорость возмещения потерь достаточно велика, то единственная возможность для «синих» добиться победы заключается в увеличении боевой эффективности их игровых костей по сравнению с костями «красных». Это можно осуществить двумя способами: либо игровые кости «синих» должны иметь больше окрашенных граней, либо на игровых костях «красных» таких граней должно быть меньше. Тем самым увеличивается эффективность боевых единиц «синих», а эффективность «красных» настолько же уменьшается.

Рассмотрим выражение, определяющее боевую эффективность, а именно общую (суммарную) вероятность нанесения поражения противнику.

Уравнение для этой общей вероятности записывается

$$P = p_d \cdot p_p \cdot p_k \quad [\text{ср. с уравнением (4.1)}], \quad (6.76)$$

где p_a — вероятность своевременного обнаружения противника;
 p_p — вероятность занятия исходного положения для атаки с целью получить p_k ;
 p_k — вероятность поражения с помощью используемого оружия: ствольной артиллерии, реактивных снарядов и т. п.

Обороняющийся может с помощью своих наземных радиолокационных станций обнаружить цель на значительно большем расстоянии, чем атакующий, если цель находится на большой высоте. Способность обороняющегося занять удобное положение для атаки будет зависеть от отношения характеристик средств нападения и обороны. Вероятно, что характеристики средств обороняющегося могут быть равны, если не выше характеристик средств нападающего, так что он имеет по крайней мере равные с последним шансы на занятие удобного положения для атаки. Точно так же нет оснований предполагать, что эффективность оружия обороняющейся стороны меньше, чем у атакующей стороны.

Таким образом, на первый взгляд маловероятно, что атакующий обладает боевыми единицами, боевая эффективность которых была бы значительно выше эффективности боевых единиц обороняющегося. Иными словами, маловероятно, чтобы он мог одержать победу в борьбе против опытного игрока, обладающего большим количеством игровых костей в начале игры и высокой скоростью возмещения потерь.

Однако дальнейшее исследование сделанного выше утверждения показывает, каким путем общая вероятность успеха обороняющейся стороны может быть уменьшена. Мы утверждали, что для больших высот обороняющийся при наличии у него наземных радиолокационных станций имеет большую вероятность обнаружения противника, чем атакующий. А как обстоит дело на малых высотах? В этом случае наземные радиолокационные станции оказываются вообще неспособными предупредить о появлении целей, если последние летят либо ниже радиолокационного горизонта, либо за пределами диаграммы направленности антенны, а также если атакующий использует для маскировки складки местности. Поэтому успех обороняющегося будет зависеть от других средств обнаружения. Так, он может применить специальные радиолокационные установки для обзора местности или авиационные радиолокационные станции, свободные от помех, возникающих вследствие отражения от земли или от водной поверхности. Однако эти системы усложняют линии связи и еще сильнее уменьшают эффективность действий обороняющегося.

Более того, то громадное преимущество в выборе позиции для боя, которым обладает атакующая сторона на больших вы-

сотах за счет большей скорости, имеет тенденцию к уменьшению или просто исчезает, когда самолет летит на бреющем полете.

Эти факторы приводят к дальнейшему уменьшению боевой эффективности «красных», если они являются обороняющейся стороной. Данное обстоятельство при проведении игры можно имитировать тем, что судья требует, чтобы для вывода из строя одной единицы (кости) «синих» «красные» должны выбросить одновременно 2, 3 или более окрашенных граней; другим путем является увеличение числа окрашенных граней, приходящихся на одну кость «синих».

В данной игре можно также представить влияние другого немаловажного фактора, как это предусмотрено правилом 7. Этот фактор заключается в недостаточной хорошей работе системы дальнего обнаружения. Как было сказано, его можно учесть тем, что атакующая сторона бросает игральные кости скрытно от обороняющейся стороны.

Если обороняющемуся не удастся разгадать, какое количество костей ему необходимо бросить, чтобы добиться успеха, то он может оказаться разгромленным. Так, если он бросит очень мало костей, он проиграет; если же, наоборот, слишком много, то его небоевые потери могут оказаться такими большими, что по существу это будет равносильно разгрому.

С помощью рассматриваемой игры можно также имитировать и обстоятельства, выражаемые правилом 8, а именно возможность применения «синими» ложных целей.

Поскольку для обнаружения современных высокоскоростных самолетов и для ведения по ним зенитного огня необходимы радиолокационные устройства, то ложной целью может служить любой объект, который будет воздействовать на радиолокатор подобно самолету. В качестве такого объекта можно применить простой, без вооружения, радиоуправляемый беспилотный самолет любого размера, который имеет соответствующие отражающие поверхности. Такой объект может сопровождать атакующие самолеты или может быть выпущен с них в нужный момент. Таким образом, эти ложные цели не смогут сами уничтожить ни одного средства обороны, однако последние должны обеспечить их полное уничтожение. Эффект применения ложных целей заключается в данном случае в том, что на плечи резервов обороняющегося ложится дополнительная тяжесть, а также увеличиваются требования к скорости возмещения потерь; все это приводит к снижению боевой эффективности обороняющегося.

Как предусмотрено правилом 9, в данной игре можно создать ситуацию, соответствующую случаю глубоководноутопленных боевых порядков обороняющейся стороны. Атакующий может

начинать игру с любого фиксированного количества игральных костей, а обороняющийся после него вправе бросить любое число костей, какое он считает необходимым. После первых двух-трех бросков обороняющийся может ввести в игру свежие силы (добавить игральные кости) в любом количестве. Таким образом, обороняющийся может тем самым компенсировать свои потери как бы наличием нового оборонительного рубежа; тем самым имитируется глубокоэшелонированная оборона.

При этом способность обороняющегося к восполнению потерь не может быть безграничной: она должна быть ограничена некоторыми пределами, поскольку при определении числа подобных повторяющихся оборонительных действий необходимо учитывать такие важные факторы, как время нахождения атакующего на территории противника, а также расстояние, на которое он проник в глубь страны.

Таким образом, оказывается, что ходом данной игры можно управлять в соответствии с принятыми правилами, имитируя почти любую оперативно-тактическую обстановку, которая может возникнуть в боевых условиях.

Конечно, при этой игре очень трудно задать реальные значения любой из рассматриваемых величин — таких, как боевая эффективность, небоевые потери и т. п.; однако это несколько не умаляет значения этой игры как средства иллюстрации основных уравнений, тем более, что при численном решении значениями величин, входящих в уравнения, также необходимо задаваться.

В конечном счете цель данной игры состоит не в том, чтобы дать командиру или исследователю операций готовый ответ на интересующие его проблемы, а в том, чтобы наглядно показать решение сложного математического выражения и помочь понять основные принципы анализа. Читатель может сам изготовить комплект игральных костей и провести серию игр применительно к интересующей его области. Он убедится, что это весьма поучительно и занимательно.

ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПЕРАЦИЙ В ОБЛАСТИ УПРАВЛЯЕМЫХ СНАРЯДОВ

7.1. Ошибки наведения

В главе 4 задача вывода перехватчика в тактически выгодное положение для атаки цели была описана как «проблема В».

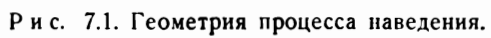
На рис. 4.1 представлена ошибка наведения перехватчика как функция угла, под которым движется перехватчик по отношению к цели, и расстояния от наземной радиолокационной станции наведения до теоретической точки встречи перехватчика с целью. Этот рисунок действителен для случая 50%-ной вероятности, т. е. для случая, когда у 50% перехватчиков ошибка будет меньше определенной величины или равна ей. Графики построены для случая двух измерений, т. е. для исследования движения в горизонтальной плоскости.

При подобных построениях графиков необходимо учитывать множество факторов. Рассмотрим, например, процесс наведения. Наземная радиолокационная станция обнаруживает вражеский самолет. Она устанавливает положение цели, выдавая ее азимут, угол места и дальность. Определяются также координаты (азимут, угол места и дальность) перехватчика. Электронное счетно-решающее устройство определяет, в каком направлении необходимо направить перехватчик, чтобы он встретился с целью, а для того, чтобы заставить перехватчик двигаться по нужному направлению, используется передача сигналов по радио.

Перехватчик может управляться либо человеком, либо с помощью автопилота.

Рассмотрим проблему наведения в одной плоскости, предположив для начала, что наземная радиолокационная станция ведет наблюдение как за целью, так и за перехватчиком и измеряет азимут и дальность обоих объектов. При данной дальности радиолокатор может измерить азимут с определенной степенью точности, которая может быть выражена в виде функции распределения вероятности азимутальной ошибки.

Так, например, мы можем сказать, что наземная радиолокационная станция определяет азимут цели в 50° , причем вероятность того, что цель действительно находится в пределах,



Р и с. 7.1. Геометрия процесса наведения.

скажем, 2 миль от 50° , равна 50%. При вероятности 90% ошибка была бы больше. Радиолокатор может также дать сведения о том, что цель находится на расстоянии 100 миль, причем вероятность нахождения цели в пределах, скажем, 2 миль от этого расстояния равна 50%.

То же самое можно сказать и относительно определения местоположения перехватчика.

Электронное вычислительное устройство использует эти неточные данные и рассчитывает направление полета перехватчика, причем делает это с некоторым запаздыванием во времени. Перехватчик пытается выполнить команды, поступающие со станции наведения; однако точность, с которой выполняются эти команды, ограничена. На больших высотах маневренность перехватчика ограничивается малой плотностью воздуха, а на малых — способностью летчика переносить большие нагрузки. Во всех случаях для выполнения летчиком полученной команды требуется определенное время, и это обстоятельство является немаловажным фактором, который необходимо учитывать.

Таким образом, возможно, что перехватчик будет наводиться по расчетному курсу с некоторой (плюсовой или минусовой) ошибкой.

Теперь в нашем распоряжении имеются основные составные элементы, необходимые для определения ошибки наведения для данной обстановки. Допустим, что для различных ошибок существуют распределения вероятностей, и на основании этих

К рисунку 7.1.

A — угол встречи с целью.	ϵ_I — ошибка радиолокатора в определении азимута перехватчика.
T — действительное начальное положение цели.	Φ_I — начальный азимутальный угол между линией визирования цели и линией визирования перехватчика.
I — действительное начальное положение перехватчика.	ΔR_T — ошибка радиолокатора в определении дальности до цели.
X — кажущееся положение цели.	ΔR_I — ошибка радиолокатора в определении дальности до перехватчика.
Y — кажущееся положение перехватчика.	m — ошибка наведения перехватчика на цель.
H — действительное направление полета (курс) перехватчика.	r — расстояние по прямой от действительного положения перехватчика I до точки встречи Z .
ϵ_H — ошибка в курсе перехватчика.	r_i — расстояние от действительного положения перехватчика до точки пересечения с направлением движения цели в случае, когда перехватчик движется по курсу H .
H_C — расчетный курс перехватчика.	r_c — расстояние от кажущегося положения перехватчика Y до точки пересечения с кажущимся направлением движения цели в случае, когда перехватчик летит по расчетному курсу H_C .
R_I — начальная дальность от радиолокационной станции до перехватчика.	β — угол между вектором r_c и линией XU .
R_i — расстояние от радиолокационной станции до точки встречи (теоретическое).	
V_I — воздушная скорость перехватчика.	
V_T — действительная воздушная скорость цели.	
V_{TC} — рассчитанная воздушная скорость цели.	
ϵ_T — ошибка радиолокатора в определении азимута цели.	

данных разработаем метод расчета ошибки наведения перехватчика. Мы сделаем это для случая двух измерений, предполагая, что решаем задачу с момента, когда перехватчик вышел на конечный прямолинейный участок сближения с целью.

Поскольку полет как перехватчика, так и цели происходит в одних и тех же атмосферных условиях, то влияние ветра не учитывается. Конечно, может оказаться, особенно при наведении с больших расстояний, что скорость и направление ветра в районе начального расположения цели отличаются от скорости и направления ветра в районе исходного положения перехватчика; в этом случае при решении задачи ветер, безусловно, необходимо учитывать. Эффект влияния ветра необходимо также учитывать при рассмотрении пространственной задачи, если скорость ветра меняется с высотой. На точность наведения перехватчика могут влиять сильные порывы ветра ввиду того, что движения цели и перехватчика, возникающие под действием порывов ветра, носят случайный характер.

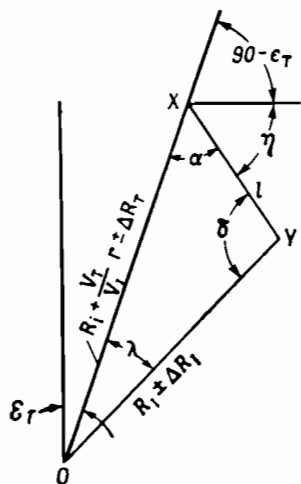


Рис. 7.1, а. Элементы треугольника OXY на рис. 7.1.

На рис. 7.1 представлены основные геометрические построения, относящиеся к решению задачи в одной плоскости при условии прямолинейного движения цели. Предполагается, что наземный радиолокатор расположен в точке O . Точка T представляет собой начальное положение цели. Движение цели происходит все время по направлению на локатор. Поскольку перехватчик может подойти к цели с любого направления, в качестве параметра выбран угол A , который совместно с r определяет начальное положение перехватчика. Для одного расчета (т. е. для проведения одного полного построения) r может быть фиксировано.

Что такое r ? Это идеальное направление полета перехватчика, движение по которому приводит к встрече перехватчика с целью в точке Z . Точка Y представляет собой кажущееся положение перехватчика, определяемое радиолокатором. Точка X — кажущееся положение цели. При решении задачи необходимо знать также скорость цели V_T . Она должна быть определена с помощью радиолокатора и счетно-решающего устройства и, следовательно, определяться с некоторой ошибкой. Предполагается, что истинное значение скорости перехватчика может сообщаться с него на наземную радиолокационную станцию, что

позволяет свести к минимуму ошибку, возникающую от неточного определения скорости перехватчика.

В случаях, когда важен знак угла, положительное направление его отсчета показано на рис. 7.1 стрелкой. Линия rc есть кажущееся направление полета перехватчика, как оно определяется радиолокатором совместно со счетно-решающим устройством. H_c — расчетное направление полета (расчетный курс), ϵ_H — курсовая ошибка, а H — действительный курс.

Поскольку в начальный момент перехватчик находится в точке I , а не в точке Y , то его истинный путь движения есть r_i при курсе H . Ввиду того что различные ошибки, возникающие при наведении, могут быть как положительными, так и отрицательными, необходимо либо установить определенное правило выбора знака, например считать ошибку положительной, если она возрастает, либо исследовать оба знака.

Вот основные геометрические соотношения для рис. 7.1:

$$r_c \sin \beta = \frac{V_{TC}}{V_I} r_c \sin \alpha, \quad (7.1)$$

или

$$\sin \beta = \frac{V_{TC}}{V_I} \sin \alpha.$$

$$\beta = \arcsin \left(\frac{V_{TC}}{V_I} \sin \alpha \right). \quad (7.2)$$

$$R_I = \sqrt{R_i^2 + r^2 - 2rR_i \cos A}. \quad (7.3)$$

$$r \sin (180^\circ - A) = R_I \sin \Phi_I,$$

или

$$\sin \Phi_I = \frac{r}{R_I} \sin (180^\circ - A). \quad (7.4)$$

$$\Phi_I = \arcsin \left[\frac{r}{R_I} \sin (180^\circ - A) \right], \quad (7.5)$$

или

$$\Phi_I = \arcsin \left[\frac{r \sin (180^\circ - A)}{\sqrt{R_i^2 + r^2 - 2rR_i \cos A}} \right]. \quad (7.6)$$

$$\lambda = \Phi_I \pm \epsilon_I \mp \epsilon_T. \quad (7.7)$$

$$l \sin \delta = \left(R_i + \frac{V_T}{V_I} r \pm \Delta R_T \right) \sin \lambda. \quad (7.8)$$

$$l \cos \delta + \left(R_i + \frac{V_T}{V_I} r \pm \Delta R_T \right) \cos \lambda = R_I \pm \Delta R_I, \quad (7.9)$$

или

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\left(R_i + \frac{V_T}{V_I} r \pm \Delta R_T\right) \sin \lambda}{R_I \pm \Delta R_I - \left(R_i + \frac{V_T}{V_I} r \pm \Delta R_T\right) \cos \lambda}, \quad (7.10)$$

$$\delta = \arctan \frac{\left(R_i + \frac{V_T}{V_I} r \pm \Delta R_T\right) \sin \lambda}{R_I \pm \Delta R_I - \left(R_i + \frac{V_T}{V_I} r \pm \Delta R_T\right) \cos \lambda}. \quad (7.11)$$

$$90^\circ \mp \varepsilon_T + \eta = \lambda + \delta,$$

или

$$\eta = \lambda \pm \varepsilon_T - 90^\circ + \delta. \quad (7.12)$$

$$\alpha = 180^\circ - \lambda - \delta. \quad (7.13)$$

$$H_C = \beta - \eta. \quad (7.14)$$

$$H = H_C \pm \varepsilon_H,$$

или

$$H = \beta - \eta \pm \varepsilon_H. \quad (7.15)$$

$$r_i \cos H = r \sin (180^\circ - A), \quad (7.16)$$

$$r_i = \frac{r \sin (180^\circ - A)}{\cos H}. \quad (7.17)$$

$$R_I \cos \Phi_I - r_i \sin H - \left(R_i + \frac{V_T}{V_I} r - \frac{V_T}{V_I} r_i\right) = n. \quad (7.18)$$

$$n = R_I \cos \Phi_I - \frac{r \sin (180^\circ - A) \left(\sin H - \frac{V_T}{V_I}\right)}{\cos H} - R_i - \frac{V_T}{V_I} r. \quad (7.19)$$

$$m = n \cos H, \quad (7.20)$$

или

$$m = \left(R_I \cos \Phi_I - R_i - \frac{V_T}{V_I} r\right) \cos H - \\ - r \sin (180^\circ - A) \left(\sin H - \frac{V_T}{V_I}\right). \quad (7.21)$$

С помощью этих уравнений и в соответствии со сделанными в начале параграфа предположениями можно вычислить результирующую ошибку наведения,

Порядок расчета

- 1-й шаг: используя уравнение (7.3), рассчитываем R_i .
Заметим, что A является параметром, а r — выбранная, фиксированная дальность. R_i есть фиксированный (заданный) параметр.
- 2-й шаг: по уравнению (7.6) рассчитываем Φ .
- 3-й шаг: по уравнению (7.7) находим λ .
- 4-й шаг: из уравнения (7.11) определяем δ .
- 5-й шаг: по уравнению (7.12) узнаем η .
- 6-й шаг: из уравнения (7.13) находим α .
- 7-й шаг: по уравнению (7.2) определяем β .
- 8-й шаг: из уравнения (7.15) находим H .
- 9-й шаг: по уравнению (7.21) определяем ошибку наведения m .

Численный пример

Пусть $R_i = 100$ морских миль

$$\Delta R_I = \pm 2 \text{ морские мили}$$

$$\Delta R_T = \pm 2 \text{ морские мили}$$

$$\varepsilon_T = \pm 0,02 \text{ рад.}$$

$$\varepsilon_I = \pm 0,02 \text{ рад.}$$

$$A = 90^\circ$$

$$\varepsilon_H = \pm 5^\circ$$

$$\frac{V_T}{V_I} = 0,6 \quad \frac{V_{Tc}}{V_I} = 0,58$$

$$r = 25 \text{ морских миль.}$$

Порядок вычислений

- $R_I = \sqrt{100^2 + 25^2} - 2 \cdot 100 \cdot 25 \cdot 0 = 103 \text{ мили.}$
- $\Phi_I = \arcsin \left(\frac{25 \sin 90}{103} \right) = \arcsin 0,2425 = 14^\circ.$
- $\lambda = 14 + 0,02 \cdot 57,3 - 0,02 \cdot 57,3 = 14^\circ.$
- $\delta = \arcsin \frac{(100 + 0,6 \cdot 25 + 2) \sin 14^\circ}{100 + 2 - (100 + 0,6 \cdot 25 + 2) \cos 14^\circ} =$
 $= \arcsin \frac{28,37}{102 - 113,5} = \arcsin (-2,465) = 112^\circ.$
- $\eta = 14 + 0,02 \cdot 57,3 - 90 + 112 = 37,2^\circ.$
- $\alpha = 180 - 14 - 112 = 54^\circ.$
- $\beta = \arcsin (0,58 \sin 54^\circ) = \arcsin (0,58 \cdot 0,81).$
 $\beta = \arcsin 0,47 = 28^\circ.$

$$8. \quad H = 28 - 37,2 - 5 = -14,2^\circ.$$

$$9. \quad m = (103 \cos 14^\circ - 100 - 0,6 \cdot 25) \cos 14,2^\circ - \\ - 25 \sin 90^\circ [\sin (-14,2^\circ) - 0,6] = \\ = -14,55 - 25 \cdot (-0,245 - 0,6) = 6,6 \text{ морских мили.}$$

Применение вышеизложенного метода не ограничивается только горизонтальной плоскостью. К случаю двух измерений можно привести и пространственную задачу при прямолинейном движении цели, производя все геометрические построения в плоскости, проходящей через направление движения цели и начальное положение перехватчика. При этом, конечно, необходимо принимать во внимание любые резкие изменения в характеристиках как цели, так и перехватчика, возникающие при наборе высоты и при пикировании. В случаях, когда перехватчик не в состоянии сохранить постоянную скорость во время крутого подъема, задача усложняется.

7.2. Влияние дальности действия самолетного радиолокатора на перехват быстролетающих целей в передней полусфере

Постановка задачи. Эта интересная задача из области исследования операций встречается в случае стрельбы самонаводящимся управляемым снарядом с самолета, когда требуется ответить на вопрос, можно или нельзя эффективно использовать данный комплекс, состоящий из перехватчика, самолетного радиолокатора и управляемого снаряда, для атаки в пределах передней полусферы. При этом особо важное значение имеет вопрос о дальности действия самолетного радиолокатора.

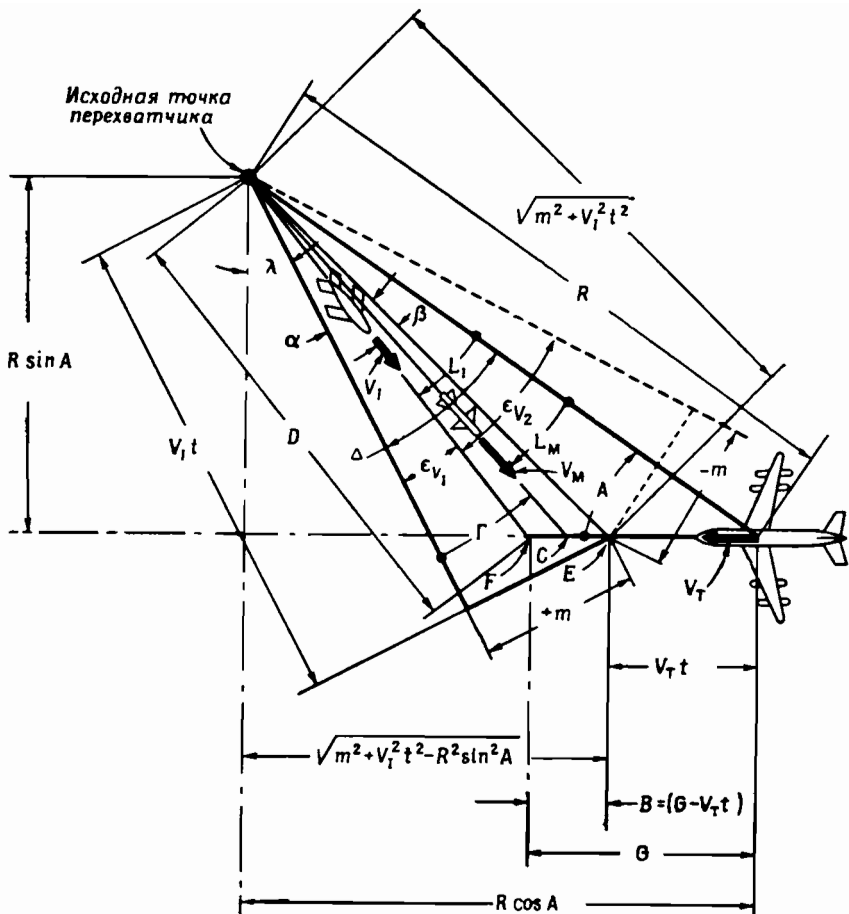
Даны:

1. Скорость перехватчика.
2. Скорость цели.
3. Скорость снаряда.
4. Ошибка наведения перехватчика.

Требуется определить:

1. Время, необходимое перехватчику для занятия положения, из которого можно произвести пуск снаряда в направлении встречи с целью.
2. Расстояние от перехватчика до цели в момент пуска снаряда.
3. Допустимое время после коррекции перехватчиком курсовой ошибки.
4. Максимальный угол раствора антенны.

Параметрами, подлежащими изучению, являются дальность действия самолетного радиолокатора и курсовой угол от цели на перехватчик (см. рис. 7.2).



Р и с. 7.2. Геометрия перехвата в передней полусфере.

- A — курсовой угол от цели на перехватчик (угла между направлением полета цели и начальной линией визирования „цель — перехватчик“).
- C — точка, в которую снаряд выстреливается в упрежденную точку с расстояния R .
- E — точка, в которую придет цель в тот момент, когда перехватчик достигнет положения, при котором результирующая линейная ошибка будет равна m .
- F — точка встречи перехватчика с целью в случае, когда перехватчик все время наводится точно по заданному курсу.
- m — ошибка наведения в морских милях.
- V_I — скорость перехватчика, *фут/сек.*
- V_M — скорость снаряда, *фут/сек.*
- V_T — скорость цели, *фут/сек.*
- L_I — угол упреждения перехватчика — угол между направлением движения перехватчика к месту встречи с целью и прямой, соединяющей перехватчик с целью.
- L_M — угол упреждения снаряда.
- γ — угловая ошибка наведения.

- t — время, необходимое для того, чтобы цель и перехватчик сблизилась на минимальную дистанцию промаха при условии, что перехватчик наводится непрерывно с результирующей ошибкой m .
- Γ — суммарная угловая ошибка, которую должен устранить перехватчик для того, чтобы произвести пуск снаряда в упрежденную точку.
- r — время, необходимое перехватчику для исправления курсовой ошибки Γ .
- Δ — угол раствора антенны самолетного радиолокатора, необходимый для того, чтобы „видеть“ цель на предельной дистанции обнаружения (угла между направлением движения перехватчика и линией визирования от перехватчика на цель).
- Z — дальность прямой видимости между перехватчиком и целью после исправления перехватчиком ошибки вывода на цель (соответствует дальности пуска снаряда).
- n — дальность полета снаряда до точки встречи с целью при условии, что пуск снаряда произведен в момент t .
- Δt — время полета снаряда до точки встречи с целью.
- r — радиус разворота перехватчика.

Предполагается, что:

1. Перехватчик наводится в упрежденную точку. Величина ошибки наведения такова, что если бы перехватчик все время наводился в упрежденную точку, то минимальное расстояние

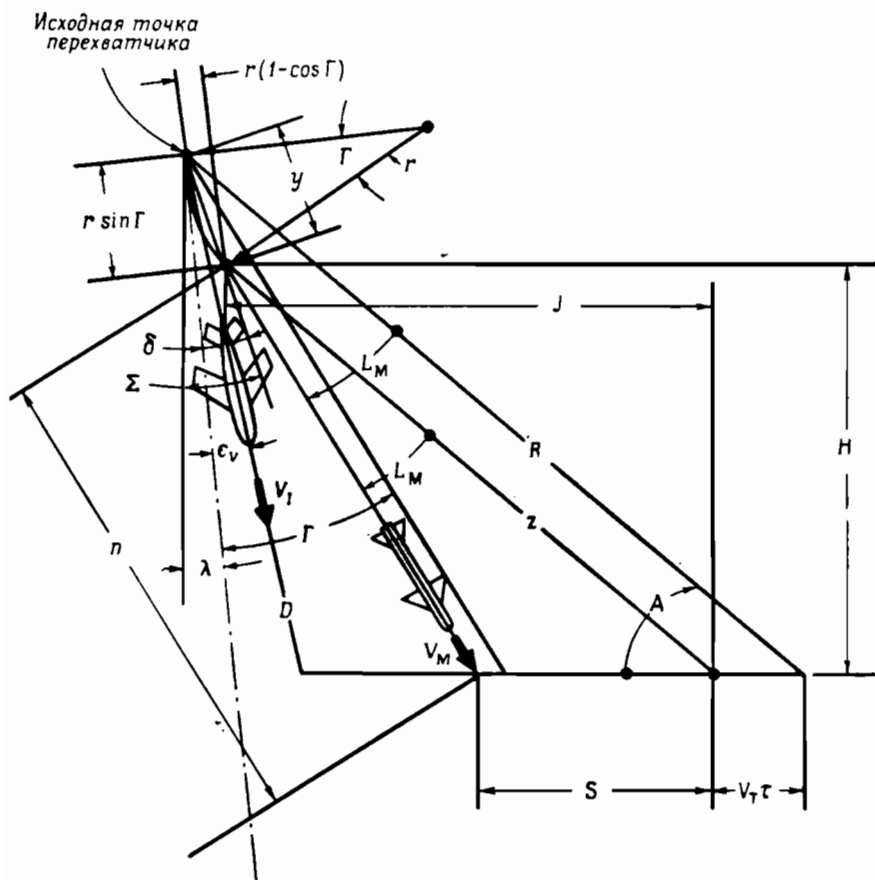


Рис. 7.3 Часть рис. 7.2.

между ним и целью составляло бы 3 морские мили. Это частное значение ошибки наведения выбрано лишь с целью иллюстрации метода анализа и не имеет особого значения.

2. Скорость разворота перехватчика в период коррекции курсовой ошибки постоянна и соответствует нормальному ускорению $2g$. Численное значение ускорения выбрано произвольно.

3. Скорость перехватчика постоянна; предположим, что она составляет $M = 0,85$.

4. Цель движется с постоянной скоростью $M = 0,8$.

5. Рассмотрение задачи перехвата ограничивается одной высотой, равной, предположим, 35 000 футов.

6. Направление движения снаряда до встречи с целью выбирается из условия, что средняя скорость снаряда равна $M = 1,8$.

7. Максимальный угол раствора диаграммы направленности антенны самолетного радиолокатора выбирается произвольно равным 60° .

Будут проанализированы случаи, когда дальность захвата цели самолетным радиолокатором равна 6, 7, 8, 10 и 12 милям. При этом будут рассмотрены значения курсовых углов от цели и перехватчик от 0° (встречные курсы) до 90° (пересекающиеся взаимно перпендикулярные курсы).

Решение

Из рис. 7.2

$$V_I \sin L_I = V_T \sin A,$$

или

$$L_I = \arcsin \left(\frac{V_T}{V_I} \sin A \right). \quad (7.22)$$

Аналогично

$$L_M = \arcsin \left(\frac{V_T}{V_I} \sin A \right). \quad (7.23)$$

Из рис. 7.2

$$D \sin L_I = G \sin A.$$

$$D \cos L_I + G \cos A = R,$$

или

$$D \cos L_I + \frac{D \sin L_I \cos A}{\sin A} = R, \quad (7.24)$$

откуда

$$D = \frac{R}{\cos L_I + \sin L_I \operatorname{ctg} A}. \quad (7.25)$$

Из рис. 7.2

$$\sqrt{m^2 + V_I^2 t^2 - R^2 \sin^2 A} + V_T t = R \cos A,$$

или

$$m^2 + V_I^2 t^2 - R^2 \sin^2 A = (R \cos A - V_T t)^2,$$

или

$$m^2 + V_I^2 t^2 - R^2 \sin^2 A = R^2 \cos^2 A - 2RV_T t \cos A + V_T^2 t^2,$$

$$2RV_T t \cos A + (V_I^2 - V_T^2) t^2 = R^2 - m^2,$$

$$t^2 + \frac{2RV_T t \cos A}{V_I^2 - V_T^2} = \frac{R^2 - m^2}{V_I^2 - V_T^2},$$

или

$$t + \frac{RV_T \cos A}{V_I^2 - V_T^2} = \pm \sqrt{\frac{R^2 - m^2}{V_I^2 - V_T^2} + \frac{R^2 V_T^2 \cos^2 A}{(V_I^2 - V_T^2)^2}},$$

$$t = -\frac{RV_T \cos A}{V_I^2 - V_T^2} \pm \frac{1}{V_I^2 - V_T^2} \sqrt{(R^2 - m^2)(V_I^2 - V_T^2) + R^2 V_T^2 \cos^2 A}. \quad (7.26)$$

Из рис. 7.2

$$\alpha = \arctg \frac{m}{V_I t}, \quad (7.27)$$

$$G = \frac{D \sin L_I}{\sin A},$$

$$B = G - V_T t = \frac{D \sin L_I}{\sin A} - V_T t. \quad (7.28)$$

Из рис. 7.2

$$\cos \beta = \frac{D^2 + m^2 + V_I^2 t^2 - B^2}{2D \sqrt{m^2 + V_I^2 t^2}}, \quad (7.29)$$

или

$$\beta = \arccos \left(\frac{D^2 + m^2 + V_I^2 t^2 - B^2}{2D \sqrt{m^2 + V_I^2 t^2}} \right). \quad (7.30)$$

Из рис. 7.2

$$\varepsilon_{V_1} = \alpha - \beta, \quad (7.31)$$

$$\varepsilon_{V_2} = -\alpha - \beta. \quad (7.32)$$

Из рис. 7.2

$$\Gamma = L_I - L_M + \varepsilon_V, \quad (7.33)$$

где Γ — суммарная угловая ошибка, которую должен устранить перехватчик, чтобы произвести пуск снаряда в упрежденную точку.

$$\tau = \frac{\Gamma}{\dot{\gamma}}, \quad (7.34)$$

где $\dot{\gamma}$ — скорость разворота перехватчика;

τ — время в секундах, необходимое для устранения ошибки прицеливания.

Из рис. 7.3

$$y = \sqrt{r^2 \sin^2 \Gamma + r^2 (1 - \cos \Gamma)^2},$$

откуда

$$y = r \sqrt{2(1 - \cos \Gamma)}. \quad (7.35)$$

$$\delta = \frac{\Gamma}{2}. \quad (7.36)$$

$$\lambda = 90^\circ - A - L_I - \varepsilon_r. \quad (7.37)$$

$$\Sigma = \lambda + \delta, \quad (7.38)$$

или

$$\Sigma = 90^\circ - A - L_I - \varepsilon_r + \frac{\Gamma}{2}, \quad (7.39)$$

$$H = R \sin A - y \cos \Sigma, \quad (7.40)$$

$$J = R \cos A - y \sin \Sigma - V_T \tau, \quad (7.41)$$

$$z = \sqrt{H^2 + J^2}, \quad (7.42)$$

$$\Delta = L_I + \varepsilon_r, \text{ — максимальный угол раствора антенны.} \quad (7.43)$$

Если предположить, что за время τ , необходимое перехватчику для коррекции ошибки прицеливания, изменение направления линии визирования пренебрежимо мало, то можно получить достаточно хорошее приближение для дистанции n :

$$n \cos L_M + S \cos A = z, \quad (7.44)$$

$$n \sin L_M = S \sin A. \quad (7.45)$$

Исключая S из (7.44) и (7.45), получим

$$n = \frac{z}{\cos L_M + \sin L_M \operatorname{ctg} A}, \quad (7.46)$$

$$\Delta t = \frac{n}{V_M}. \quad (7.47)$$

Порядок расчета

- 1-й шаг: подсчитываем углы упреждения L_I и L_M как функции курсового угла A , используя уравнения (7.22) и (7.23).
- 2-й шаг: пользуясь уравнением (7.25) и полученными в 1-м шаге величинами L_I и L_M , определяем D как функцию угла A .
- 3-й шаг: для каждого значения анализируемой дальности радиолокатора подсчитываем t как функцию угла A , используя уравнение (7.26) и величину ошибки наведения m , равной 3 морским милям.
- 4-й шаг: на основании уравнения (7.27) и величин t , полученных в предыдущем шаге, рассчитываем величины углов α .

- 5-й шаг: используя уравнение (7.28), величину D , полученную во 2-м шаге, и величины L_I из 1-го шага, определим B как функцию угла A .
- 6-й шаг: подставляя в (7.30) величины D , полученные во 2-м шаге, величины B , полученные в 5-м шаге, подсчитываем значения угла β .
- 7-й шаг: по уравнениям (7.31) и (7.32), подставляя в них величины α из 4-го шага и β из 6-го шага, определяем ε_V и ε_V' .
- 8-й шаг: по найденным значениям ε_V из 7-го шага, L_I и L_M из 1-го шага, из уравнения (7.33) находим значения Γ .
- 9-й шаг: по уравнению (7.34) и значениям Γ , полученным в 8-м шаге, определяем τ , используя заданную величину угловой скорости разворота перехватчика $\dot{\gamma} = 4,46$ град/сек, соответствующую нормальному ускорению $2g$.
- 10-й шаг: определяем радиус разворота перехватчика

$$r = \frac{V^2}{gn} = \frac{V^2}{2g}.$$

На высоте 35 000 футов скорость звука равна 973 фут/сек; скорость перехватчика $M = 0,85$. Следовательно, $V = 0,85 \cdot 973 = 827$ фут/сек. Теперь найдем r :

$$r = \frac{827^2}{2g} = 10\,660 \text{ футов.}$$

- 11-й шаг: подставляем в (7.35) значения Γ из 8-го шага, определяем y .
- 12-й шаг: определяем $\delta = \Gamma/2$.
- 13-й шаг: подставляя в (7.39) значения L_I из 1-го шага, ε_V из 7-го шага и Γ из 8-го шага, находим Σ как функцию угла A .
- 14-й шаг: из уравнения (7.40) определяем величины H .
- 15-й шаг: из уравнения (7.41) определяем значения J .
- 16-й шаг: из уравнения (7.42) определяем значения z .
- 17-й шаг: из уравнения (7.43) находим угол раствора антенны Δ .
- 18-й шаг: из уравнения (7.46) определяем n — дальность снаряда до встречи с целью при запуске его в момент времени τ .
- 19-й шаг: из уравнения (7.47) определяем Δt — время полета снаряда.

Примечание. Большой объем указанных вычислений свидетельствует о том, что для исследования динамики управляемых снарядов крайне необходимо использовать вычислительные машины.

Результаты

В результате этих расчетов получены графики, приведенные на рис. 7.4, 7.5, 7.6 и 7.7.

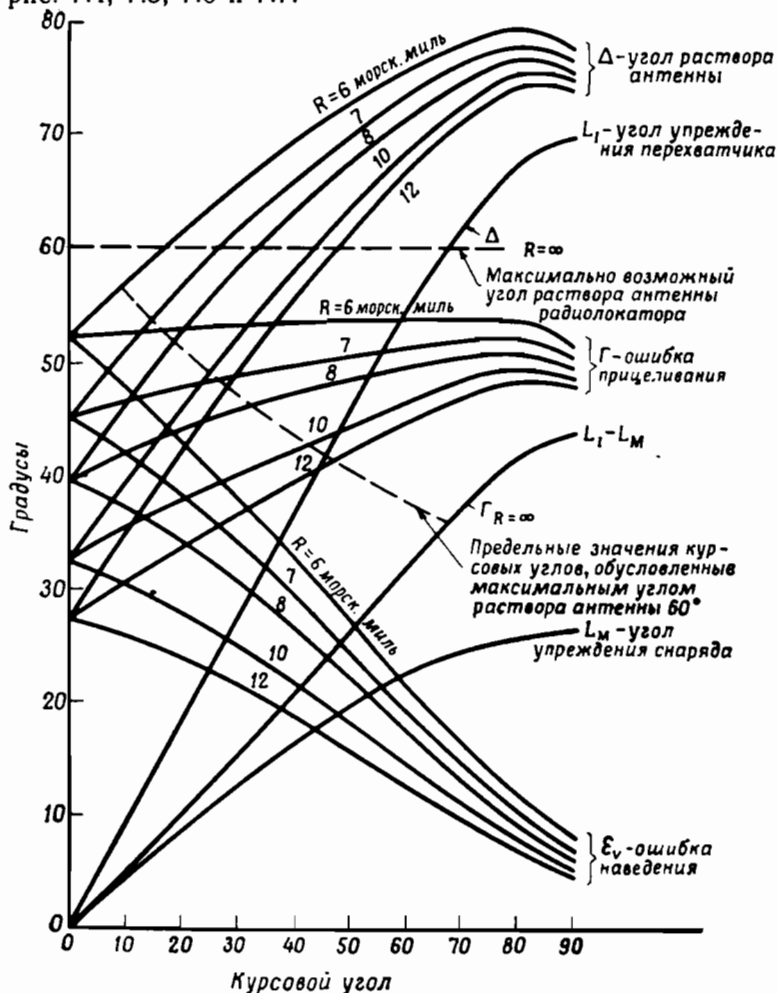


Рис. 7.4. Влияние курсового угла и дальности захвата радиолокатора на решение задачи перехвата.

На рис. 7.4 показано изменение угла раствора антенны Δ , ошибки прицеливания Γ и ошибки наведения ϵ_v . Все они являются функциями курсового угла A . Дальность захвата самолетного радиолокатора R взята в качестве параметра. Угол упреждения перехватчика L_I показан для бесконечно большой

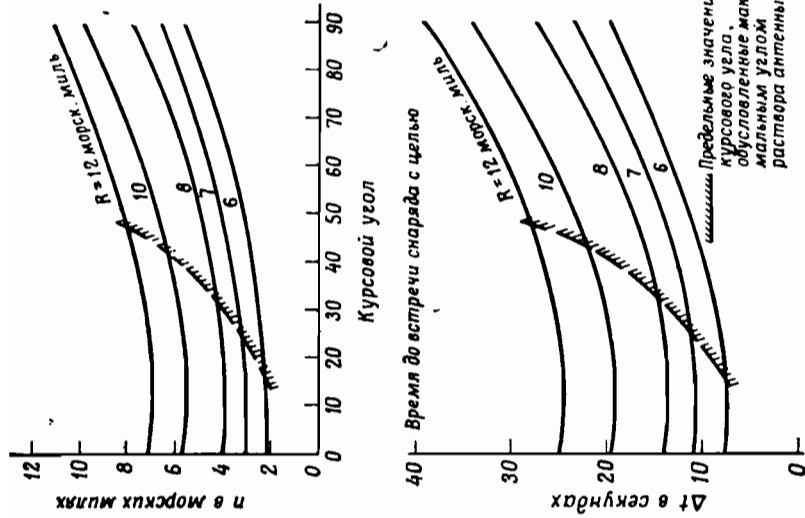


Рис. 7.6. Дальность полета снаряда до встречи с целью.

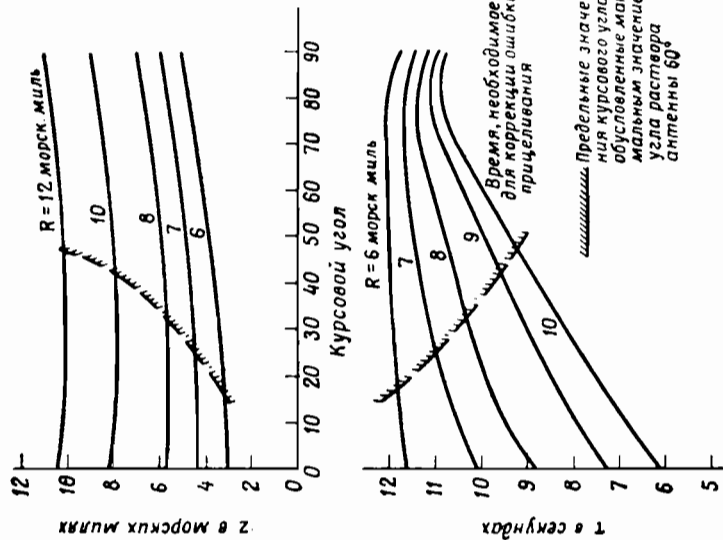


Рис. 7.5. Дальность прямой видимости после коррекции ошибки прицеливания (дальность выстрела снаряда).

дальности; в этом случае он равен углу раствора антенны. Точно так же угол упреждения снаряда L_m и ошибка прицеливания Γ вычислены для бесконечно большого R .

На графики рис. 7.4 наложена пунктирная кривая, соответствующая произвольно выбранному углу раствора антенны 60°

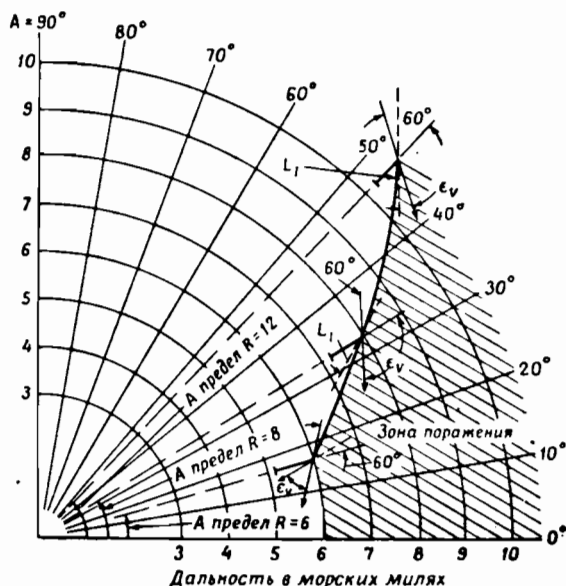


Рис. 7.7. Пределы курсовых углов в передней полусфере, обусловленные пределом угла раствора антенны самолетного радиолокатора в 60° .

и определяющая границу изменения углов A в передней полусфере. На рис. 7.7 эта граница перестроена в полярных координатах. Показаны направления движения перехватчика в упрежденную точку для различных дальностей с учетом и без учета ошибки наведения. Эти графики свидетельствуют о том, что увеличение дальности захвата в два раза приводит к увеличению предельных значений курсового угла A примерно в три раза. Существуют два очевидных способа расширить пределы этого угла.

Первый способ состоит в увеличении максимального угла раствора антенны радиолокатора за 60° . В рассматриваемом конкретном случае увеличение этого угла до 80° приводит к исчезновению указанной границы. Второй способ заключается в том, что снаряд наводится не в упрежденную точку, а по кривой погони; тем самым уменьшается угол упреждения, а следовательно, и угол раствора антенны.

На рис. 7.5 приведены графики времени, необходимые перехватчику для исправления ошибки прицеливания, а также графики дальности от перехватчика до цели после устранения этой ошибки (это есть также расстояние, с которого производится пуск снаряда).

На рис. 7.6 показаны дальность и время полета снаряда до встречи с целью. На каждом из графиков нанесена также граница изменения курсовых углов A , соответствующая углу раствора антенны в 60° . Из этих графиков видно, что минимальная дальность захвата цели, которую можно принимать во внимание, составляет 6 морских миль (для данного примера) вследствие сильного уменьшения курсовых углов от цели на перехватчик и малых дальностей полета до встречи с целью. Из рис. 7.6 следует также, что при дальности захвата в 6 морских миль дальность полета снаряда до встречи с целью составляет около 2 морских миль, что соответствует времени полета снаряда менее 8 сек. Увеличение дальности захвата до 12 морских миль приводит к соответствующему увеличению дальности полета снаряда до встречи с целью до 7 морских миль, а полетное время снаряда — примерно до 25 сек.

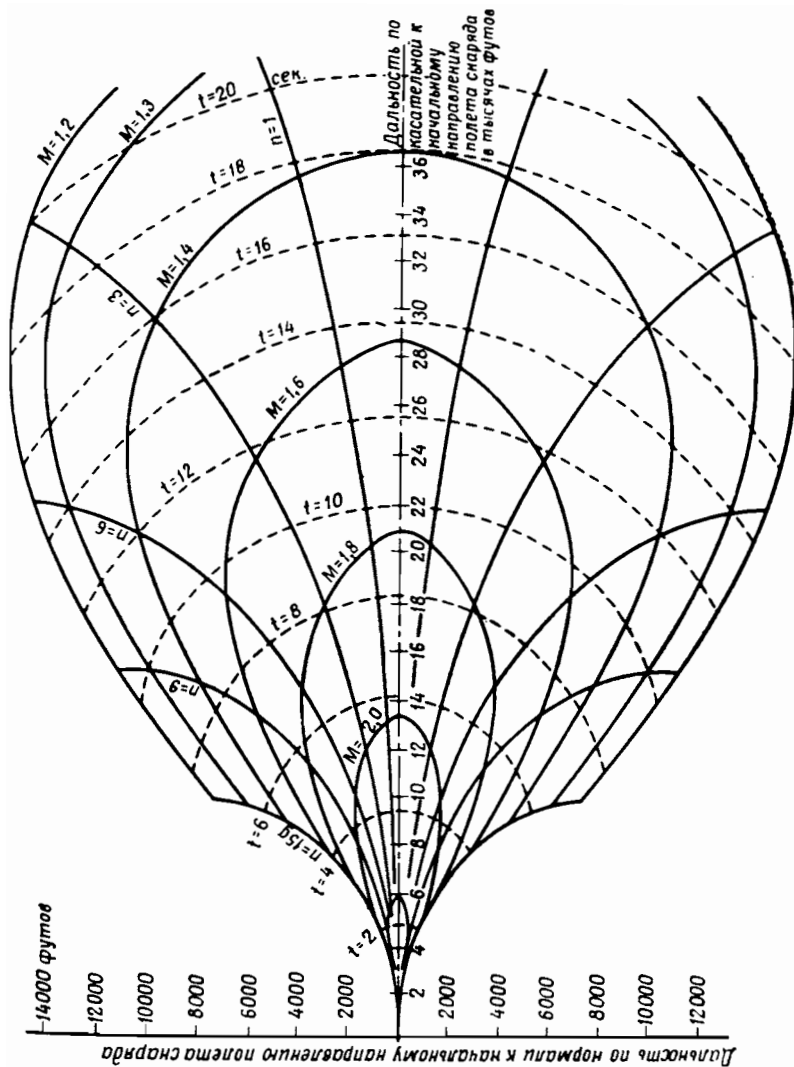
7.3. Зоны действия снаряда

Описание. Построение зон действия снарядов необходимо как основа для исследования операций в области перехвата целей. Эти зоны обычно строятся для различных фиксированных высот. На рис. 7.8 в качестве примера приведена зона действия для гипотетического снаряда, разгоняемого с помощью ускорителя и затем совершающего планирующий полет.

График показывает зависимость между дальностью по нормали и дальностью по касательной к начальному направлению полета снаряда, причем в качестве параметра взята маневренность (коэффициент перегрузки) n , выраженная в единицах g . На графике нанесены также линии чисел Маха и времени полета. С целью получения более реальных данных обычно считают необходимым учесть допуск на лобовое сопротивление для того, чтобы скомпенсировать влияние случайных движений снаряда и его органов управления, возникающих из-за действия «шумов» в системе управления.

Под термином «шумы» («помехи») здесь подразумеваются неконтролируемые системой возмущения.

Помехи создают громадные трудности в работе систем управления снарядами. Помехи в системе управления влияют на полет снаряда, поскольку они вызывают неконтролируемые перемещения управляющих поверхностей снаряда, что приводит к случайным колебаниям снаряда и к увеличению лобового

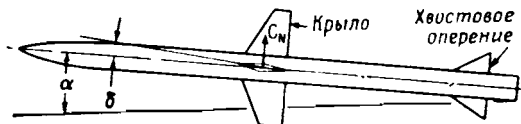


Р и с. 7.8. Зона действия снаряда.

сопротивления. Определение всех источников «шумов», которые могут повлиять на движение снаряда, а также их численная оценка являются важнейшей проблемой при проектировании систем управления снарядами.

Предположим, что такие данные имеются и при этом установлено, что наличие «шумов» приводит к увеличению лобового сопротивления на величину, равную индуктивному лобовому сопротивлению и соответствующую постоянному ускорению при маневре (перегрузке) в несколько g . Это значит, что мы добавили лобовое сопротивление, но не учли изменение маневренности, поскольку было установлено, что она аннулируется из-за своего случайного характера.

Предположим, например, что мы хотим построить траекторию полета снаряда для коэффициента перегрузки $6g$, приняв в качестве допуска на влияние помех величину $2g$.



Р и с. 7.9. Сверхзвуковой снаряд.

В этом случае мы рассчитываем траекторию для поперечных ускорений $6g$, однако расчет изменения числа Маха производим для лобового сопротивления, соответствующего ускорению $8g$.

Порядок построения. Пренебрегая влиянием кратковременных случайных изменений поперечного ускорения и предполагая, что снаряд стабилизирован по крену или обладает соответствующей способностью различать направление в пространстве, несмотря на наличие угловой скорости крена, можно определить характеристики снаряда на основе аэродинамических характеристик для установившегося режима.

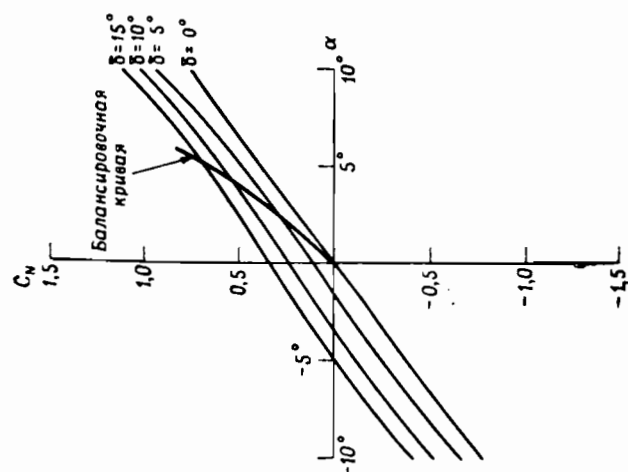
Для этого необходимы следующие данные:

1. Зависимость коэффициента подъемной силы от угла атаки при угле отклонения управляющих поверхностей (рулей) в качестве параметра (для соответствующих чисел M).

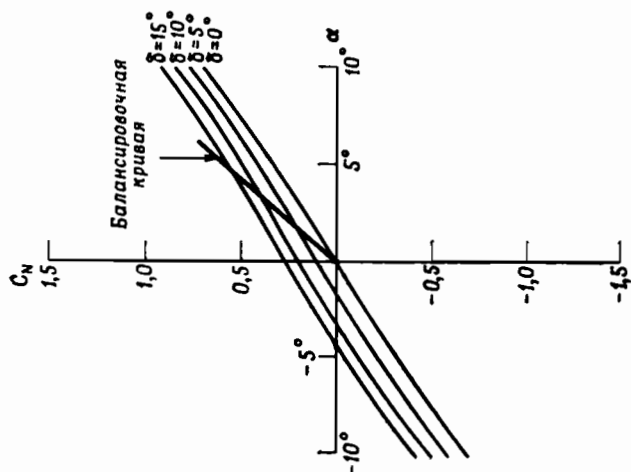
2. Коэффициент стабилизирующего момента по тангажу в функции угла атаки при угле отклонения управляющих поверхностей в качестве параметра (для соответствующих чисел M).

3. Коэффициент лобового сопротивления для нулевой подъемной силы в функции числа Маха.

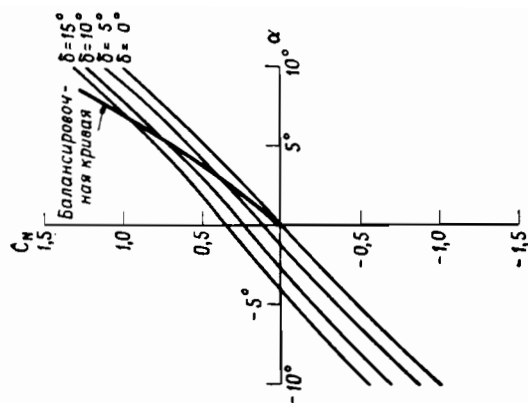
При определении величин (1) и (2) необходимо ввести соответствующую поправку на сжимаемость воздуха, если не окажется, что это влияние пренебрежимо мало.



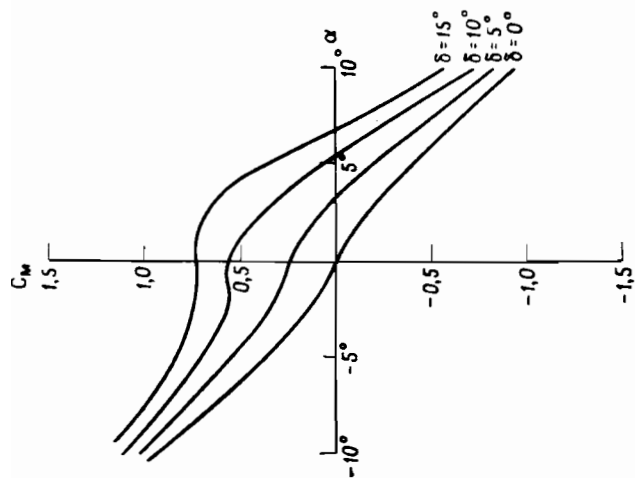
Р и с. 7.10. Коэффициент нормальной (подъемной) силы.
 Высота — 40 000 футов.
 $M = 1,25$.



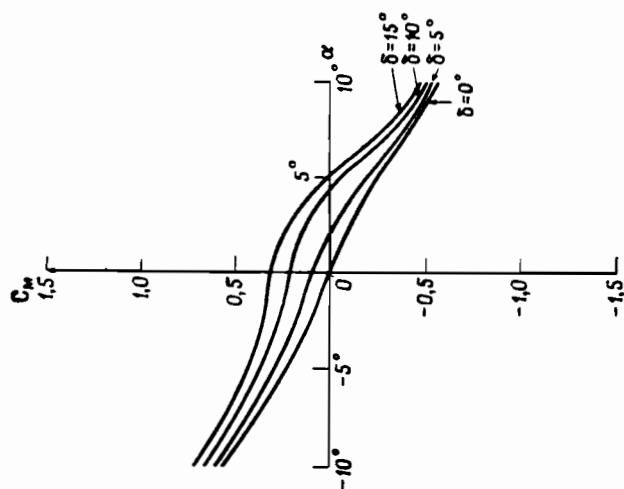
Р и с. 7.11. Коэффициент нормальной (подъемной) силы.
 Высота — 40 000 футов.
 $M = 1,75$.



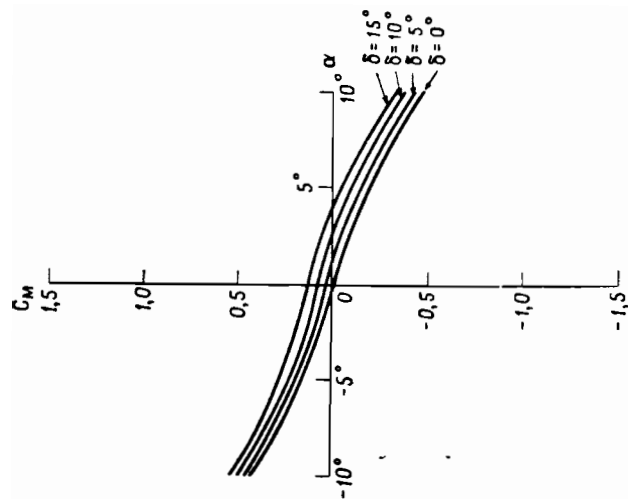
Р и с. 7.12. Коэффициент нормальной (подъемной) силы.
 Высота — 40 000 футов.
 $M = 2,25$.



Р и с. 7.13. Коэффициент стабилизирующего момента по тангажу.
Высота — 40 000 футов.
 $M=1,25$.



Р и с. 7.14. Коэффициент стабилизирующего момента по тангажу.
Высота — 40 000 футов.
 $M=1,75$.



Р и с. 7.15. Коэффициент стабилизирующего момента по тангажу.
Высота — 40 000 футов.
 $M=2,25$.

С целью иллюстрации сказанного предположим, что рассматривается сверхзвуковой снаряд типа, показанного на рис. 7.9. Предположим далее, что управление снарядом осуществляется путем изменения угла наклона крыльев и что конструкция его такова, что в установившемся режиме полета подъемная сила, создаваемая хвостовым оперением, пренебрежимо мала. Пусть α — угол атаки, а δ — угол наклона (поворота) крыльев. Типичные графики коэффициентов подъемной силы приведены на рис. 7.10—7.12.

Коэффициенты стабилизирующих моментов по тангажу показаны на рис. 7.13—7.15. Коэффициент лобового сопротивления изображен на рис. 7.16. Поскольку в установившемся режиме момент тангажа должен быть равен нулю, то установившиеся значения углов атаки, соответствующие каждому отклонению крыльев, можно определить по графикам момента тангажа в точках, где кривые пересекаются с горизонтальной осью.

Эти точки можно затем перенести на графики 7.10—7.12 для получения кривых, соответствующих установившемуся режиму.

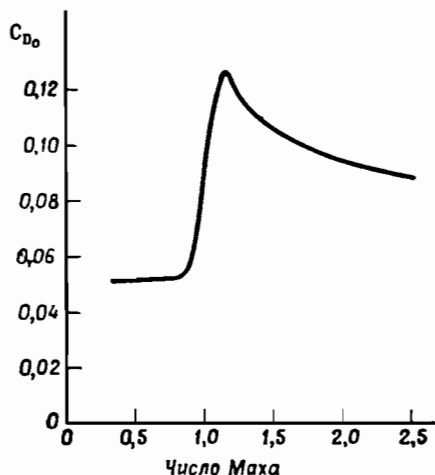


Рис. 7.16. Коэффициент лобового сопротивления снаряда.



Рис. 7.17.

Теперь нам осталось только определить зависимость коэффициента лобового сопротивления от угла поворота крыльев в установившемся режиме полета.

Мы проделаем это только приближенно по следующим причинам:

1. Наша основная цель состоит в том, чтобы проиллюстрировать метод построения зон действия снарядов. Более детальные

аэродинамические расчеты выходят за рамки данного раздела.

2. По сравнению с точностью определения лобового сопротивления, вызываемого помехами, аэродинамические ошибки, возникающие ввиду приближенного характера расчетов лобового сопротивления, невелики.

Для целей подсчета индуктивного лобового сопротивления предположим, что вся подъемная сила снаряда сосредоточена в центре давления крыла.

При таком допущении мы можем записать

$$C_D = C_{D_0} + C_N \frac{\alpha + \delta}{57,3}, \quad (7.48)$$

где $C_N \frac{\alpha + \delta}{57,3}$ — коэффициент индуктивного лобового сопротивления C_{Di} ;

C_{D_0} — коэффициент лобового сопротивления для нулевого угла атаки;

C_D — суммарный коэффициент лобового сопротивления; (α и δ взяты в градусах).

Мы можем сделать это потому, что составляющая коэффициента лобового сопротивления C_N есть $C_N \sin(\alpha + \delta)$, где $\alpha + \delta$ выражается в радианах. Отсюда лобовое сопротивление

$$D = C_D q S = \left(C_D + C_N \frac{\alpha + \delta}{57,3} \right) q S \quad (7.49)$$

и подъемная сила

$$N = C_N q S. \quad (7.50)$$

Скорость нашего гипотетического снаряда в период разгона может быть определена по следующей формуле:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{g}{W} (T - D), \quad (7.51)$$

где

V — скорость снаряда, *фут/сек*;

t — время, *сек*;

g — 32,16 *фут/сек²*;

W — вес снаряда в каждый данный момент времени, *фунты*;

T — тяга двигателя, *фунты*;

D — лобовое сопротивление, *фунты*;

q — скоростной напор $= \frac{1}{2} \rho V^2$, *фунт/фут²*;

S — площадь крыльев, *фут²*.

$$V = V_L + \int_0^t \frac{g}{W} (T - D) dt, \quad (7.52)$$

где V_L — скорость в момент выстрела. Уравнение (7.52) решается численным интегрированием.

Скорость на участке планирования можно приближенно определить по формуле:

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{g}{W_E} D, \quad (7.53)$$

где W_E — вес пустого снаряда в фунтах.
Таким образом,

$$V = V_{\max} - \frac{g}{W_E} \int D dt. \quad (7.54)$$

Наша задача — рассчитать траекторию для данной величины поперечного ускорения n . Из рис. 7.17 имеем

$$x = \int_0^t V \cos \gamma dt, \quad (7.55)$$

$$y = \int_0^t V \sin \gamma dt, \quad (7.56)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{gn}{V}, \quad (7.57)$$

$$\gamma = gn \int_0^t \frac{dt}{V}. \quad (7.58)$$

Порядок вычисления следующий:

- 1-й шаг: подсчитываем подъемную силу N , которая равна nW_E и считается постоянной во все время планирующего полета.
- 2-й шаг: по известной величине начальной скорости $V_{\max}$ и по известной высоте определяем $q = \frac{\rho}{2} V^2$, где
 q — скоростной напор, *фунт/фут²*,
 ρ — массовая плотность воздуха, *слэг*/фут³*.
- 3-й шаг: вычисляем $C_N = \frac{N}{qS}$, используя уравнение (7.50).
- 4-й шаг: подсчитываем число Маха $\frac{V}{C}$, где C — скорость звука.
- 5-й шаг: по кривым C_N , соответствующим найденному в предыдущем шаге числу Маха при величине C_N , подсчитанной в 3-м шаге, определяем значение угла атаки для установившегося режима и угол поворота

* Слэг (slug) — масса, которой сила в 1 фунт сообщает ускорение в 1 фут/сек². — *Прим. ред.*

крыльев δ . Графики C_N , о которых идет речь, получаются из графиков, подобных изображенным на рис. 7.10, 7.11 и 7.12, путем проведения соответствующих сечений с целью интерполяции для определения промежуточных значений чисел Маха.

6-й шаг: с графика на рис. 7.16 против найденного числа Маха считываем значение C_{D0} .

7-й шаг: используя уравнение (7.48), подсчитываем суммарный коэффициент лобового сопротивления C_D .

8-й шаг: используя уравнение (7.54), вычисляем $V = V_{\max} - \frac{g}{W_E} D \Delta t$, где Δt — малое приращение времени.

9-й шаг: по уравнению (7.58) вычисляем $\Delta \gamma = \frac{g^n}{V} \Delta t$, где Δt — та же самая величина приращения времени, что и в 8-м шаге.

10-й шаг: используя уравнения (7.55) и (7.56), подсчитываем $\Delta x = V \sin \gamma \Delta t$ и $\Delta y = V \cos \gamma \Delta t$. Начальное значение представляет собой, очевидно, $\Delta \gamma$, определенное из 9-го шага. Последующие значения γ будут суммами предыдущих значений $\Delta \gamma$.

11-й шаг: используя новое значение скорости, полученное в 8-м шаге, начинаем вновь расчет с 8-го шага и повторяем этот процесс много раз.

7.4. Диаграммы применения

Описание. Графики, подобные приведенным на рис. 7.8, удобно использовать для построения приближенных, но тем не менее близких к действительности диаграмм применения для

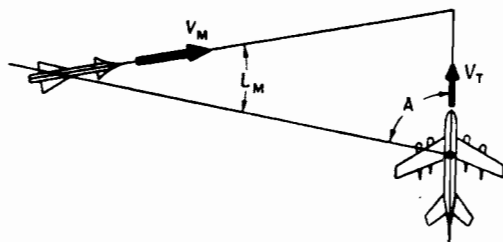


Рис. 7.18.

определенной высоты. Типичным примером такой диаграммы является рис. 4.3. Назначение ее — наглядно изобразить максимальные и минимальные дальности, с которых можно производить пуск снаряда и в пределах которых может произойти его встреча с целью.

Эти дальности представлены в функции угла между направлением движения цели и снаряда, причем охватывают пространство в 360° (атака спереди, сбоку, сзади, снова сбоку и снова спереди).

Порядок построения. Диаграмму, подобную изображенной на рис. 4.3, можно построить следующим образом:

1. Строим зону действия снаряда (такую, как на рис. 7.8) для высоты и числа Маха (в момент выстрела), для которых необходимо построить диаграмму применения.

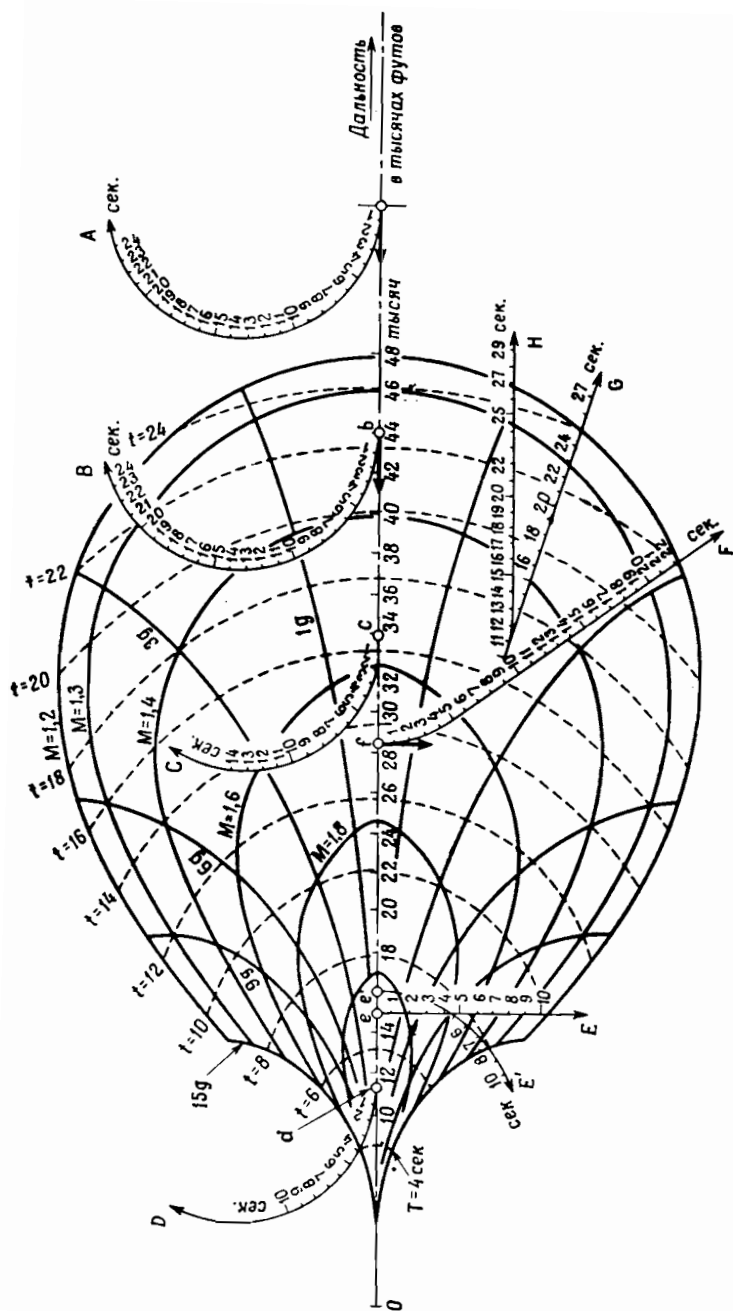
2. На листе кальки, пергамента или другой удобной прозрачной бумаги вычерчиваем траекторию полета цели. В качестве такой траектории обычно предполагается траектория выхода цели из-под обстрела, т. е. крутой разворот с учетом максимальной маневренности цели.

3. Вдоль построенной траектории полета наносим отметки времени определенной продолжительности. Эти отметки должны быть расположены достаточно близко друг к другу, так чтобы участки траектории между двумя любыми соседними отметками можно было с достаточной степенью точности представить в виде прямолинейных отрезков.

4. Накладываем траекторию полета цели, изображенную на прозрачной бумаге, на зону действия снаряда. Передвигаем прозрачный лист так, чтобы получить начальное относительное направление полета цели и снаряда. Добившись такого расположения, сдвигаем лист по направлению увеличения дальности, пока траектория полета цели не пересечет временной линии снаряда (пунктирная линия), показывающей время полета снаряда до момента встречи с целью (точка пересечения).

Рис. 7.19 представляет собой такой композиционный график зоны действия снаряда и характерной траектории полета цели, иллюстрирующий метод построения. В качестве примера рассмотрим траекторию, обозначенную буквой С. В момент времени, равный нулю (в момент пуска снаряда), цель находится как раз на расстоянии 34 000 футов от перехватчика, на встречном курсе, но уже выполняет разворот с перегрузкой $3g$ при скорости 800 *фут/сек.* Спустя 14 сек. от начального момента времени цель пересекает пунктирную линию, для которой $t = 14$. Это означает, что снаряд встретится с целью, поскольку из графика зоны действия снаряда следует, что снаряд способен достигнуть точки встречи за 14 сек., двигаясь по траектории, требующей от него маневра с перегрузкой, несколько большей чем $3g$ — вероятно, около $4g$.

В случаях, когда требуется большая точность, необходимо рассчитать промежуточные траектории снаряда или определить параметры этой траектории путем интерполяции по изображенному на графике кривым.



Р и с. 7.19. Диаграмма применения управляемого снаряда при перехвате воздушной цели.
 Высота — 20 000 футов; скорость цели — 800 фут/сек; маневренность цели — 3g.

Если мы предположим, что характеристики снаряда, соответствующие числам Маха, меньшим 1,2, неприемлемы с точки зрения управляемости, то тогда мы должны сделать допущение о том, что перехват цели невозможен за пределами кривой с надписью « $M=1,2$ », являющейся внешней границей зоны действия снаряда.

Отсюда совершенно ясно, что траектория *A* для цели безопасна.

Траектория цели *B* начинается на расстоянии 44 000 футов от перехватчика на встречном курсе и характеризуется перегрузкой 3g. Она пересекает внешнюю границу ($M=1,2$) в точке, соответствующей времени полета цели 23 сек. Поскольку временная линия снаряда проходит через эту точку пересечения как раз на 23-й секунде, то цель может быть перехвачена. Любое увеличение начальной дальности приводит к тому, что встречи с целью не произойдет. Поэтому точка *b* является максимальной дальностью действия снаряда при стрельбе на встречных курсах, и ее можно показать на диаграммах, подобных представленной на рис. 4.3. Она представляет собой максимальную дальность стрельбы по данной цели, движущейся на встречном курсе, на высоте, для которой построена диаграмма, если необходимо обеспечить встречу снаряда с целью при условии, что дальность действия радиолокатора системы самонаведения по крайней мере не меньше, чем указанная дальность.

Траектория полета цели *D* начинается на встречном курсе при начальной дальности около 11 000 футов; она пересекает границу, соответствующую перегрузке 15g, на 4-й секунде. Поскольку линия, соответствующая примерно 4 сек. полета снаряда, также проходит через точку пересечения, то снаряд, выпущенный на дальности 11 000 футов, может встретиться с целью.

На рис. 7.19 изображено несколько траекторий цели для пересекающихся курсов. Прямолинейная траектория цели *E* начинается на дальности почти 15 000 футов, цель движется в направлении, перпендикулярном линии визирования снаряд—цель. Она пересекает внешнюю границу ($M=1,2$) на 10-й секунде полетного времени цели.

Кривая, соответствующая 10-й секунде полета снаряда, также проходит через точку пересечения. При том же самом начальном направлении полета цели любая траектория, начинающаяся в точке *e* и поворачивающая в левую сторону рисунка, приводит к успешному уклонению цели от встречи со снарядом. Кривые же, отклоняющиеся в противоположном направлении (вправо), приводят к встрече снаряда с целью.

На первый взгляд, естественно было бы сделать заключение, что точка *e* представляет собой минимальную дальность для

пересекающихся курсов, равных 90° . Однако траектория полета цели E' , которая начинается на дальности почти 16 000 футов, составляющая вначале угол 90° с линией визирования и осуществляемая при перегрузке $3g$, пересекает границу, соответствующую $15g$, на 8-й секунде. Поскольку линия, соответствующая 8-й секунде полета снаряда, также проходит через эту точку пересечения, то очевидно, что снаряд может встретиться с целью, если он будет все время лететь с перегрузкой $15g$. Аналогичные же траектории, близкие к предыдущей, но берущие начало в точках, расположенных на меньшей дальности, чем точка e' , заканчиваются выходом цели из-под обстрела.

Большие дальности приводят к встрече снаряда с целью. Поэтому точка e' является нижним пределом дальностей для курсов цели, равных 90° , и как таковая может быть нанесена на графике, подобном представленному на рис. 4.3. Траектория цели F определяет максимальный предел дальностей для курса цели в 90° . Она пересекает внешнюю границу в точке, соответствующей 22 сек. полета цели. Линия, соответствующая 22-й секунде полета снаряда, также проходит через эту точку пересечения. Траектории, расположенные справа от линии F , такие, как G и H , заканчиваются встречей снаряда с целью. Заметим, что для траектории G встреча снаряда с целью происходит примерно на 23-й секунде, а для траектории H — немного больше чем через 24 сек. после начала полета.

Траектории, лежащие слева от линии F , заканчиваются встречей снаряда с целью. Траектории, составляющие 90° с линией визирования и начинающиеся на дальностях, больших чем f , закончатся выходом цели из-под обстрела. Имеется несколько траекторий цели, близких к G и H , берущих начало на дальностях, больших чем f , и заканчивающихся встречей со снарядом. Однако поскольку цель не обязательно должна лететь по указанным траекториям, то точка f представляет собой максимальную дальность, с которой можно произвести эффективный пуск снаряда по цели, двигающейся перпендикулярно к линии визирования.

Диаграмма, построенная на рис. 7.19, пригодна для случая перехвата днем. В этом случае перехватчик наводится на цель с помощью обычных радиолокационных средств и затем, используя оптические средства, летит по кривой погони. Таким образом, зоны действия снаряда, а также траектории полета цели ориентируются во всех этих случаях так, чтобы начальное направление движения снаряда совпадало с направлением на цель.

При перехвате ночью перехватчик использует свой радиолокатор для наведения на цель. Осуществляя это наведение, пи-

лот с помощью электронного счетно-решающего устройства пытаются вывести перехватчик в упрежденную точку.

Следовательно, в момент, когда производится выстрел, снаряд имеет более благоприятное начальное направление, чем в случае перехвата днем, который мы только что проиллюстрировали. Поэтому для построения диаграммы, подобной той, что изображена на рис. 4.3 и развита на рис. 7.19, в случае перехвата ночью необходимо рассчитать и использовать углы упреждения.

Ночной истребитель может наводиться либо по направлению встречи перехватчика с целью, либо по направлению встречи снаряда с целью. Во втором случае перехватчик наводится по направлению встречи снаряда с целью до того, как производится выстрел (см. рис. 7.18). Для встречи снаряда с целью необходимо, чтобы

$$V_M \sin L_M = V_T \sin A,$$

откуда

$$L_M = \arcsin \left(\frac{V_T}{V_M} \right) \sin A. \quad (7.59)$$

Порядок построения диаграмм в этом случае примерно такой же, как и в случае, представленном на рис. 7.19. Необходимо только поворачивать начальное направление на цель на углы, равные соответствующим углам упреждения L_M .

После того как полностью выбраны основные элементы системы управления, можно с помощью электронного вычислительного устройства рассчитать и построить более точные диаграммы, чем те, которые получаются в результате применения описанных выше сравнительно простых методов.

7.5. Использование методов исследования операций в области тактики применения снарядов

Пусть требуется определить количество снарядов, необходимое для получения желаемой вероятности поражения, при условии, что вероятность поражения при одном выстреле известна.

*Теоретические соображения*¹. Если система оружия испытывается большое число раз в примерно одинаковых условиях, то можно установить известную среднюю эффективность или вероятность положительного результата.

¹ Этот вопрос был исследован д-ром Чарльзом Г. Гарри в весьма талантливой статье, озаглавленной «Вероятность успеха, связанная с военными действиями небольшого масштаба». В данном разделе приводится его анализ с незначительными изменениями, позволяющими применить его к области управляемых снарядов.

Можно, например, определить, что винтовка дает 90% попаданий в цель определенного размера, находящуюся на определенном расстоянии от стрелка. В таком случае говорят, что средняя вероятность попаданий при этих условиях равна 0,9. Это число является, однако, средним, применимым к неограниченно большому числу выстрелов. При малом же количестве выстрелов математическое ожидание числа попаданий будет зависеть не только от средней вероятности, но и от количества произведенных выстрелов. В только что приведенном примере средняя вероятность промаха равна 0,1, следовательно, при двух выстрелах вероятность промахнуться дважды равна $(0,1)^2$, или 0,01. Отсюда доверительный уровень получения хотя бы одного попадания при двух выстрелах равен $1 - 0,01$, или 0,99. Это означает, что если рассчитывать на 99%-ную вероятность одного или более попаданий, то необходимо сделать два выстрела. В случае когда имеет место противодействие со стороны противника, средняя вероятность положительного результата должна быть еще более уменьшена.

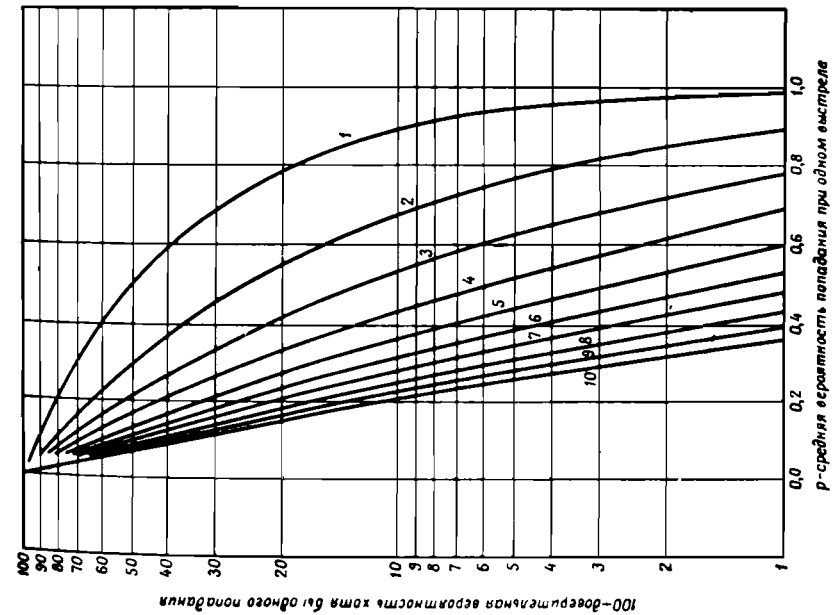
Излагаемый ниже материал позволяет построить несколько серий кривых (рис. 7.20—7.31), представляющих доверительные уровни для небольшого числа снарядов при наличии противодействия со стороны противника и без него, как для залпового огня, так и для случая стрельбы очередями. Хотя используемые здесь методы хорошо известны, однако графики такого типа в литературе обычно не встречаются.

Краткое изложение. Первая часть анализа касается средних результатов при большом количестве выстрелов. Графики, приведенные на рис. 7.30 и 7.31, изображают среднее количество целей, поражаемых хотя бы одним снарядом, при залповой стрельбе и стрельбе очередями при неограниченно большом числе выстрелов.

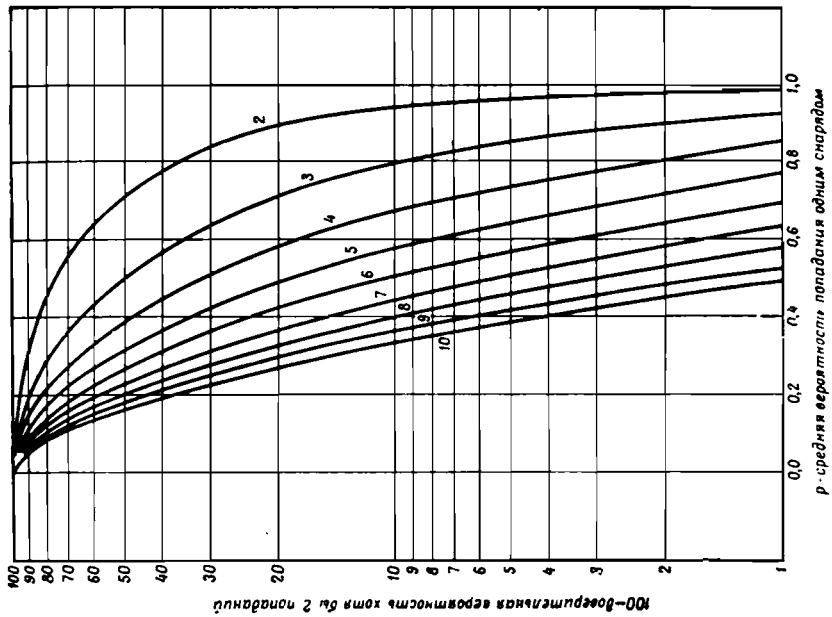
На рис. 7.31 показана зависимость между количеством снарядов в одном залпе и средней вероятностью хотя бы одного попадания. Все кривые построены для постоянных доверительных вероятностей¹ попадания. При большом количестве обстреливаемых целей эти вероятности представляют собой процент поражаемых целей.

График, изображенный на рис. 7.30, показывает средние результаты при стрельбе очередями. При построении этого графика предполагается, что огонь ведется до первого попадания. Среднее число снарядов, расходуемых на одну цель, представлено здесь как функция средней вероятности попадания. Эти кривые также справедливы для постоянного процентного

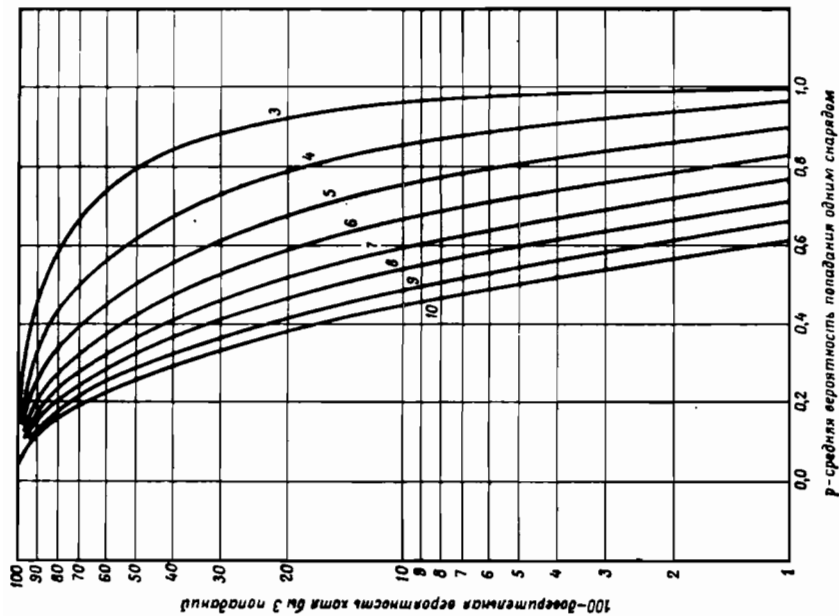
¹ В советской научной литературе при рассмотрении подобных вопросов обычно понятием «доверительная вероятность» не пользуются. — *Прим. ред.*



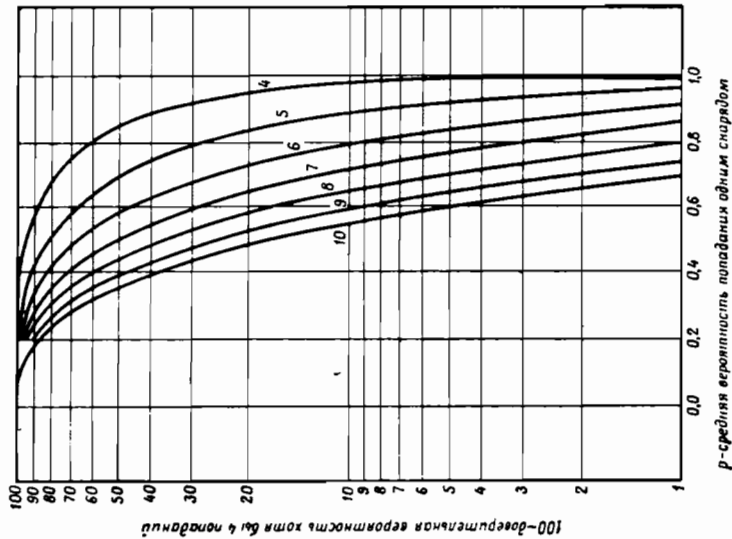
Р и с. 7.20. Количество снарядов, необходимое для получения хотя бы одного попадания.



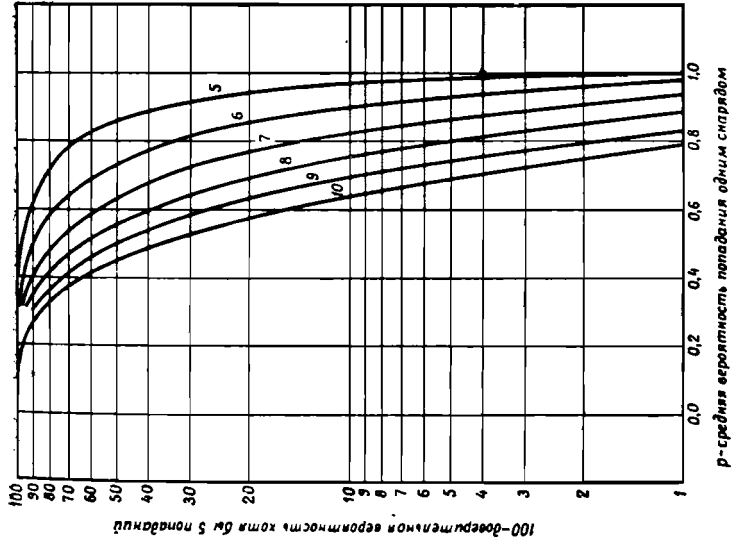
Р и с. 7.21. Количество снарядов, необходимое для получения хотя бы двух попаданий.



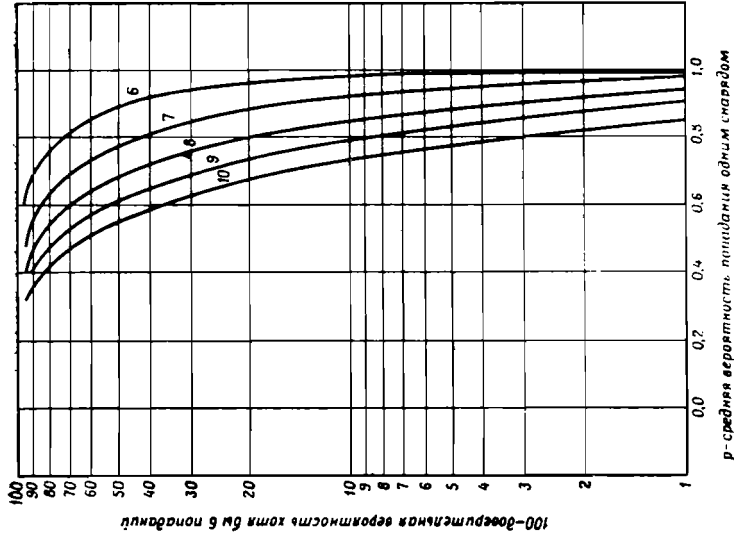
Р и с. 7.22. Количество снарядов, необходимое для получения хотя бы трех попаданий.



Р и с. 7.23. Количество снарядов, необходимое для получения хотя бы четырех попаданий.



Р и с. 7.24. Количество снарядов, необходимое для получения хотя бы пяти попаданий.



Р и с. 7.25. Количество снарядов, необходимое для получения хотя бы шести попаданий.

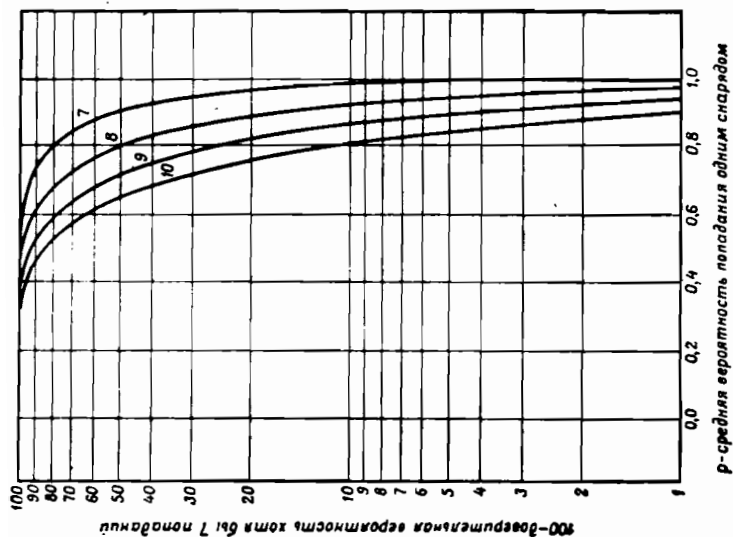


Рис. 7.26. Количество снарядов, необходимое для получения хотя бы семи попаданий.

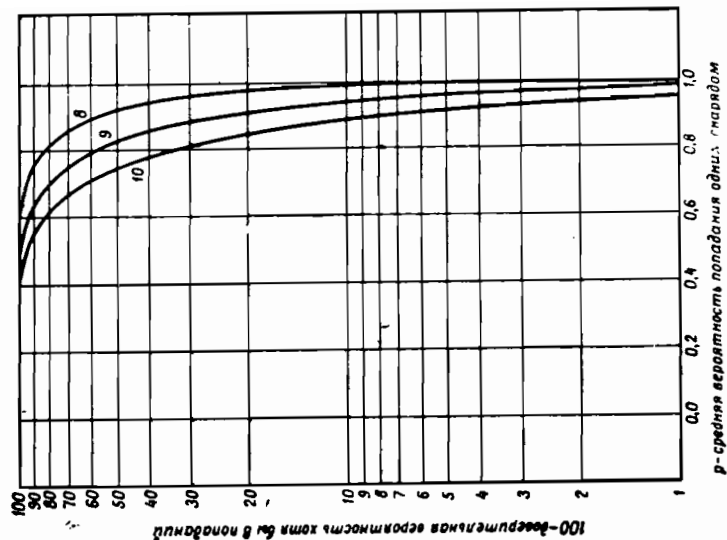
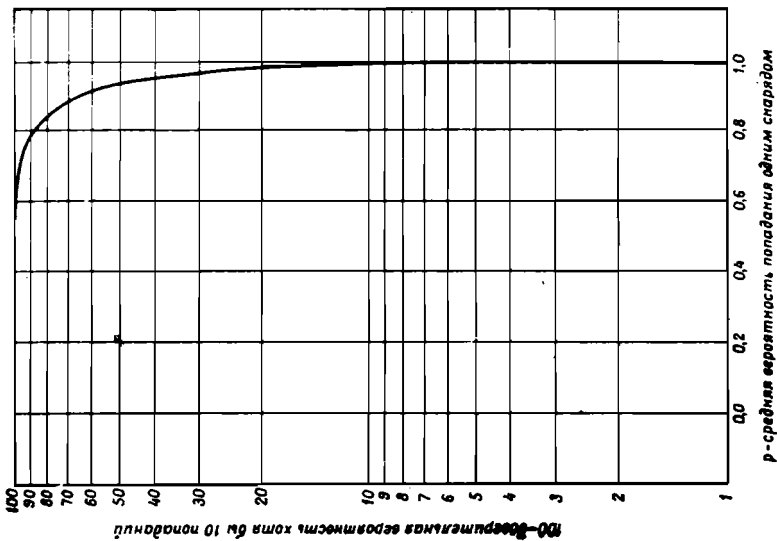
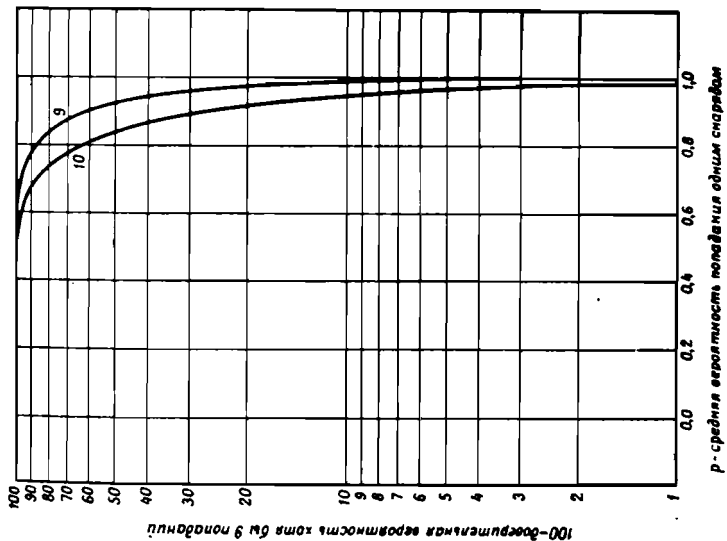


Рис. 7.27. Количество снарядов, необходимое для получения хотя бы восьми попаданий.



Р и с. 7.29. Количество снарядов, необходимое для получения хотя бы десяти попаданий.



Р и с. 7.28. Количество снарядов, необходимое для получения хотя бы девяти попаданий.

отношения поражаемых целей и применимы только для случая большого количества целей. При стрельбе очередями одни цели могут быть поражены с первого выстрела, другие — со второго и т. д.

Распределение снарядов, расходуемых на одно попадание, дается уравнениями (7.60) и (7.61). Соотношения, даваемые

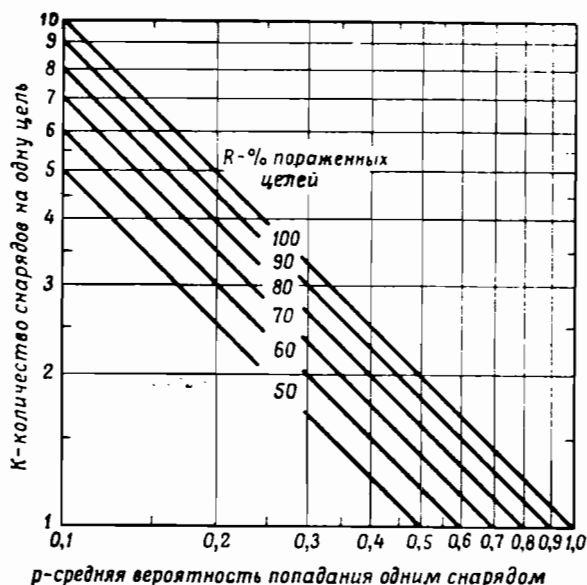


Рис. 7.30. Среднее количество снарядов, необходимое на одну цель при стрельбе очередями.

уравнением (7.60), справедливы для большого количества самолетов-носителей УРС, причем каждый из них вооружен управляемыми снарядами. Цифры, приведенные на графиках, показывают относительные частоты, при которых для нанесения поражения требуется один, два, три и больше снарядов. Сумма этих частот np есть общее количество попаданий, приходящихся на один самолет-носитель (p — средняя вероятность одного попадания). Среднее число попаданий, приходящихся на один снаряд, для всех самолетов-носителей равно, конечно, p .

При безграничном увеличении количества снарядов n , которыми вооружается каждый самолет-носитель, количество попаданий при выстреле одним снарядом, двумя снарядами и т. д. может быть определено по уравнению (7.61). Эти соотношения являются предельными для величин, получаемых из уравнения (7.60), при $n \rightarrow \infty$.

При использовании графиков, изображенных на рис. 7.30 и 7.31, мы имеем дело со средними значениями при большом количестве выстреливаемых снарядов.

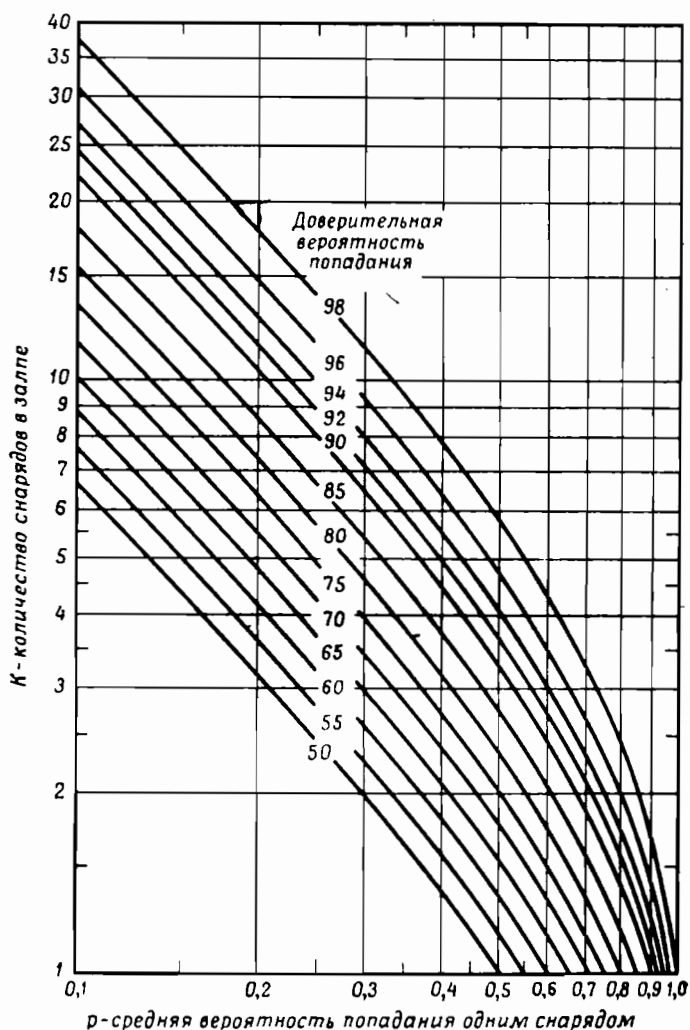


Рис. 7.31. Среднее количество снарядов в залпе для получения хотя бы одного попадания.

В тех же случаях, когда число выстреливаемых снарядов небольшое, необходимо учитывать доверительную вероятность, с которой можно ожидать попадания. Рис. 7.20—7.29 показывают доверительные уровни, выраженные через среднюю вероятность

попадания. На каждом графике проведены кривые для количества выстрелов от 1 до 10. Рис. 7.20 дает значение доверительной вероятности того, что будет зарегистрировано хотя бы одно попадание; рис. 7.21 показывает, что это случится по крайней мере дважды, и т. д. Используя эти графики, необходимо помнить, что средняя вероятность поражения при одном выстреле все время остается *постоянной*. Так может быть в случае залпового огня; при стрельбе же очередями в течение одного захода средние значения вероятностей могут изменяться под влиянием изменений положения снаряда и цели и расстояния между ними.

В последнем случае верхние и нижние пределы доверительной вероятности можно получить путем использования наибольших и наименьших значений средней вероятности p .

Графики, приведенные на рис. 7.20—7.29, могут быть использованы для случая, когда противник оказывает противодействие.

В этом случае используются две средние вероятности поражения. Первая вероятность относится к поражению, наносимому после того, как атакующий достигнет цели; вторая представляет собой среднюю вероятность того, что атакующий преодолет оборону, чтобы настичь цель. Пример такого двойного применения графиков рассматривается ниже.

Таким образом, эти графики позволяют быстро получать средние значения величин для крупных операций и доверительных вероятностей для боевых действий небольшого масштаба.

Выводы

1. Рассмотренные графики характеризуют единичное событие, например уничтожение цели снарядом. В случаях же, когда происходит одно за другим несколько событий, можно применить такие же методы, как в примере 2. Однако, когда цепь событий насчитывает более чем два события, при применении графиков приходится пользоваться методом последовательных приближений.

2. Графики нельзя применять для подсчетов в случаях, когда средние вероятности меняются в процессе последовательной стрельбы снарядами. В этом случае верхнюю и нижнюю доверительные границы можно получить, используя верхнее и нижнее значения вероятностей.

3. Хотя рассмотренные графики относятся к области стрельбы снарядами, их применение сравнительно нетрудно распространить и на другие области.

4. Когда стрельба ведется по небольшому количеству целей, нельзя утверждать, что такой-то процент их будет уничтожен. Можно израсходовать все имеющиеся снаряды и тем не менее

ни разу не поразить цель. Самое большее, что можно предсказать — это возможность или «доверительную вероятность» получения одного или более попаданий при данном количестве выстрелов.

По этой причине шкалы на рис. 7.20—7.29 начинаются с 99% доверительной вероятности поражения (1% возможности промаха), а не со 100%.

5. При исследовании операций обычно интересуются уничтожением цели, а не тем, сколько попаданий необходимо сделать, чтобы сбить цель. Число попаданий, необходимое для уничтожения данной цели, зависит от поражающей способности снаряда и уязвимости цели. Помня это обстоятельство, можно использовать приведенные в данном анализе графики, чтобы получить или вероятность уничтожения цели, или вероятность попадания, даже если показаны только цифры, характеризующие вероятность попадания.

Обозначения:

C — доверительная вероятность (мера надежности) уничтожения или попадания, в %;

G — число самолетов-носителей, ведущих стрельбу;

$K = \frac{N}{M}$ — количество снарядов, приходящихся на одну цель, (или на один залп);

M — общее число целей (или залпов);

N — общее число снарядов;

p — средняя вероятность уничтожения (попадания) при одном выстреле, когда количество выпускаемых снарядов велико. Также — «вероятность уничтожения (попадания) при одном выстреле»;

$q = 1 - p$ — вероятность того, что цель не будет уничтожена, если вероятность уничтожения равна p ;

R — процент уничтоженных (пораженных) целей.

Анализ. Если большое количество G самолетов-носителей выпускает по одному снаряду, то число поражений будет pG , а число промахов будет равно qG , где

p — средняя вероятность поражения одним снарядом;

q — вероятность того, что цель не будет поражена.

Если qG самолетов-носителей, которые промахнулись в первый раз, выстрелят по тем же целям второй раз, то число попаданий будет qGr , а число промахов — q^2G .

С другой стороны, если первоначальное количество самолетов pG , которым удалось поразить цели с первого выстрела, выберут себе новые цели и опять произведут выстрел, то они будут иметь p^2G попаданий и pqG промахов. Таким образом, после второго выстрела будет зарегистрировано суммарное количество

попаданий $(p + p^2 + pq)G = 2pG$. Из общего числа пораженных целей $(p + p^2)G$ будут сбиты первыми же снарядами, в то время как pqG целей потребуют двух снарядов каждая.

Следовательно, относительная частота поражений с первого выстрела и с двух выстрелов равна соответственно $1/2 + p/2$ и $q/2$.

Если процесс повторяется в условиях, когда каждый самолет-носитель выпускает снаряды один за другим до тех пор, пока цель не будет поражена, а затем выбирает себе другую цель, то среднее суммарное число поражений, приходящееся на один самолет-носитель, будет равно np , где n есть общее количество снарядов, израсходованных каждым самолетом-носителем.

Относительное распределение поражений при одном выстреле, при двух выстрелах и т. д. дается уравнениями (7.60).

В этом случае искомой величиной является как раз доверительная вероятность поражения одной цели при наличии только n снарядов. Поскольку такое поражение может быть нанесено с первого выстрела, со второго, с третьего и т. д., то ожидаемая величина, или вероятность, представляет собой сумму n первых членов уравнения (7.61), а именно

$$C = 100(p + pq + pq^2 + \dots + pq^{n-1}) = 100(1 - q^n).$$

Это та же доверительная вероятность, которая имеет место в случае залповой стрельбы при n снарядах в одном залпе. В последнем случае математическое ожидание q^n показывает, что все n снарядов не попадут в цель, следовательно, математическое ожидание хотя бы одного поражения равно $(1 - q^n)$. Тем не менее если произвести большое количество залпов, то количество снарядов, приходящихся на каждую пораженную цель, равно $\frac{n}{1 - q^n}$, в то время как при стрельбе очередями количество снарядов на одну пораженную цель равно $1/p$.

График изменения n в зависимости от p для различных фиксированных значений C приведен на рис. 7.30.

Зависимость C от p для различных значений n показана на рис. 7.20. По этим же графикам можно найти количество снарядов, которое необходимо иметь при стрельбе очередями для того, чтобы обеспечить хотя бы одно поражение цели с данной доверительной вероятностью.

Вероятность q^n того, что при n снарядах в залпе не будет зарегистрировано ни одного поражения (n в данном случае — малое число), является особым случаем хорошо известного биномиального закона $(p + q)^n$. Отдельные члены разложения этой функции представляют собой в порядке их последовательности вероятность получения одного промаха, двух промахов и т. д. Доверительная вероятность получения не более $(n - r)$ прома-

хов равна сумме вероятностей получения ни одного промаха, одного промаха, двух промахов и т. д., вплоть до $(n - r)$ промахов, т. е. равна сумме $r + 1$ первых членов разложения $(p + q)^n$.

Число снарядов, необходимое для поражения	Относительное число поражений	
1	$p + \frac{1-p}{n}$	}
2	$q \left[p + \frac{1-2p}{n} \right]$	
3	$q^2 \left[p + \frac{1-3p}{n} \right]$	
⋮	⋮	
n	$\frac{q^{n-1}}{n}$	

(7.60)

Поскольку среднее число поражений для всех самолетов-носителей равно np , то среднее число поражений, приходящихся на один снаряд, равно p . Еще раз необходимо заметить, что выражение (7.60) справедливо только для большого числа самолетов-носителей.

При безграничном увеличении числа снарядов n число поражений, приходящихся на один снаряд, остается в среднем равным p , однако выражение (7.60) принимает вид

Число снарядов, необходимое для поражения	Относительное число поражений	
1	p	}
2	pq	
3	pq^2	
⋮	⋮	
n	pq^n	

(7.61)

Сумму определенного количества членов выражения (7.61) можно также использовать для предсказания числа поражений, которые можно ожидать при некотором заданном большом количестве снарядов N . Пусть M есть число целей, а K — отношение N к M , т. е.

$$K = \frac{N}{M} \text{ — количество снарядов, приходящееся на одну цель.} \quad (7.62)$$

Ожидаемое число поражений равно Np , так что процент пораженных целей R будет

$$R = \frac{100Np}{M} = 100Kp. \quad (7.63)$$

График зависимости K от p для различных значений показан на рис. 7.30.

Полученные выше величины применимы для случая, когда количество целей велико. Относительно же доверительной вероятности поражения любой отдельной цели ничего сказать нельзя. Доверительная вероятность, выраженная в процентах, определяется как

$$C = 100 \left[p^n + np^{n-1}q + \frac{n(n-1)p^{n-2}q^2}{2!} + \dots \right. \\ \left. \dots + \frac{n(n-1)\dots(n-r+1)p^{n-r}q^r}{r!} \right]. \quad (7.64)$$

Значения величины C использованы для построения графиков на рис. 7.20—7.29. Показанное на них наибольшее количество снарядов равно 10. Однако в случае необходимости можно легко построить и более полные графики.

Для случая залпового огня эти графики дают доверительную вероятность получения заданного количества поражений каждой цели при одном залпе. Для случая же стрельбы очередями, когда в одну цель попадают лишь один раз, эти графики дают доверительную вероятность поражения по крайней мере заданного количества целей. Однако снова необходимо заметить, что при этих расчетах для каждого снаряда берется одна и та же постоянная средняя вероятность p . Если p в процессе стрельбы меняется, то кривые дают доверительные вероятности только для верхнего и нижнего граничных значений p .

Применение графиков, изображенных на рис. 7.20—7.29, можно пояснить на следующих примерах.

Примеры

1. Снаряды «земля—воздух» выпускаются по цели один за другим, пока цель не будет поражена. Затем выбирается новая цель, и процесс повторяется.

Сколько снарядов необходимо иметь, чтобы обеспечить поражение не менее 3 целей с доверительной вероятностью 90%, если средняя вероятность попадания одним снарядом равна 0,6?

Из рис. 7.22 для $p = 0,6$ и величины «100 минус доверительная вероятность» = 10% находим, что требуемое число снарядов равно 7.

2. Небольшое количество снарядов класса «земля—земля» должно быть запущено по некоторой цели, для уничтожения которой достаточно 4 попаданий.

Подсчитано, что для данной высоты полета снаряда вероятность одного попадания равна 0,6. При определении этой величины учитывалась ошибка наведения на основном участке траектории, конфигурация цели, ошибка наведения на конечном участке траектории и т. д. Кроме того, прежде чем попасть в цель, снаряды должны преодолеть зону ПВО противника. Вероятность преодоления этой зоны для одного снаряда принимается равной 0,7. Спрашивается, какое наименьшее количество снарядов необходимо запустить, если доверительная вероятность успешного выполнения задачи должна быть равной 50%?

Здесь цифра «50%» представляет собой произведение вероятности получить хотя бы 4 попадания на вероятность пролета через зону заграждения.

Чтобы воспользоваться рис. 7.23 (количество снарядов, необходимое для получения хотя бы 4 попаданий) для вероятности 0,6, необходимо учесть, что доверительная вероятность попадания в цель не менее 4 раз зависит от того, какое число снарядов в конечном счете атакует цель. Если количество снарядов, пролетевших сквозь зону ПВО, равно 4, 5, 6, 7 и т. д., то этому количеству будет соответствовать определенное число атак цели. Соответствующую этому количеству доверительную вероятность можно найти из рис. 7.23 для $p = 0,6$ следующим образом:

Для 4 пролетевших снарядов: 100 — доверительная вероятность = 87; следовательно, доверительная вероятность = $100 - 87 = 13$.

Для 5 снарядов: 100 — доверительная вероятность = 66; следовательно, доверительная вероятность = $100 - 66 = 34$.

Для 6 снарядов: 100 — доверительная вероятность = 45,5; следовательно, доверительная вероятность = $100 - 45,5 = 54,5$.

Для 7 снарядов: 100 — доверительная вероятность = 29; следовательно, доверительная вероятность = $100 - 29 = 71$.

Пусть C_4 — доверительная вероятность (в %) того, что данное количество снарядов, которое пролетело через зону ПВО, дает 4 попадания.

C_P — доверительная вероятность (в %) пролета данного количества снарядов через зону ПВО.

Поскольку требуемая доверительная вероятность успеха (уничтожения цели) равна 50% и поскольку она представляет собой произведение вероятности получения не менее 4 попаданий на вероятность пролета через зону ПВО, то мы имеем

$$\frac{C_P}{100} \cdot \frac{C_4}{100} = \frac{50}{100}.$$

Следовательно,
для 4 пролетевших снарядов

$$\frac{C_P}{100} \cdot \frac{13}{100} = \frac{50}{100}, \quad \text{откуда} \quad C_P = \frac{100 \cdot 50}{13} = 386;$$

для 5 снарядов

$$\frac{C_P}{100} \cdot \frac{34}{100} = \frac{50}{100}, \quad \text{откуда} \quad C_P = \frac{100 \cdot 50}{34} = 147;$$

для 6 снарядов

$$\frac{C_P}{100} \cdot \frac{54,5}{100} = \frac{50}{100}, \quad \text{откуда} \quad C_P = \frac{100 \cdot 50}{54,5} = 91,7;$$

для 7 снарядов

$$\frac{C_P}{100} \cdot \frac{71}{100} = \frac{50}{100}, \quad \text{откуда} \quad C_P = \frac{100 \cdot 50}{71} = 70,5.$$

Полученные цифры представляют собой требуемые значения доверительной вероятности. Остается только определить, сколько снарядов потребуется в каждом случае. Поскольку при 5 и 4 пролетевших снарядах вероятность C_P превышает 100%, то мы должны заключить, что такое количество пролетевших снарядов приведет к тому, что общая вероятность поражения цели будет меньше 50%, следовательно, эти результаты должны быть отброшены как не удовлетворяющие условиям задачи.

Для нахождения количества снарядов, необходимых для того, чтобы 6 из них пролетели через зону заграждения с доверительной вероятностью 91,7%, можно воспользоваться рис. 7.25. Подпись под рис. 7.25 говорит о «количестве снарядов, необходимом для получения хотя бы 6 попаданий». Однако мы можем представить себе, что «6 попаданий» могут интерпретироваться как «6 событий» любого вида. Следовательно, мы можем применить этот график для 6 пролетов через зону ПВО:

$$100 - \text{доверительная вероятность} = 100 - 91,7 = 8,3.$$

Из рис. 7.25 (ордината 8,3, абсцисса 0,75) находим, что для рассматриваемого случая требуется не менее 10 снарядов. Это и есть искомое решение, которое приводит к следующей ситуации.

Выстреливаются 10 снарядов; 6 из них пролетают через зону ПВО с доверительной вероятностью 91,7%; четыре из шести попадают в цель с доверительной вероятностью 54,5%. Общая доверительная вероятность того, что цель будет уничтожена, составляет $0,917 \cdot 0,545 \cdot 100 = 50\%$.

Аналогично можно использовать рис. 7.26 для нахождения количества снарядов, которое необходимо для того, чтобы обес-

печить пролет семи из них через заградительный огонь с доверительной вероятностью 70,5%.

$100 - \text{доверительная вероятность} = 100 - 70,5 = 29,5$.

Из рис. 7.26 (ордината 29,5, абсцисса 0,75) находим, что требуется 9,5 снаряда. Поэтому мы опять должны иметь 10 снарядов. Эта цифра также является решением задачи, и она приводит к следующей ситуации.

Выстреливаются 10 снарядов; 7 из них пролетают через зону ПВО с доверительной вероятностью 77,5% (рис. 7.26); 4 из 7 снарядов попадают в цель с доверительной вероятностью 71%. Общая доверительная вероятность успеха равна $0,775 \cdot 0,71 \times 100 = 55\%$. Предположим теперь, что число пролетевших снарядов равно 8. Поступая так же, как и в предыдущих случаях, мы имеем такую последовательность решения задачи.

Из графика на рис. 7.23 для $p = 0,6$ и для 8 снарядов находим, что вероятность получения 4 попаданий равна $100 - 17,4 = 82,6\%$.

Следовательно, $\frac{C_p}{100} \cdot \frac{82,6}{100} = \frac{50}{100}$ и $C_p = \frac{100 \cdot 50}{82,6} = 60,5\%$,

что представляет собой требуемую доверительную вероятность пролета. По графику рис. 7.27 для ординаты $100 - 60,5 = 39,5$ и для величины $p = 0,75$ находим, что в данном случае требуется больше 10 снарядов.

Решения для 6 и 7 пролетов являются поэтому лучшими, причем случай, соответствующий 7 пролетевшим снарядам, имеет небольшое преимущество по сравнению с 6 пролетами вследствие несколько большей общей доверительной вероятности. Мы видим также, что дальнейшее увеличение количества пролетевших снарядов приведет к тому, что потребное количество снарядов будет больше, чем при 8 пролетах.

7.6. Вероятность поражения при одном выстреле

При определении вероятности поражения цели одним снарядом приходится учитывать очень большое число сложных факторов. Существует много комплексов управляемых снарядов и громадное разнообразие типов снарядов, поэтому обобщить их так, как этого хотелось бы, очень трудно.

Для самонаводящихся снарядов, запускаемых с самолета, вероятность поражения цели при одном выстреле определяется до некоторой степени следующими обстоятельствами:

1. Не каждый выпущенный снаряд встречается с целью. Для любой данной цели снаряд должен иметь распределение вероятностей промаха. Вот некоторые из факторов, определяющих это распределение:

а) отношение маневренности снаряда к маневренности цели;

- б) отношение скоростей цели и снаряда;
- в) динамические характеристики системы самонаведения;
- г) радиолокационные помехи (шумы);
- д) уровни насыщения системы самонаведения;
- е) отклонения в работе системы;
- ж) отклонение в момент выстрела;
- з) число целей и их конфигурация;
- и) дальность до цели в момент выстрела;
- к) точность выполнения элементов снаряда и системы управления;
- л) степень надежности.

2. Для каждой характерной цели распределение вероятности поражения как функции дистанции промаха зависит по крайней мере от следующих факторов:

- а) соотношения высот цели и снаряда в момент перехвата;
- б) характеристик боевого заряда;
- в) характеристик взрывательного устройства;
- г) высоты;
- д) уязвимости данной конкретной цели — самолета, обусловленной повреждениями корпуса, отказами в работе топливной системы, загоранием, разрушением двигательной установки, высокой восприимчивостью бомбовой нагрузки к детонации и выходом из строя экипажа.

Мы не будем здесь говорить о том, сколько потребовалось бы людей, различной техники и времени, чтобы получить все эти данные. Их нельзя также выразить наглядно несколькими простыми кривыми. Тем не менее допустим, что мы в самом деле располагаем приближенной информацией, подтверждающей, что дистанция промаха является случайной функцией, характеризуемой определенным стандартным отклонением.

Предположим далее, что это стандартное отклонение σ представляет собой дистанцию промаха, равную 25 футам, причем дистанция промаха есть кратчайшее расстояние от центра тяжести снаряда до фюзеляжа самолета-цели.

Обратимся теперь к рис. 6.15. Используя масштаб по горизонтальной оси $(\delta/\sigma)_{lim}$ (отношение отклонения к стандартному отклонению), находим, что для случая, когда отклонение равно стандартному отклонению ($\delta/\sigma = 1$), вероятность того, что дистанция промаха будет меньше стандартного отклонения 25 футов, равна 0,68. Для $\delta/\sigma = 2,0$ эта вероятность составляет около 0,96. Выбирая различные величины δ/σ , с помощью рис. 6.15 мы можем построить кривую, дающую зависимость указанной вероятности от дистанции промаха.

Рис. 7.32 представляет собой такую зависимость для стандартного отклонения 25 футов.

Предположим также, что мы располагаем серией кривых, подобных гипотетическим кривым, приведенным на рис. 7.33.

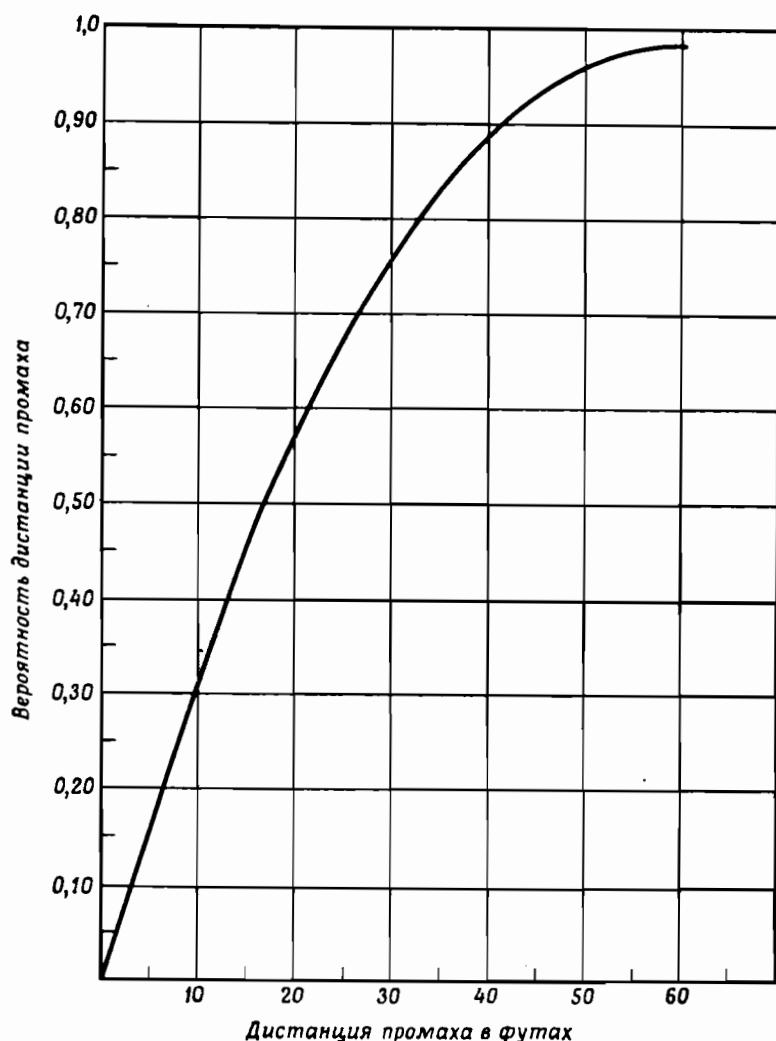


Рис. 7.32. Распределение дистанции промаха для стандартного отклонения 25 футов.

Здесь изображена вероятность поражения цели боевым зарядом в зависимости от дистанции промаха (для данного самолета и его бомбовой нагрузки и для определенной высоты). Положение боевой части в момент взрыва взято в качестве параметра.

Относительная высота все время остается постоянной. Аналогичные кривые можно построить для различных положений боевой части по отношению к цели.

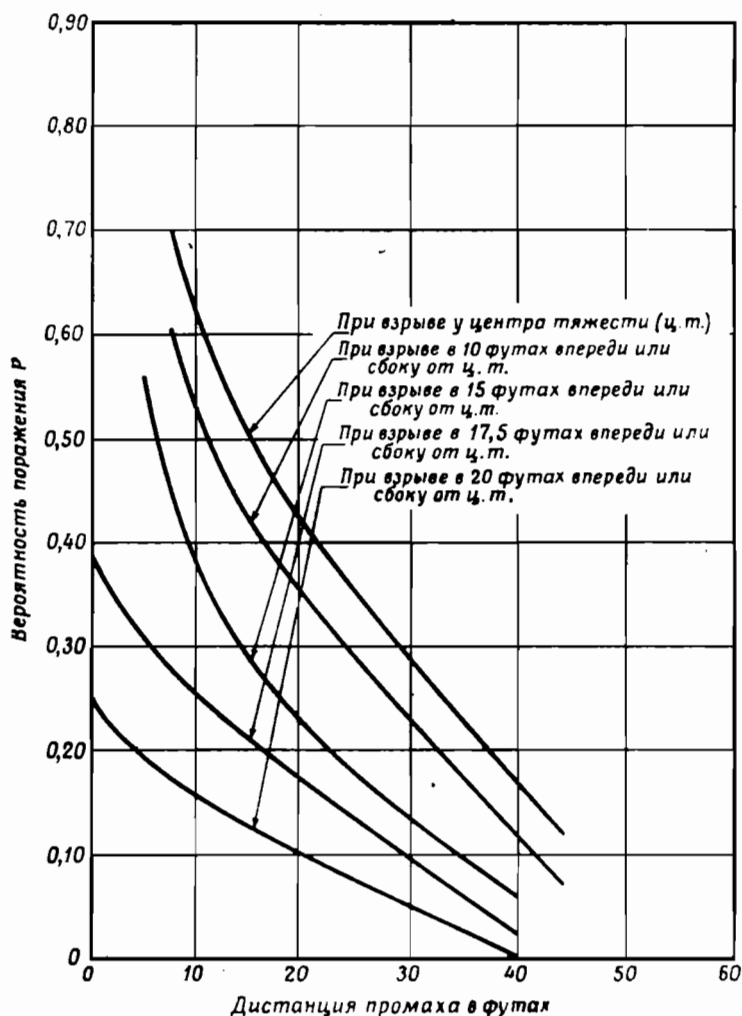


Рис. 7.33. Вероятность поражения самолета боевой частью (гипотетический случай).

Вероятности, получаемые из рис. 7.32 и 7.33, можно рассматривать как независимые друг от друга события. Поэтому к ним можно применить третий принцип Лапласа (§ 6.3). Произведение

вероятностей, полученных из рис. 7.32, на вероятности, определяемые из рис. 7.33, и дает вероятность поражения цели одним снарядом при принятых условиях.

7.7. Вероятность поражения цели комплексом управляемого снаряда

Определение суммарной вероятности поражения цели комплексом управляемого снаряда представляет собой еще более сложную задачу по сравнению со случаем, когда рассматривается только сам снаряд. Для системы противовоздушной обороны решение этой задачи будет зависеть по крайней мере от следующих факторов:

1. Эффективности системы дальнего обнаружения.
2. Вероятности обнаружения цели наземной радиолокационной станцией.
3. В случае авиационного снаряда — от распределения вероятностей для точности наведения перехватчика в выгодное положение для стрельбы.
4. Вероятности обнаружения цели самолетным радиолокатором.
5. Распределения вероятностей для направления снаряда в момент выстрела.
6. Распределения вероятностей для дистанции промаха.
7. Вероятности поражения цели боевой частью.
8. Вероятности того, что надежность комплекса будет равна 100%.
9. Вероятной эффективности контрмер противника.
10. Количества участвующих в налете самолетов, их пути движения и числа примененных снарядов.
11. Боевого порядка целей.

Все вышеуказанные факторы являются, по существу, независимыми друг от друга, так что общая вероятность поражения является произведением отдельных вероятностей.

7.8. Применение статистических методов к исследованию операций в области комплексов управляемых снарядов

Исследование операций применительно к комплексам управляемых снарядов изобилует благоприятными возможностями для успешного использования статистических методов. Вот некоторые конкретные области такого использования:

1. *Анализ контроля качества продукции, включающий изучение встречающихся отклонений от нормы, а также определение*

необходимых допусков для всех элементов снарядного комплекса. Эта область сама по себе очень обширна. Она охватывает такие вопросы, как определение допусков для отдельных элементов конструкции снаряда: допусков на кручение крыла и хвостового оперения, на неточность установки последних (перекос) и т. д.

Такого рода ошибки необходимо ограничить, чтобы не выйти за пределы максимально возможных коэффициентов усиления системы. В качестве примера рассмотрим проблему устранения крена.

Максимально допустимое значение коэффициента усиления системы по крену ограничивается из соображения устойчивости. Эти ограничения в свою очередь меняются с изменением высоты и числа Маха. Необходимо принять меры, чтобы конструктивные перекосы и скручивание не превосходили некоторых пределов, определяемых возможностями системы управления ограничивать угловые скорости крена или углы крена приемлемыми величинами. При решении таких задач неизбежно приходится пользоваться теорией вероятностей и статистикой.

2. Надежность снаряда, его составных частей и вспомогательного оборудования в возможных условиях применения. Объем усилий, которые могут быть и должны быть затрачены в этой весьма существенной области, поистине огромен. Без эффективного применения статистических методов большая часть этих усилий будет совершенно напрасной.

3. Оценка характеристик комплекса управляемого снаряда по таким показателям, как распределение дистанций промаха, вероятности попадания одним снарядом, характеристики обнаружения радиолокатора и т. д.

4. Материально-техническое обеспечение. Серьезная ошибка в этой области может привести к катастрофическим последствиям. Несмотря на техническое совершенство комплекса управляемого снаряда, слабость материально-технического обеспечения или серьезные ошибки в его планировании могут привести к проигрышу важнейшей операции или даже всей войны.

5. Совершенствование оружия. Анализ текущей и ожидаемой обстановки обеспечивает как бы «обратную связь», необходимую для того, чтобы ориентировать программу совершенствования оружия в обеспечивающем успех направлении. Исследование на этой стадии включает в себя координацию усилий по совершенствованию оружия таким образом, чтобы достичь возможно лучшего общего результата в кратчайшее время. При этом производится непрерывное сравнение расчетных характеристик со статистическими данными с целью так подобрать составные эле-

менты, чтобы характеристики комплекса не страдали от того, что не удалось вовремя создать элемент, соответствующий параметрам других элементов (например, если при разработке снаряда, предназначенного для стрельбы на определенную дальность, к намеченному сроку не удалось создать аппаратуру управления, рассчитанную на эту дальность, то от этого страдает весь комплекс).

Под статистическим анализом мы понимаем систематизированное и научное исследование экспериментальных данных, полученных на основе ограниченного количества опытов, с целью предсказать, как будет работать данный комплекс, и тем самым подтвердить или даже расширить выводы, сделанные ранее на основе только теоретического анализа.

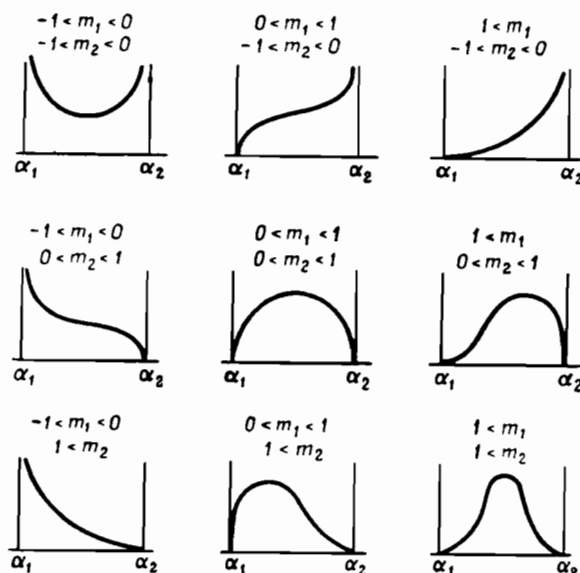


Рис. 7.34. Типичные формы кривых Пирсона I и II типа.

Обычно при этом решается целый ряд вопросов: выяснение того, следуют ли полученные данные определенному закону; выбор соответствующего закона; установление так называемой «степени надежности» или «степени соответствия», которая необходима для того, чтобы определить справедливость выбранного закона. Как только мы убедились, что рассматриваемые данные удовлетворительно подчиняются известному закону, мы можем с определенной степенью надежности предсказать исход будущих аналогичных опытов.

В предыдущих разделах в центре наших рассуждений лежали биномиальное, нормальное распределение и распределение

Пуассона. Хотя эти законы вполне применимы к решению многих инженерных задач, однако неизбежно, что для некоторых задач они не смогут обеспечить нужной нам точности решения.

Это приводит нас к необходимости рассмотрения эмпирических кривых. В свое время Карлом Пирсоном была разработана целая серия эмпирических кривых, имеющих большое значение. Он заметил, что и нормальный и биномиальный законы, и закон Пуассона — все они с достаточной степенью приближения удовлетворяют дифференциальному уравнению

$$\frac{1}{P} \cdot \frac{dP}{dn} = \frac{a+n}{b+cn+dn^2} \quad (7.65)$$

для серии значений постоянных величин a , b , c и d .

Пирсон рассмотрел все решения уравнения (7.65) — многие из них, как оказалось, не подчиняются указанным трем законам. Затем он выбрал такие решения, которые были бы достаточно простыми в алгебраическом смысле, чтобы из них можно было образовать семейство кривых для различных видов распределения.

Эти решения отличались друг от друга в зависимости от того, было ли выражение $(c^2 - 4bd)$ положительным, отрицательным или равным нулю.

Если $(c^2 - 4bd)$ положительно, то

$$P = k(n - \alpha_1)^{m_1} (n - \alpha_2)^{m_2}; \quad (7.66)$$

когда $(c^2 - 4bd)$ отрицательно, то

$$P = k[(n - \alpha)^2 + \beta^2]^m e^{-\gamma \arctan \frac{n - \alpha}{\beta}}; \quad (7.67)$$

когда $(c^2 - 4bd)$ равно нулю,

$$P = k(n - \alpha)^m e^{-\frac{\alpha + \epsilon}{n - \alpha}}. \quad (7.68)$$

Кроме того, имеется еще несколько вырожденных решений: когда d равно нулю, то

$$P = k(n - \alpha)^m e^{-\beta n}; \quad (7.69)$$

когда c и d равны нулю, то

$$P = ke^{-\beta(n - \epsilon)}. \quad (7.70)$$

Все константы в приведенных выше решениях, кроме постоянной интегрирования k , являются комбинациями величин a и b , c и d и, так же как последние, выбираются произвольно. Величина k должна быть выбрана так, чтобы площадь, лежащая ниже кривой, определяемой уравнением, была равна единице.

Рис. 7.34—7.36, взятые из книги [2], иллюстрируют типичные формы кривых Пирсона для четырех видов распределений, которые обозначены как тип I, тип II, тип III и тип IV. Кривые

Пирсона II типа выбраны для специального случая, когда $m_1 = m_2$. Кривые I типа соответствуют случаю $m_1 \neq m_2$. Тип IV соответствует частному случаю, когда $m = -1$. Тип III получается из уравнения (7.69). Характеристики этих четырех типов таковы:

Тип II: когда $n = a_1$ и $n = a_2$, P либо уменьшается до нуля, либо стремится к бесконечности в зависимости от знака показателя степени. Если $P = 0$, то оно будет равно нулю как при a_1 , так и при a_2 . Это происходит оттого, что в уравнениях, изображающих кривые II типа, показатели степени равны. Показатели степени не должны быть меньше -1 , иначе площадь под кривой не будет ограниченной.

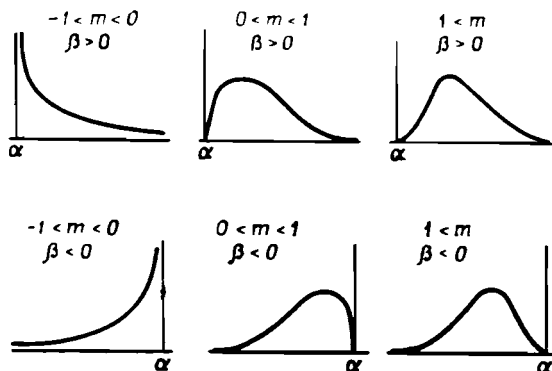


Рис. 7.35. Типичные формы кривых Пирсона III типа.

Тип I подчиняется тем же условиям, за исключением того, что ординаты левого и правого концов кривых будут неодинаковы. Один показатель степени может быть положительным, другой — отрицательным, так что на одном конце (при одном значении α) функция может быть равна нулю, а на другом (при втором значении α) — бесконечности. Вид кривых I и II типов зависит от того, в каких пределах находится величина m : $-1 < m < 0$; $0 < m < 1$ или $1 < m$. В первом случае кривая стремится к бесконечности на конечном участке; во втором случае функция становится равной нулю и кривая круто приближается к оси. В последнем случае функция тоже становится равной нулю, но при этом кривая приближается к оси постепенно. Высказанные выше соображения приводят к девяти различным конфигурациям кривых, как показано на рис. 7.34. Кривые II типа являются частными случаями кривых I типа, когда последние симметричны. Эти кривые охватывают большое разнообразие различных форм, но они ограничиваются случаями, когда величины m лежат между a_1 и a_2 . Рис. 7.35 иллюстрирует

кривые III типа. Можно заметить, что эти кривые ограничены только в одном направлении. Очертания этих кривых изменяются в зависимости от того, в каких пределах лежит величина m , а также от того, положительна или отрицательна величина β .

Кривые, соответствующие уравнению (7.67), простираются в бесконечность в обоих направлениях. Площадь, заключенная между этими кривыми и осью абсцисс, ограничена по величине лишь при $m < -\frac{1}{2}$. Выбрав $m = 1$, Пирсон записал уравнение

$$P = \frac{ke^{-\gamma \arctg \frac{n}{\beta}}}{1 + \frac{n^2}{\beta^2}}. \quad (7.71)$$

Кривые, построенные по уравнению (7.71), известны как кривые IV типа; они представлены на рис. 7.36. Как видно, свойства этих кривых зависят от того, имеют ли γ и β одинаковые знаки ($\gamma\beta > 0$) или противоположные знаки ($\gamma\beta < 0$).

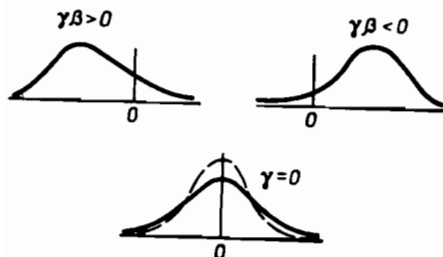


Рис. 7.36. Типичные формы кривых Пирсона IV типа.

Ни одна из этих кривых не является симметричной, есть лишь один вырожденный случай, соответствующий $\gamma = 0$, когда кривая симметрична. Кривая, соответствующая этому случаю, также показана на рис. 7.36, где для сравнения изображена (пунктиром) кривая нормального распределения.

Опыт показал, что кривые Пирсона могут быть подобраны так, что они обеспечат в большинстве случаев вполне удовлетворительное соответствие при обработке статистических данных.

Таблица 7.6 взята из книги [2]. В этой таблице приведены нормальный, биномиальный и Пуассоновский законы, четыре типа кривых Пирсона, а также ряд Грама—Шарлье — еще один удобный способ, который можно применить к большому количеству разнообразных данных.

Уравнения для определения постоянных констант для различных законов помещены в нижней части таблицы.

Теперь попытаемся более детально рассмотреть, как можно проанализировать эту серию статистических данных. С этой целью поставим следующую гипотетическую задачу: известные дистанции промаха тысячи снарядов, которыми произведена стрельба по цели определенного типа. Необходимо подобрать

кривую распределения для этих данных и оценить, насколько она справедлива.

Таблица 7.1

n	Наблюденная частота f	nf	n^2f	n^3f	n^4f
0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0
4	2	8	32	128	512
5	1	5	25	125	625
6	4	24	144	864	5 184
7	16	102	784	5 488	38 416
8	37	296	2 368	18 944	151 552
9	72	648	5 832	52 488	472 392
10	120	1 200	12 000	120 000	1 200 000
11	158	1 738	19 118	210 298	2 313 278
12	178	2 136	25 632	307 584	3 691 008
13	162	2 106	27 378	355 914	4 626 882
14	124	1 736	24 304	340 256	4 763 584
15	73	1 095	16 425	246 375	3 695 625
16	35	560	8 960	143 360	2 293 760
17	13	221	3 757	63 869	1 085 773
18	4	72	1 296	23 328	419 904
19	1	19	361	6 859	130 321
20	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0
	1 000	11 976	148 456	1 895 880	24 888 816

Дистанции промаха (n) записаны в первом столбце таблицы 7.1. Определенное число n означает наступление определенного события, т. е. показывает, что имеет место промах в n футов. Во втором столбце приведены частоты наступления этого события при проведении опытов. Так, например, против $n = 11$ указана наблюдаемая частота 158, означающая, что из 1000 выпущенных снарядов 158 имели дистанцию промаха 11 футов. В третьем столбце приведены произведения n на наблюдаемую частоту f . В четвертом столбце дано произведение n^2f , в пятом — n^3f и в шестом — n^4f . Сумма всех чисел, записанных во втором столбце, должна быть равна общему количеству выпущенных снарядов, поэтому в рассматриваемом случае она равна 1000. Среднее значение дистанции промаха $\bar{n}$ равно Σnf (сумме всех

чисел, стоящих в третьем столбце), деленной на общее количество выпущенных снарядов. Таким образом,

$$\bar{n} = \frac{\sum n f}{\sum f}. \quad (7.72)$$

Теперь определяем следующие выражения:

$$\mu_2(n) = \frac{\sum n^2 f}{\sum f}, \quad (7.73)$$

$$\mu_3(n) = \frac{\sum n^3 f}{\sum f}, \quad (7.74)$$

$$\mu_4(n) = \frac{\sum n^4 f}{\sum f}, \quad (7.75)$$

$$\mu_2(d) = \mu_2(n) - \bar{n}^2, \quad (7.76)$$

$$\mu_3(d) = \mu_3(n) - 3\mu_2(d) \cdot \bar{n} - \bar{n}^3, \quad (7.77)$$

$$\mu_4(d) = \mu_4(n) - 4\mu_3(d) \cdot \bar{n} - 6\mu_2(d) \bar{n}^2 - \bar{n}^4, \quad (7.78)$$

$$\sigma = \sqrt{\mu_2(d)}, \quad (7.79)$$

$$\beta_1 = \frac{[\mu_3(d)]^2}{[\mu_2(d)]^3}, \quad (7.80)$$

$$\beta_2 = \frac{\mu_4(d)}{[\mu_2(d)]^2}. \quad (7.81)$$

Уравнения (7.72)–(7.81) используются для определения $\bar{n}$, σ , β_1 , β_2 , которые необходимы для нахождения констант различных законов распределения.

Теперь определим, применим ли в данном случае биномиальный закон.

1-й шаг: вписываем в таблицу величины дистанций промаха n и наблюдаемые частоты, как это сделано в табл. 7.1 (столбцы 1 и 2).

2-й шаг: подсчитываем и вписываем в таблицу $n f$ (столбец 3).

3-й шаг: подсчитываем и вносим в таблицу $n^2 f$ (столбец 4).

4-й шаг: подсчитываем и записываем в таблицу $n^3 f$ (столбец 5).

5-й шаг: подсчитываем и записываем в таблице $n^4 f$ (столбец 6).

6-й шаг: суммируем по отдельности столбцы 2, 3, 4, 5 и 6.

7-й шаг: по уравнению (7.72) рассчитываем $\bar{n} = \frac{11\,976}{1000} = 11,976$.

8-й шаг: по уравнению (7.73) находим $\mu_2(n) = \frac{148456}{1000} = 148,456$.

9-й шаг: по уравнению (7.74) находим $\mu_3(n) = \frac{1896184}{1000} = 1896,184$.

10-й шаг: по уравнению (7.75) находим $\mu_4(n) = \frac{24888816}{1000} = 24888,816$.

11-й шаг: по уравнению (7.76) находим $\mu_2(d) = 148,456 - (11,976)^2 = 5,086$.

Теперь рассмотрим столбец, озаглавленный «Биномиальный закон» (табл. 7.6). Внизу этого столбца видим, что для применения этого закона необходимо знать σ и $\bar{n}$. Поскольку β_1 и β_2 не нужны, мы можем в данном конкретном случае обойтись без уравнений (7.77), (7.78), (7.80) и (7.81) и поступать далее следующим образом:

12-й шаг: по уравнению (7.79) находим $\sigma = \sqrt{5,086} = 2,255$.

13-й шаг: из нижней части столбца, озаглавленного «Биномиальный закон» (табл. 7.6), видим, что для определения констант необходимо использовать уравнения:

$$p = 1 - \frac{\sigma^2}{\bar{n}}, \quad (7.82)$$

$$m = \frac{\bar{n}}{p}. \quad (7.83)$$

Подсчитываем:

$$p = 1 - \frac{5,086}{11,976} = 1 - 0,425 = 0,575,$$

$$m = \frac{11,976}{0,575} = 20,85;$$

примем

$$m = 21.$$

14-й шаг: обратимся к таблице 7.6. В первом ряду столбца «Биномиальный закон» видим, что вероятность появления события n , $P(n)$ определяется как

$$P(n) = C_{21}^n p^n (1 - p)^{21-n}.$$

Подставляем в это выражение величины m и p из 13-го шага. Тогда

$$P(n) = C_{21}^n (0,575)^n (0,425)^{21-n}. \quad (7.84)$$

15-й шаг: составляем таблицу 7.2, используя для этой цели уравнение (7.84). Величины n записываем в первом столбце, биномиальные коэффициенты C_{21}^n — во втором (значения этих коэффициентов берутся из таблицы 7.4). Подсчитываем $(0,575)^n$ и записываем в третьем столбце таблицы; подсчитываем $(0,425)^{21-n}$ и записываем полученные значения в четвертом столбце. Пятый столбец представляет собой произведение столбцов 2, 3 и 4.

Таблица 7.2

n	C_{21}^n	$(0,575)^n$	$(0,425)^{21-n}$	$P(n)$
0	1	1,0	$0,1616 \cdot 10^{-7}$	$0,1616 \cdot 10^{-7}$
1	21	0,575	$0,38 \cdot 10^{-7}$	$0,458 \cdot 10^{-8}$
2	210	0,331	$0,893 \cdot 10^{-7}$	$0,62 \cdot 10^{-5}$
3	1 330	0,190	$0,21 \cdot 10^{-6}$	$0,53 \cdot 10^{-4}$
4	5 985	0,1093	$0,493 \cdot 10^{-6}$	$0,322 \cdot 10^{-3}$
5	20 349	0,06275	$0,1156 \cdot 10^{-5}$	$0,1476 \cdot 10^{-2}$
6	54 264	0,0361	$0,2722 \cdot 10^{-5}$	$0,532 \cdot 10^{-2}$
7	116 280	0,02075	$0,64 \cdot 10^{-5}$	0,0154
8	203 490	0,01193	$0,1505 \cdot 10^{-4}$	0,0365
9	293 930	0,00685	$0,353 \cdot 10^{-4}$	0,071
10	352 716	0,003935	$0,83 \cdot 10^{-4}$	0,1152
11	352 716	0,00226	$0,195 \cdot 10^{-3}$	0,1552
12	293 930	0,0013	$0,458 \cdot 10^{-3}$	0,175
13	203 490	0,000746	$0,1077 \cdot 10^{-2}$	0,1636
14	116 280	0,000431	$0,253 \cdot 10^{-2}$	0,1266
15	54 264	0,0002475	$0,594 \cdot 10$	0,0798
16	20 349	0,000142	0,014	0,04045
17	5 985	$0,816 \cdot 10^{-4}$	0,0326	0,01595
18	1 330	$0,469 \cdot 10^{-4}$	0,0768	0,00479
19	210	$0,2695 \cdot 10^{-4}$	0,1807	0,00102
20	21	$0,155 \cdot 10^{-4}$	0,425	0,000138
21	1	$0,89 \cdot 10^{-5}$	1,0	$0,89 \cdot 10^{-5}$

16-й шаг: составляем таблицу 7.3 следующим образом. В первом столбце записываем величины n , во втором — частоты наблюдаемых событий f ; величины $P(n)$ вероятности появления вписываем в третий столбец таблицы. Умножаем числа, стоящие в третьем столбце, на число снарядов (1000) и вписываем в четвертый столбец. Полученные значения представляют собой ожидаемые частоты. Подсчитываем разности между числами, стоящими во втором и четвертом столбцах, и полученные значения вписываем в пятый столбец таблицы как отклонения. Возводим в квадрат каждое отклонение, записанное в пятом столбце, и делим на соответствующую ожидаемую частоту из четвертого столбца. Полученные величины дивергенций записываем в шестой столбец.

17-й шаг: суммируем все числа, стоящие в шестом столбце. Эта сумма обычно обозначается как χ^2 . Чем больше

величина χ^2 , тем хуже совпадение кривой с экспериментальными данными. На базе величины χ^2 можно установить критерий, который определяет степень совпадения («приемлемость»), выраженную через значение вероятности.

• Недостаток места не позволяет дать нам полный вывод и объяснение этого χ^2 -критерия, который достаточно подробно изложен в книге [2]. В принципе он сводится к следующему: если повторять опыт несколько раз, то какова будет вероятность того, что полученная при этом новая величина χ^2 превзойдет то ее значение, которое получено из нашего данного опыта? Чем больше эта вероятность, тем лучше кривая совпадает с опытными данными.

Эта вероятность записывается в виде $P(>\chi^2)$ и читается как вероятность того, что величина будет больше чем χ^2 . Она является функцией χ^2 и так называемого числа степеней свободы.

Таблица 7.3

n	Наблюденная частота f	Биномиальный закон $P(n)$	Ожидаемая частота	Отклонение δ	Дивергенция $\delta^2/\text{ожидаемая частота}$
0	0	$0,1616 \cdot 10^{-7}$	$0,162 \cdot 10^{-4}$	$-0,162 \cdot 10^{-4}$	$0,162 \cdot 10^{-4}$
1	0	$0,458 \cdot 10^{-6}$	$0,458 \cdot 10^{-3}$	$-0,458 \cdot 10^{-3}$	$0,458 \cdot 10^{-3}$
2	0	$0,62 \cdot 10^{-5}$	$0,62 \cdot 10^{-2}$	$-0,62 \cdot 10^{-2}$	$0,62 \cdot 10^{-2}$
3	0	$0,53 \cdot 10^{-4}$	0,053	-0,053	0,053
4	2	$0,322 \cdot 10^{-3}$	0,322	1,678	8,74
5	1	$0,1476 \cdot 10^{-2}$	1,48	-0,48	0,1555
6	4	$0,532 \cdot 10^{-2}$	5,32	-1,32	0,3275
7	16	0,0154	15,4	0,60	0,0234
8	37	0,0364	36,5	0,50	0,0068
9	72	0,071	71,0	1,0	0,0141
10	120	0,1152	115,2	4,8	0,1996
11	158	0,1552	155,2	2,8	0,0505
12	178	0,175	175,0	3,0	0,0514
13	162	0,1636	163,6	-1,6	0,0516
14	124	0,1266	126,6	-2,6	0,0533
15	73	0,0798	79,8	-6,8	0,580
16	35	0,04045	40,45	-5,45	0,735
17	13	0,01595	15,95	-2,95	0,546
18	4	0,00479	4,79	-0,79	0,1305
19	1	0,00102	1,02	-0,02	0,0004
20	0	0,000138	0,14	-0,14	0,14
21	0	$0,89 \cdot 10^{-5}$	0,0089	-0,0089	0,0089
					11,874

Заметим, что m , число всех возможных событий, в нашей задаче было равно 21. Когда мы добиваемся согласования кривой с экспериментальными данными, мы требуем, чтобы было полное совпадение с данными по следующим трем характеристикам: общее количество благоприятных исходов, величины σ и ρ . Число степеней свободы s' равно m минус число переменных, которые были произвольно заданы. В нашей задаче мы подсчитывали величины σ и ρ по экспериментальным данным и задавались значениями этих величин для закона распределения. Мы требовали также, чтобы суммарное количество благоприятных событий было равно количеству, полученному из опытов. Таким образом, мы задавались тремя величинами, сократив число степеней свободы до $s' = m - 3 = 21 - 3 = 18$.

Таблица 7.5 взята из книги [2]. В ней даны значения $P(>\chi^2)$ как функции s' и χ^2 .

В нашем частном случае мы входим в таблицу по значению $s' = 18$ и замечаем, что значению $\chi^2 = 11,874$ соответствует вероятность, лежащая между 0,80 и 0,90, что свидетельствует о вполне хорошем совпадении кривой с экспериментальными данными. На практике обычно распределение считается совершенно неприемлемым, если величина $P(>\chi^2)$ меньше 0,05.

Из таблицы 6.6 следует, что при $mp > 5$ и $m > 20$ нормальный закон дает весьма хорошее приближение к биномиальному закону. В нашей задаче $mp = \bar{n} = 11,976$ и $m = 21$. Следовательно, нормальный закон вполне применим.

Обращаясь к таблице 7.6, мы видим в столбце, озаглавленном «нормальный закон», что выражения для определения констант нормального закона таковы:

$$\alpha = \bar{n},$$

$$\sigma = \sigma.$$

Эти величины подставляются в уравнение для нормального закона (оно записано в первом ряду этого столбца)

$$P(n) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(n-\bar{n})^2}{2\sigma^2}}. \quad (7.85)$$

Заменяя величины, стоящие в третьем столбце таблицы 7.3, значениями, полученными из уравнения (7.84), и продолжая далее расчеты, как и в случае биномиального закона, мы получим другое значение χ^2 . Вероятность $P(>\chi^2)$ для этого значения χ^2 определяет приемлемость нормального закона. Читатель сам может в качестве упражнения проделать все вычисления для нормального закона.

Биномиальные коэффициенты, C_m^n

n	$m=0$	$m=1$	$m=2$	$m=3$	$m=4$	$m=5$	$m=6$	$m=7$	$m=8$	$m=9$	$m=10$
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2			1	3	6	10	15	21	28	36	45
3				1	4	10	20	35	56	84	120
4					1	5	15	35	70	126	210
5						1	6	21	56	126	252
6							1	7	28	84	210
7								1	8	36	120
8									1	9	45
9										1	10
10											1

n	$m=11$	$m=12$	$m=13$	$m=14$	$m=15$	$m=16$	$m=17$	$m=18$	$m=19$
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	11	12	13	14	15	16	17	18	19
2	55	66	78	91	105	120	136	153	171
3	165	220	286	364	455	560	680	816	969
4	330	495	715	1 001	1 365	1 820	2 380	3 060	3 876
5	462	792	1 287	2 002	3 003	4 368	6 188	8 568	11 628
6	462	924	1 716	3 003	5 005	8 008	12 376	18 564	27 132
7			1 716	3 432	6 435	11 440	19 448	31 824	50 388
8					6 435	12 870	24 310	43 758	75 582
9							24 310	48 620	92 378
10									92 378

n^*	$m=20$	$m=21$	$m=22$	$m=23$	$m=24$	$m=25$
1	2,0 ¹	2,1 ¹	2,2 ¹	2,3 ¹	2,4 ¹	2,5 ¹
2	1,90 ²	2,10 ³	2,31 ²	2,53 ²	2,76 ²	3,00 ²
3	1,140 ³	1,330 ³	1,540 ³	1,771 ³	2,024 ³	2,300 ³
4	4,845	5,985	7,315	8,855	1,0626 ⁴	1,2650 ⁴
5	1,5504 ⁴	2,0349 ⁴	2,6334 ⁴	3,3649 ⁴	4,2504	5,3130
6	3,8760	5,4264	7,4613	1,00947 ⁵	1,34596 ⁵	1,77100 ⁵
7	7,7520	1,16280 ⁵	1,70544 ⁵	2,45157	3,46104	4,80700

n	$m = 20$	$m = 21$	$m = 22$	$m = 23$	$m = 24$	$m = 25$
8	1,25970 ⁵	2,03490 ⁵	3,19770 ⁵	4,90314 ⁵	7,35471 ⁵	1,081575 ⁵
9	1,67960	2,93930	4,97420	8,17190	1,307504 ⁸	2,042975
10	1,84756	3,52716	6,46646	1,144066 ⁸	1,961256	3,268760
11		3,52716	7,05432	1,352078	2,496144	4,457400
12				1,352078	2,704156	5,200300
13						5,200300

* Поскольку C_m^0 равно единице для любых значений m , то для $m \geq 20$ оно не табулировано.

(Для C_m^n при $m \geq 20$ применена сокращенная запись: так, $1,90^3$ означает, что $1,90$ надо умножить на 10^3 , а $1,5504^4 = 1,5504 \cdot 10^4$. Если показатель степени десяти не поставлен, это означает, что он такой же, как и у предыдущего числа. — Прим. ред.

n	$m = 26$	$m = 27$	$m = 28$	$m = 29$	$m = 30$
1	2,6 ¹	2,7 ¹	2,8 ¹	2,9 ¹	3,0 ¹
2	3,25 ²	3,51 ²	3,78 ²	4,06 ²	4,35 ²
3	2,600 ³	2,925 ³	3,276 ³	3,654 ³	4,060 ³
4	1,4950 ⁴	1,7550 ⁴	2,0475 ⁴	2,3751 ⁴	2,7405 ⁴
5	6,5780	8,0730	9,8280	1,18755 ⁵	1,42506 ⁵
6	2,30230 ⁵	2,96010 ⁵	3,76740 ⁵	4,75020	5,93775
7	6,57800	8,88030	1,184040 ⁶	1,560780 ⁶	2,035800 ⁶
8	1,562275 ⁶	2,220075 ⁶	3,108105	4,292145	5,852925
9	3,124550	4,686825	6,906900	1,0015005 ⁷	1,4307150 ⁷
10	5,311735	8,436285	1,3123110 ⁷	2,0030010	3,0045015
11	7,726160	1,3037895 ⁷	2,1474180	3,4597290	5,4627300
12	9,657700	1,7383860	3,0421755	5,1895935	8,6493225
13	1,0400600 ⁷	2,0058300	3,7442160	6,7863915	1,1975985 ⁸
14		2,0058300	4,0116600	7,7558760	1,4542268
15				7,7558760	1,5511752

n	$m = 31$	$m = 32$	$m = 33$	$m = 34$	$m = 35$
1	3,1 ¹	3,2 ¹	3,3 ¹	3,4 ¹	3,5 ¹
2	4,65 ²	4,96 ²	5,28 ²	5,61 ²	5,95 ²
3	4,495 ³	4,960 ³	5,456 ³	5,984 ³	6,545 ³
4	3,1465 ⁴	3,5960 ⁴	4,0920 ⁴	4,6376 ⁴	5,2360 ⁴

n	$m = 31$	$m = 32$	$m = 33$	$m = 34$	$m = 35$
5	1,69911 ⁵	2,01376 ⁵	2,37336 ⁵	2,78256 ⁵	3,24632 ⁵
6	7,36281	9,06192	1,107568 ⁶	1,344904 ⁶	1,623160 ⁶
7	2,629575 ⁶	3,365856 ⁶	4,272048	5,379616	6,724520
8	7,888725	1,0518300 ⁷	1,3884156 ⁷	1,8156204 ⁷	2,3535820 ⁷
9	2,0160075 ⁷	2,8048800	3,8567100	5,2451256	7,0607460
10	4,4352165	6,4512240	9,2561040	1,3112814 ⁸	1,8357940 ⁸
11	8,4672315 ⁷	1,2902448 ⁸	1,9353672 ⁸	2,8609776 ⁸	4,1722590 ⁸
12	1,4112053 ⁸	2,2579284	3,5481732	5,4835404	8,3445180
13	2,0625308	3,4737360	5,7316644	9,2798376	1,4763378 ⁹
14	2,6518253	4,7143560	8,1880920	1,3919756 ⁹	2,3199594
15	3,0054020	5,6572272	1,0371583 ⁹	1,8559675	3,2479432
16	3,0054020	6,0108039	1,1668031	2,2039644	4,0599290
			1,1668031	2,3336062	4,5375677
					4,5375677
n	$m = 36$	$m = 37$	$m = 38$	$m = 39$	$m = 40$
1	3,6 ¹	3,7 ¹	3,8 ¹	3,9 ¹	4,0 ¹
2	6,30 ²	6,66 ²	7,03 ²	7,41 ²	7,80 ²
3	7,140 ³	7,770 ³	8,436 ³	9,139 ³	9,880 ³
4	5,8905 ⁴	6,6045 ⁴	7,3815 ⁴	8,2251 ⁴	9,1390 ⁴
5	3,76992 ⁵	4,35897 ⁵	5,01942 ⁵	5,75757 ⁵	6,58008 ⁵
6	1,947792 ⁶	2,324784 ⁶	2,760681 ⁶	3,262623 ⁶	3,838380 ⁶
7	8,347680	1,0295472 ⁷	1,2620256 ⁷	1,5380937 ⁷	1,8643560 ⁷
8	3,0260340 ⁷	3,8608020	4,8903492	6,1523748	7,6904685
9	9,4143280	1,2440362 ⁸	1,6301164 ⁸	2,1191513 ⁸	2,7343888 ⁸
10	2,5418686 ⁸	3,4833014	4,7273376	6,3574540	8,4766053
11	6,0080530	8,5499215	1,2033223 ⁹	1,6760560 ⁹	2,3118014 ⁹
12	1,2516777 ⁹	1,8524830 ⁹	2,7074751	3,9107974	5,5868535
13	2,3107896	3,5624673	5,4149503	8,1224254	1,2033223 ¹⁰
14	3,7962972	6,1070868	9,6695541	1,5084504 ¹⁰	2,3206930
15	5,5679026	9,3641998	1,5471287 ¹⁰	2,5140841	4,0225345
16	7,3078721	1,2875775 ¹⁰	2,2239974	3,7711261	6,2852102
17	8,5974966	1,5905369	2,8781143	5,1021118	8,8732379
18	9,0751353	1,7672632	3,3578001	6,2359144	1,1338026 ¹¹
19		1,7672632	3,5345264	6,8923264	1,3128241
20				6,8923264	1,3784653

n	$m = 41$	$m = 42$	$m = 43$	$m = 44$	$m = 45$
1	4,1 ¹	4,2 ¹	4,3 ¹	4,4 ¹	4,5 ¹
2	8,20 ²	8,61 ²	9,03 ²	9,46 ^{2,4}	9,90 ²
3	1,0660 ⁴	1,1480 ⁴	1,2341 ⁴	1,3244 ⁴	1,4190 ⁴
4	1,01270 ⁶	1,11930 ⁶	1,23410 ⁶	1,35751 ⁶	1,48995 ⁶
5	7,49398	8,50668	9,62598	1,086008 ⁸	1,221759 ⁸
6	4,496388 ⁸	5,245786 ⁸	6,096454 ⁸	7,059052	8,145060
7	2,2481940 ⁷	2,6978328 ⁷	3,2224114 ⁷	3,8320568 ⁷	4,5379620 ⁷
8	9,5548245	1,1803019 ⁸	1,4500851 ⁸	1,7723263 ⁸	2,1555320 ⁸
9	3,5034357 ⁸	4,4589181	5,6392200	7,0893051	8,8616314
10	1,1210994 ⁹	1,4714430 ⁹	1,9173348 ⁹	2,4812568 ⁹	3,1901873 ⁹
11	3,1594620 ⁹	4,2805614 ⁹	5,7520043 ⁹	7,6693391 ⁹	1,0150596 ¹⁰
12	7,8986549	1,1058117 ¹⁰	1,5338678 ¹⁰	2,1090683 ¹⁰	2,8760022
13	1,7620076 ¹⁰	2,5518731	3,6576848	5,1915526	7,3006209
14	3,5240153	5,2860229	7,8378960	1,1495581 ¹¹	1,6687133 ¹¹
15	6,3432275	9,8672428	1,5153266 ¹¹	2,2991162	3,4486743
16	1,0307745 ¹¹	1,6650972 ¹¹	2,6518215	4,1671481	6,4662642
17	1,5158448	2,5466193	4,2117165	6,8635380	1,1030686 ¹²
18	2,0211264	3,5369712	6,0835905	1,0295307 ¹²	1,7158845
19	2,4466267	4,4677531	8,0047243	1,4088315	2,4383622
20	2,6912894	5,1379161	9,6056692	1,7610394	3,1698708
21	2,6912894	5,3825787	1,0520495 ¹²	2,0126164	3,7736558
22			1,0520495	2,1040990	4,1167154
23					4,1167154

n	$m = 46$	$m = 47$	$m = 48$	$m = 49$	$m = 50$
1	4,6 ¹	4,7 ¹	4,8 ¹	4,9 ¹	5,0 ¹
2	1,035 ³	1,081 ³	1,128 ³	1,176 ³	1,225 ³
3	1,5180 ⁴	1,6215 ⁴	1,7296 ⁴	1,8424 ⁴	1,9600 ⁴
4	1,63185 ⁵	1,78365 ⁵	1,94580 ⁵	2,11876 ⁵	2,30300 ⁵
5	1,370754 ⁸	1,533939 ⁸	1,712304 ⁸	1,906884 ⁸	2,118760 ⁸
6	9,366819	1,0737573 ⁷	1,2271512 ⁷	1,3983816 ⁷	1,5890700 ⁷
7	5,3524680 ⁷	6,2891499	7,3629072	8,5900584	9,9884400
8	2,6093282 ⁸	3,1445750 ⁸	3,7734899 ⁸	4,5097807 ⁸	5,3687865 ⁸
9	1,1017163 ⁹	1,3626491 ⁹	1,6771066 ⁹	2,0544556 ⁹	2,5054337 ⁹
10	4,0763504	5,1780668	6,5407159	8,2178225	1,0272278 ¹⁰
11	1,3340783 ¹⁰	1,7417134 ¹⁰	2,2595200 ¹⁰	2,9135916 ¹⁰	3,7353739
12	3,8910618	5,2251401	6,9668534	9,2263735	1,2139965 ¹¹
13	1,0176623 ¹¹	1,4067685 ¹¹	1,9292825 ¹¹	2,6259678 ¹¹	3,5486052

n	$m = 46$	$m = 47$	$m = 48$	$m = 49$	$m = 50$
14	2,3987754	3,4164377	4,8232062	6,7524887	9,3784566
15	5,1173876	7,5161630	1,0932601 ¹²	1,5755807 ¹²	2,2508296 ¹²
16	9,9149385	1,5032326 ¹²	2,2548489	3,3481090	4,9236897
17	1,7496950 ¹²	2,7411889	4,2444215	6,4992704	9,8473794
18	2,8189531	4,5686481	7,3098370	1,1554258 ¹³	1,8053529 ¹³
19	4,1542467	6,9731998	1,1541848 ¹³	1,8851685	3,0405943
20	5,6082330	9,7624797	1,6735679	2,8277527	4,7129212
21	6,9435266	1,2551760 ¹³	2,2314239	3,9049919	6,7327446
22	7,8903711	1,4833898	2,7385657	4,9699897	8,8749815
23	8,2334307	1,6123802	3,0957700	5,8343357	1,0804325 ¹⁴
24		1,6123802	3,2247604	6,3205303	1,2154866
25				6,3205303	1,2641061

n	$m = 51$	$m = 52$	$m = 53$	$m = 54$	$m = 55$
1	5,1 ¹	5,2 ¹	5,3 ¹	5,4 ¹	5,5 ¹
2	1,275 ³	1,326 ³	1,378 ³	1,431 ³	1,485 ³
3	2,0825 ⁴	2,2100 ⁴	2,3426 ⁴	2,4804 ⁴	2,6235 ⁴
4	2,49900 ⁵	2,70725 ⁵	2,92825 ⁵	3,16251 ⁵	3,41055 ⁵
5	2,349060 ⁶	2,598960 ⁶	2,869685 ⁶	3,162510 ⁶	3,478761 ⁶
6	1,8009460 ⁷	2,0358520 ⁷	2,2957480 ⁷	2,5827165 ⁷	2,8989675 ⁷
7	1,1577510 ⁸	1,3378456 ⁸	1,5414308 ⁸	1,7710056 ⁸	2,0292773 ⁸
8	6,3676305	7,5253815	8,8632271	1,0404658 ⁹	1,2175664 ⁹
9	3,0423124 ⁹	3,6790754 ⁹	4,4316136 ⁹	5,3179363	6,3584021
10	1,2777712 ¹⁰	1,5820024 ¹⁰	1,9499100 ¹⁰	2,3930713 ¹⁰	2,9248649 ¹⁰
11	4,7626017	6,0403729	7,6223753	9,5722853	1,1965357 ¹¹
12	1,5875339 ¹¹	2,0637941 ¹¹	2,6678314 ¹¹	3,4300689 ¹¹	4,3872974
13	4,7626017	6,3501356	8,4139297	1,1081761 ¹²	1,4511830 ¹²
14	1,2927062 ¹²	1,7689663 ¹²	2,4039799 ¹²	3,2453729	4,3535490
15	3,1886752	4,4813814	6,2503478	8,6543277	1,1899701 ¹³
16	7,1745193	1,0363195 ¹³	1,4844576 ¹³	2,1094924 ¹³	2,9749251
17	1,4771069 ¹³	2,1945588	3,2308783	4,7153359	6,8248282
18	2,7900908	4,2671977	6,4617566	9,6926349	1,4407971 ¹⁴
19	4,8459472	7,6360381	1,1903236 ¹⁴	1,8364992 ¹⁴	2,8057627
20	7,7535156	1,2599463 ¹⁴	2,0235501	3,2138737	5,0503729
21	1,1445666 ¹⁴	1,9199181	3,1798644	5,2034145	8,4172882
22	1,5607726	2,7053392	4,6252573	7,8051218	1,3008536 ¹⁵
23	1,9679307	3,5287033	6,2340425	1,0859300 ¹⁵	1,8664422

n	$m = 51$	$m = 52$	$m = 53$	$m = 54$	$m = 55$
24	2,2959191 ¹⁴	4,2638498 ¹⁴	7,7925531 ¹⁵	1,4026596 ¹⁵	2,4885895 ¹⁵
25	2,4795927	4,7755118	9,0393616	1,6831915	3,0858510
26	2,4795927	4,9591853	9,7346971	1,8774059	3,5605973
27			9,7346971	1,9469394	3,8243453
28					3,8243453
n	$m = 56$	$m = 57$	$m = 58$	$m = 59$	$m = 60$
1	5,6 ¹	5,7 ¹	5,8 ¹	5,9 ¹	6,0 ¹
2	1,540 ³	1,596 ³	1,653 ³	1,711 ³	1,770 ³
3	2,7720 ⁴	2,9260 ⁴	3,0856 ⁴	3,2509 ⁴	3,4420 ⁴
4	3,67290 ⁵	3,95010 ⁵	4,24270 ⁵	4,55126 ⁵	4,87635 ⁵
5	3,819816 ⁶	4,187106 ⁶	4,582116 ⁶	5,006386 ⁶	5,461512 ⁶
6	3,2468436 ⁷	3,6288252 ⁷	4,0475358 ⁷	4,5057474 ⁷	5,0063860 ⁷
7	2,3191740 ⁸	2,6438584 ⁸	3,0067409 ⁸	3,4114945 ⁸	3,8620692 ⁸
8	1,4204941 ⁹	1,6524115 ⁹	1,9167973 ⁹	2,2174714 ⁹	2,5586208 ⁹
9	7,5759684	8,9964625	1,0648874 ¹⁰	1,2565671 ¹⁰	1,4783143 ¹⁰
10	3,5607051 ¹⁰	4,3183020 ¹⁰	5,2179482 ¹⁰	6,2828356	7,5394028
11	1,4890222 ¹¹	1,8450927 ¹¹	2,2769229 ¹¹	2,7987177 ¹¹	3,4270013 ¹¹
12	5,5838331	7,0728552	8,9179479	1,1194871 ¹²	1,3993588 ¹²
13	1,8899127 ¹²	2,4482960 ¹²	3,1555816 ¹²	4,0473764	5,1668634
14	5,8047320	7,6946447	1,0142941 ¹³	1,3298522 ¹³	1,7345899 ¹³
15	1,6253249 ¹³	2,2057981 ¹³	2,9752626	3,9895567	5,3194089
16	4,1648952	5,7902201	7,9960183	1,0971281 ¹⁴	1,4960838 ¹⁴
17	9,7997534	1,3964649 ¹⁴	1,9754869 ¹⁴	2,7750887	3,8722168
18	2,1232799 ¹⁴	3,1032552	4,4997201	6,4752070	9,2502957
19	4,2465598	6,3698397	9,4730949	1,3972815 ¹⁵	2,0448022 ¹⁵
20	7,8561356	1,2102695 ¹⁵	1,8472535 ¹⁵	2,7945630	4,1918445
21	1,3467661 ¹⁵	2,1323797	3,3426492	5,1899027	7,9844657
22	2,1425824	3,4893485	5,6217282	8,9643774	1,4154280 ¹⁶
23	3,1672958	5,3098782	8,7992268	1,4420955 ¹⁶	2,3385332
24	4,3550317	7,5223275	1,2832206 ¹⁶	2,1631432	3,6052387
25	5,5744406	9,9294723	1,7451800	3,0284005	5,1915438
26	6,6464484	1,2220889 ¹⁶	2,2150361	3,9602161	6,9886167
27	7,3849427	1,4031391	2,6252280	4,8402641	8,8004802
28	7,6486906	1,5033633	2,9065024	5,5317304	1,0371995 ¹⁷
29		1,5033633	3,0067266	5,9132291	1,1494960
30				5,9132291	1,1826458

n	$m = 61$	$m = 62$	$m = 63$	$m = 64$	$m = 65$
1	6,1 ¹	6,2 ¹	6,3 ¹	6,4 ¹	6,5 ¹
2	1,830 ³	1,891 ³	1,953 ³	2,016 ³	2,080 ³
3	3,5990 ⁴	3,7820 ⁴	3,9711 ⁴	4,1664 ⁴	4,3680 ⁴
4	5,21855 ⁵	5,57845 ⁵	5,95665 ⁵	6,35376 ⁵	6,77040 ⁵
5	5,949147 ⁶	6,471002 ⁶	7,028847 ⁶	7,624512 ⁶	8,259888 ⁶
6	5,5525372 ⁷	6,1474519 ⁷	6,7945521 ⁷	7,4974368 ⁷	8,2598880 ⁷
7	4,3627078 ⁸	4,9179615 ⁸	5,5327067 ⁸	6,2121619 ⁸	6,9619056 ⁸
8	2,9448278 ⁹	3,3810985 ⁹	3,8728947 ⁹	4,4261654 ⁹	5,0473816 ⁹
9	1,7341764 ¹⁰	2,0286591 ¹⁰	2,3667690 ¹⁰	2,7540585 ¹⁰	3,1966750 ¹⁰
10	9,0177170	1,0751893 ¹¹	1,2780553 ¹¹	1,5147321 ¹¹	1,7901380 ¹¹
11	4,1809415 ¹¹	5,0827132	6,1579026	7,4359578	8,9506900
12	1,7420590 ¹²	2,1601531 ¹²	2,6684244 ¹²	3,2842147 ¹²	4,0278105 ¹²
13	6,5662223	8,3082812	1,0468434 ¹³	1,3136859 ¹³	1,6421074 ¹³
14	2,2512762 ¹³	2,9078984 ¹³	3,7387266	4,7855700	6,0992559
15	7,0539988	9,3052750	1,2213173 ¹⁴	1,5951900 ¹⁴	2,0737470 ¹⁴
16	2,0280247 ¹⁴	2,7334245 ¹⁴	3,6639520	4,8852694	6,4804594
17	5,3683005	7,3963252	1,0129750 ¹⁵	1,3793702 ¹⁵	1,8678971 ¹⁵
18	1,3122512 ¹⁵	1,8490813 ¹⁵	2,5887138	3,6016888	4,9810590
19	2,9698318	4,2820830	6,1311643	8,7198781	1,2321567 ¹⁶
20	6,2366467	9,2064785	1,3488561 ¹⁶	1,9619726 ¹⁶	2,8339604
21	1,2176310 ¹⁶	1,8412957 ¹⁶	2,7619435 ¹⁶	4,1107997 ¹⁶	6,0727723 ¹⁶
22	2,2138746	3,4315056	5,2728013	8,0347448	1,2145545 ¹⁷
23	3,7539613	5,9678358	9,3993415	1,4672143 ¹⁷	2,2706888
24	5,9437720	9,6977332	1,5665569 ¹⁷	2,5064911	3,9737053
25	8,7967825	1,4740555 ¹⁷	2,4438288	4,0103857	6,5168767
26	1,2180160 ¹⁷	2,0976943	3,571749 ¹⁸	6,0155785	1,0025964 ¹⁸
27	1,5789097	2,7969257	4,8946200	8,4663698	1,4481948
28	1,9172475	3,4961572	6,2930829	1,1187703 ¹⁸	1,9654073
29	2,1816954	4,0989429	7,5951000	1,3888183	2,5075886
30	2,3271418	4,5088372	8,6077801	1,6202880	3,0091063
31	2,3271418	4,6542835	9,1631207	1,7770901	3,3973781
32			9,1631207	1,8326241	3,6097142
					3,6097142
n	$m = 66$	$m = 67$	$m = 68$	$m = 69$	$m = 70$
1	6,6 ¹	6,7 ¹	6,8 ¹	6,9 ¹	7,0 ¹
2	2,145 ³	2,211 ³	2,278 ³	2,346 ³	2,415 ³
3	4,5760 ⁴	4,7905 ⁴	5,0116 ⁴	5,2394 ⁴	5,4740 ⁴

n	$m = 66$	$m = 67$	$m = 68$	$m = 69$	$m = 70$
4	7,20720 ⁶	7,66480 ⁶	8,14385 ⁵	8,64501 ⁵	9,16895 ⁵
5	8,936928 ⁶	9,657648 ⁶	1,0424128 ⁷	1,1238513 ⁷	1,2103014 ⁷
6	9,0858768 ⁷	9,9795696 ⁷	1,0945334 ⁸	1,1987747 ⁸	1,3111599 ⁸
7	7,7878944 ⁸	8,6964821 ⁸	9,6944390	1,0788972 ⁹	1,1987747 ⁹
8	5,7435721 ⁹	6,5223616 ⁹	7,3920098 ⁹	8,3614537	9,4403509
9	3,7014131 ¹⁰	4,2757704 ¹⁰	4,9280065 ¹⁰	5,6672075 ¹⁰	6,5033529 ¹⁰
10	2,1098055 ¹¹	2,4799468 ¹¹	2,9075238 ¹¹	3,4003245 ¹¹	3,9670452 ¹¹
11	1,0740828 ¹²	1,2850633 ¹²	1,5330580 ¹²	1,8238104 ¹²	2,1638429 ¹²
12	4,9228795	5,9969623	7,2820256	8,8150836	1,0638894 ¹³
13	2,0448884 ¹³	2,5371763 ¹³	3,1368726 ¹³	3,8650751 ¹³	4,7465835
14	7,7413632	9,7862516	1,2323428 ¹⁴	1,5460301 ¹⁴	1,9325376 ¹⁴
15	2,6836726 ¹⁴	3,4578089 ¹⁴	4,4364341	5,6687769	7,2148069
16	8,5542064	1,1237879 ¹⁵	1,4695688 ¹⁵	1,9132122 ¹⁵	2,4800899 ¹⁵
17	2,5159430 ¹⁵	3,3713637	4,4951516	5,9647204	7,8779326
18	6,8489561	9,3648991	1,2736263 ¹⁶	1,7231414 ¹⁶	2,3196135 ¹⁶
19	1,7302626 ¹⁶	2,4151582 ¹⁶	3,3516481	4,6252744	6,3484158
20	4,0661171	5,7963797	8,2115379	1,1563186 ¹⁷	1,6188460 ¹⁷
21	8,9067327	1,2972850 ¹⁷	1,8769229 ¹⁷	2,6980767	3,8543953
22	1,8218317 ¹⁷	2,7125049	4,0097899	5,8867129	8,5847896
23	3,4852432	5,3070749	8,0195798	1,2029370 ¹⁸	1,7916083 ¹⁸
24	6,2443941	9,7296373	1,5036712 ¹⁸	2,3056292	3,5085662
25	1,0490582 ¹⁸	1,6734976 ¹⁸	2,6464613	4,1501326	6,4557618
26	1,6542841 ¹⁸	2,7033234 ¹⁸	4,3768399 ¹⁸	7,0233013 ¹⁸	1,1173434 ¹⁹
27	2,4507913	4,1050753	6,8084177	1,1185258 ¹⁹	1,8208559
28	3,4136021	5,8643934	9,9694687	1,6777886	2,7963144
29	4,4729959	7,8865980	1,3750991 ¹⁹	2,3720460	4,0498346
30	5,5166949	9,9896908	1,7876289	3,1627280	5,5347740
31	6,4064844	1,1923179 ¹⁹	2,1912870	3,9789159	7,1416438
32	7,0070923	1,3413577	2,5336756	4,7249626	8,7038785
33	7,2194284	1,4226521	2,7640097	5,2976853	1,0022648 ²⁰
34		1,4226521	2,8453041	5,6093139	1,0906999
35				5,6093139	1,1218628
n	$m = 71$	$m = 72$	$m = 73$	$m = 74$	$m = 75$
1	7,1 ¹	7,2 ¹	7,3 ¹	7,4 ¹	7,5 ¹
2	2,485 ³	2,556 ³	2,628 ³	2,701 ³	2,775 ³
3	5,7155 ⁴	5,9640 ⁴	6,2196 ⁴	6,4824 ⁴	6,7525 ⁴
4	9,71635 ⁵	1,028790 ⁶	1,088430 ⁶	1,150626 ⁶	1,215450 ⁶

n	$m = 71$	$m = 72$	$m = 73$	$m = 74$	$m = 75$
5	1,30199097	1,39915447	1,50203347	1,61087647	1,72593907
6	1,43219008	1,56238918	1,70230458	1,85250798	2,01359558
7	1,32989079	1,47310979	1,62934869	1,79957919	1,98482999
8	1,0639126 ¹⁰	1,1969016 ¹⁰	1,3442126 ¹⁰	1,5071475 ¹⁰	1,6871054 ¹⁰
9	7,4473879	8,5113005	9,7082021	1,1052415 ¹¹	1,2559562 ¹¹
10	4,6173805 ¹¹	5,3621193 ¹¹	6,2132494 ¹¹	7,1840696	8,2893111
11	2,5605474 ¹²	3,0222854 ¹²	3,5584974 ¹²	4,1798223 ¹²	4,8982293 ¹²
12	1,2802737 ¹³	1,5363284 ¹³	1,8385570 ¹³	2,1944067 ¹³	2,6123889 ¹³
13	5,8104729	7,0907466	8,6270750	1,0465632 ¹⁴	1,2660039 ¹⁴
14	2,4071959 ¹⁴	2,9882432 ¹⁴	3,6973179 ¹⁴	4,5600254	5,6065886
15	9,1473445	1,1554540 ¹⁵	1,4542784 ¹⁵	1,8240101 ¹⁵	2,2800127 ¹⁵
16	3,2015706 ¹⁵	4,1163050	5,2717591	6,7260374	8,5500476
17	1,0358022 ¹⁶	1,3559593 ¹⁶	1,7675898 ¹⁶	2,2947657 ¹⁶	2,9673695 ¹⁶
18	3,1074067	4,1432090	5,4991683	7,2667581	9,5615238
19	8,6680293	1,1775436 ¹⁷	1,5918645 ¹⁷	2,1417813 ¹⁷	2,8684571 ¹⁷
20	2,2536876 ¹⁷	3,1204906	4,2980342	5,8898987	8,0316800
21	5,4732414	7,7269290	1,0847420 ¹⁸	1,5145454 ¹⁸	2,1035352 ¹⁸
22	1,2439185 ¹⁸	1,7912426 ¹⁸	2,5639355	3,6486775	5,1632228
23	2,6500872	3,8940057	5,6852483	8,2491839	1,1897861 ¹⁹
24	5,3001744	7,9502617	1,1844267 ¹⁹	1,7529516 ¹⁹	2,5778700
25	9,9643279	1,5264502 ¹⁹	2,3214764	3,5059031	5,2588547
26	1,7629196 ¹⁹	2,7593524	4,2858026	6,6072790	1,0113182 ²⁰
27	2,9381993	4,7011188	7,4604712	1,1746274 ²⁰	1,8353553
28	4,6171703	7,5553695	1,2256488 ²⁰	1,9716960	3,1463233
29	6,8461490	1,1463319 ²⁰	1,9018689	3,1275177	5,0992137
30	9,5846086	1,6430758	2,7894077	4,6912766	7,8187943
31	1,2676418 ²⁰	2,2261027 ²⁰	3,8691784 ²⁰	6,6585861 ²⁰	1,1349863 ²¹
32	1,5845522	2,8521940	5,0782967	8,9474751	1,5606061
33	1,8726526	3,4572049	6,3093989	1,1387696 ²¹	2,0335171
34	2,0929647	3,9656174	7,4228222	1,3732221	2,5119917
35	2,2125627	4,3055274	8,2711448	1,5693967	2,9426188
36	2,2125627	4,4251254	8,7306528	1,7001798	3,2695765
37			8,7306528	2,7461306	3,4463103
38					3,4463103

n	$m = 76$	$m = 77$	$m = 78$	$m = 79$	$m = 80$
1	7,6 ¹	7,7 ¹	7,8 ¹	7,9 ¹	8,0 ¹
2	2,850 ³	2,926 ³	3,003 ³	3,081 ³	3,160 ³
3	7,0300 ⁴	7,3150 ⁴	7,6076 ⁴	7,9079 ⁴	8,2160 ⁴
4	1,282975 ⁵	1,353275 ⁵	1,426425 ⁵	1,502501 ⁵	1,581580 ⁵
5	1,8474840 ⁷	1,975815 ⁷	2,1111090 ⁷	2,2537515 ⁷	2,4040016 ⁷
6	2,1861894 ⁸	2,3709378 ⁸	2,5685160 ⁸	2,7796269 ⁸	3,0050020 ⁸
7	2,1861894 ⁹	2,4048083 ⁹	2,6419021 ⁹	2,8987537 ⁹	3,1767164 ⁹
8	1,8855884 ¹⁰	2,1042073 ¹⁰	2,3446881 ¹⁰	2,6088783 ¹⁰	2,8987537 ¹⁰
9	1,4246668 ¹¹	1,6132256 ¹¹	1,8236463 ¹¹	2,0581151 ¹¹	2,3190030 ¹¹
10	9,5452673	1,0969934 ¹²	1,2583160 ¹²	1,4406806 ¹²	1,6464921 ¹²
11	5,7271604 ¹²	6,6816871	7,7786805	9,0369965	1,0477677 ¹³
12	3,1022119 ¹³	3,6749279 ¹³	4,3430966 ¹³	5,1209647 ¹³	6,0246643
13	1,5272428 ¹⁴	1,8374640 ¹⁴	2,2049567 ¹⁴	2,6392664 ¹⁴	3,1513629 ¹⁴
14	6,8725924	8,3998352	1,0237299 ¹⁵	1,2442256 ¹⁵	1,5081522 ¹⁵
15	2,8406715 ¹⁵	3,5279308 ¹⁵	4,3679143	5,3925442	6,6358698
16	1,0830060 ¹⁶	1,3670732 ¹⁶	1,7198663 ¹⁶	2,1566577 ¹⁶	2,6958221 ¹⁶
17	3,8223742	4,9053802	6,2724534	7,9923197	2,0148977 ¹⁷
18	1,2528893 ¹⁷	1,6351267 ¹⁷	2,1256648 ¹⁷	2,7529101 ¹⁷	3,5521421
19	3,8246095	5,0774988	6,7126256	8,8382904	1,1591200 ¹⁸
20	1,0900137 ¹⁸	1,4724747 ¹⁸	1,9802245 ¹⁸	2,6514871 ¹⁸	3,353161
21	2,9067032	3,9967169	5,4691916	7,4494162	1,0100903 ¹⁹
22	7,2667581	1,0173461 ¹⁹	1,4170178 ¹⁹	1,9639370 ¹⁹	2,7088786
23	1,7061084 ¹⁹	2,4327842	3,4501304	4,8671482	6,8310852
24	3,7676561	5,4737645	7,9065487	1,1356679 ²⁰	1,6223827 ²⁰
25	7,8367247	1,1604381 ²⁰	1,7078145 ²⁰	2,4984694	3,6341373
26	1,5372037 ²⁰	2,3208762	3,4813142	5,1891288	7,6875982
27	2,8466735	4,3838772	6,7047533	1,0186068 ²¹	1,5375196 ²¹
28	4,9816786	7,8283521	1,2212229 ²¹	1,8916983	2,9103050
29	8,2455370	1,3227216 ²¹	2,1055568	3,3267797	5,2184780
30	1,2918008 ²¹	2,1163545	3,4390761	5,5446328	8,8714125
31	1,9168657 ²¹	3,2086665 ²¹	5,3250210 ²¹	8,7640971 ²¹	1,4308730 ²²
32	2,6955924	4,6124581	7,8211246	1,3146146 ²²	2,1910243
33	3,5941232	6,2897156	1,0902174 ²²	1,8723298	3,1869444
34	4,5455087	8,1396319	1,4429348	2,5331521	4,4054819
35	5,4546105	1,0000119 ²²	1,8139751	3,2569099	5,7900620
36	6,2121953	1,1666806	2,1666925	3,9806676	7,2375775
37	6,7158868	1,2928082	2,4594888	4,6261813	8,6068489
38	6,8926206	1,3608507	2,6536589	5,1131477	9,7393290
39		1,3608507	2,7217015	5,3753604	1,0488508 ²³
40				5,3753604	1,0750721

n	$m = 81$	$m = 82$	$m = 83$	$m = 84$	$m = 85$
1	8,1 ¹	8,2 ¹	8,3 ¹	8,4 ¹	8,5 ¹
2	3,240 ³	3,321 ³	3,403 ³	3,486 ³	3,570 ³
3	8,5320 ⁴	8,8560 ⁴	9,1881 ⁴	9,5284 ⁴	9,8770 ⁴
4	1,663740 ⁶	1,749060 ⁶	1,837620 ⁶	1,929501 ⁶	2,024785 ⁶
5	2,5621596 ⁷	2,7285336 ⁷	2,9034396 ⁷	3,0872016 ⁷	3,2801517 ⁷
6	3,2454022 ⁸	3,5016181 ⁸	3,7744715 ⁸	4,0648154 ⁸	4,3735356 ⁸
7	3,4772166 ⁹	3,8017568 ⁹	4,1519186 ⁹	4,5293658 ⁹	4,9358473 ⁹
8	3,2164254 ¹⁰	3,5641470 ¹⁰	3,9443227 ¹⁰	4,3595146 ¹⁰	4,8124511 ¹⁰
9	2,6088783 ¹¹	2,9305209 ¹¹	3,2869356 ¹¹	3,6813679 ¹¹	4,1173193 ¹¹
10	1,8783924 ¹²	2,1392802 ¹²	2,4323323 ¹²	2,7610259 ¹²	3,1291627 ¹²
11	1,2124169 ¹³	1,4002562 ¹³	1,6141842 ¹³	1,8574174 ¹³	2,1335200 ¹³
12	7,0724320	8,2848489	9,6851051	1,1299289 ¹⁴	1,3156707 ¹⁴
13	3,7538293 ¹⁴	4,4610725 ¹⁴	5,2895574 ¹⁴	6,2580679	7,3879968
14	1,8232885 ¹⁵	2,1986714 ¹⁵	2,6447787 ¹⁵	3,1737344 ¹⁵	3,7995412 ¹⁵
15	8,1440220	9,9673106	1,2165982 ¹⁶	1,4810761 ¹⁶	1,7984495 ¹⁶
16	3,3594091 ¹⁶	4,1738113 ¹⁶	5,1705424	6,3871406	7,8682166
17	1,2844799 ¹⁷	1,6204206 ¹⁷	2,0378020 ¹⁷	2,5548562 ¹⁷	3,1935703 ¹⁷
18	4,5670398	5,8515198	7,4719406	9,5097426	1,2064599 ¹⁸
19	1,5143343 ¹⁸	1,9710382 ¹⁸	2,5561902 ¹⁸	3,3033843 ¹⁸	4,2543585
20	4,6944362	6,2087704	8,1798087	1,0735999 ¹⁹	1,4039383 ¹⁹
21	1,3636219 ¹⁹	1,8330656 ¹⁹	2,4539426 ¹⁹	3,2719235	4,3455234
22	3,7189689	5,0825909	6,9156564	9,3695990	1,2641523 ²⁰
23	9,5399638	1,3258933 ²⁰	1,8341524 ²⁰	2,5257180 ²⁰	3,4626779
24	2,3054912 ²⁰	3,2594876	4,5853809	6,4195333	8,9452513
25	5,2565200	7,5620113	1,0821499 ²¹	1,5406880 ²¹	2,1826413 ²¹
26	1,1321735 ²¹	1,6578256 ²¹	2,4140267	3,4961766	5,0368646
27	2,3062794	3,4384530	5,0962785	7,5103052	1,1006482 ²²
28	4,4478246	6,7541041	1,0192557 ²²	1,5288836 ²²	2,2799141
29	8,1287830	1,2576608 ²²	1,9330712	2,9523269	4,4812104
30	1,4089890 ²²	2,2218673	3,4795281	5,4125993	8,3649262
31	2,3180142 ²²	3,7270032 ²²	5,9488706 ²²	9,4283988 ²²	1,4840998 ²³
32	3,6218973	5,9399115	9,6669148	1,5615785 ²³	2,5044184
33	5,3779687	8,9998659	1,4939777 ²³	2,4606692	4,0222478
34	7,5924263	1,2970395 ²³	2,1970261	3,6910038	6,1516730
35	1,0195544 ²³	1,7787970	3,0758365	5,2728626	8,9638664
36	1,3027639	2,3223183	4,1011154	7,1769519	1,2449815 ²⁴
37	1,5844426	2,8872066	5,2095249	9,3106403	1,6487592
38	1,8346178	3,4190604	6,3062670	1,1515792 ²⁴	2,0826432
39	2,0227837	3,8574015	7,2764619	1,3582729	2,5098520
40	2,1239229	4,1467066	8,0041081	1,5280570	2,8863299

<i>n</i>	<i>m</i> = 81	<i>m</i> = 82	<i>m</i> = 83	<i>m</i> = 84	<i>m</i> = 85
41	2,1239229 ²³	4,2478458 ²⁸	8,3945524 ²³	1,6398661 ²⁴	3,1679231 ²⁴
42			8,3945524	1,6789105	3,3187765
43					3,3187765
<i>n</i>	<i>m</i> = 86	<i>m</i> = 87	<i>m</i> = 88	<i>m</i> = 89	<i>m</i> = 90
1	8,6 ¹	8,7 ¹	8,8 ¹	8,9 ¹	9,0 ¹
2	3,655 ³	3,741 ³	3,828 ³	3,916 ³	4,005 ³
3	1,02340 ⁶	1,05995 ⁵	1,09736 ⁵	1,13564 ⁵	1,17480 ⁵
4	2,12355 ⁸	2,22589 ⁸	2,33189 ⁸	2,44162 ⁸	2,55519 ⁸
5	3,4826302 ⁷	3,6949857 ⁷	3,9175752 ⁷	4,1507642 ⁷	4,3949268 ⁷
6	4,7015508 ⁸	5,0498138 ⁸	5,4193124 ⁸	5,8110699 ⁸	6,2261463 ⁸
7	5,3732009 ⁹	5,8433560 ⁹	6,3483373 ⁹	6,8902686 ⁹	7,4713756 ⁹
8	5,3060359 ¹⁰	5,8433560 ¹⁰	6,4276916 ¹⁰	7,0625253 ¹⁰	7,7515521 ¹⁰
9	4,5985644 ¹¹	5,1291680 ¹¹	5,7135036 ¹¹	6,3562728 ¹¹	7,0625253 ¹¹
10	3,5408946 ¹²	4,0007510 ¹²	4,5136678 ¹²	5,0850182 ¹²	5,7206455 ¹²
11	2,4464363 ¹³	2,8005257 ¹³	3,2006008 ¹³	3,6519676 ¹³	4,1604694 ¹³
12	1,5290227 ¹⁴	1,7736663 ¹⁴	2,0537189 ¹⁴	2,3737790 ¹⁴	2,7389757 ¹⁴
13	8,7036675	1,0232690 ¹⁵	1,2006356 ¹⁵	1,4060075 ¹⁵	1,6433854 ¹⁵
14	4,5383409 ¹⁵	5,4087077	6,4319767	7,6326123	9,0386199
15	2,1784036 ¹⁶	2,6322377 ¹⁶	3,1731085 ¹⁶	3,8163062 ¹⁶	4,5795674 ¹⁶
16	9,6666661	1,1845070 ¹⁷	1,4477308 ¹⁷	1,7650416 ¹⁷	2,1466722 ¹⁷
17	3,9803919 ¹⁷	4,9470586	6,1315655	7,5792963	9,3443379
18	1,5258169 ¹⁸	1,9238561 ¹⁸	2,4185620 ¹⁸	3,0317185 ¹⁸	3,7886481 ¹⁸
19	5,4608184	6,9866353	8,9104914	1,1329053 ¹⁹	1,4360772 ¹⁹
20	1,8293742 ¹⁹	2,3754560 ¹⁹	3,0741195 ¹⁹	3,9651687	5,0980740
21	5,7494617	7,5788358	9,9542919	1,3028411 ²⁰	1,6993580 ²⁰
22	1,6987046 ²⁰	2,2736508 ²⁰	3,0315343 ²⁰	4,0269635	5,3298047
23	4,7268302	6,4255347	8,6991855	1,1730720 ²¹	1,5757683 ²¹
24	1,2407929 ²¹	1,7134759 ²¹	2,3560294 ²¹	3,2259480	4,3990199
25	3,0771664	4,3179593	6,0314353	8,3874647	1,1613413 ²²
26	7,2195059 ²¹	1,0296672 ²²	1,4614632 ²²	2,0646067 ²²	2,9033532 ²²
27	1,6043346 ²²	2,3262852	3,3559524	4,8174156	6,8820223
28	3,3805623	4,9848969	7,3111821	1,0667135 ²³	1,5484550 ²³
29	6,7611245	1,0141687 ²³	1,5126584 ²³	2,2437766	3,3104900
30	1,2846137 ²³	1,9607261	2,9748948	4,4875532	6,7313297
31	2,3205924	3,6052061	5,5659322	8,5408270	1,3028380 ²⁴
32	3,9885182	6,3091106	9,9143167	1,5480249 ²⁴	2,4021076

n	$m = 86$	$m = 87$	$m = 88$	$m = 89$	$m = 90$
33	6,5266662 ²³	1,0515184 ²⁴	1,6824295 ²⁴	2,6738612 ²⁴	4,2218861 ²⁴
34	1,0173921 ²⁴	1,6700587	2,7215771	4,4040066	7,0778678
35	1,5115539	2,5289460	4,1990047	6,9205819	1,1324589 ²⁵
36	2,1413681	3,6529220	6,1818681	1,0380873 ²⁵	1,7301455
37	2,8937407	5,0351088	8,6880308	1,4869899	2,5250772
38	3,7314024	6,6251431	1,1660252 ²⁵	2,0348283	3,5218182
39	4,5924952	8,3238977	1,4949041	2,6609293	4,6957575
40	5,3961819	9,9886771	1,8312575	3,3261616	5,9870908
41	6,0542530	1,1450435 ²⁵	2,1439112	3,9751687	7,3013302
42	6,4866996	1,2540953	2,3991387	4,5430499	8,5182186
43	6,6375531	1,3124253	2,5665205	4,9656593	9,5087092
44		1,3124253	2,6248505	5,1913711	1,0157030 ²⁶
45				5,1913711	1,0382742
n	$m = 91$	$m = 92$	$m = 93$	$m = 94$	$m = 95$
1	9,1 ¹	9,2 ¹	9,3 ¹	9,4 ¹	9,5 ¹
2	4,095 ³	4,186 ³	4,278 ³	4,371 ³	4,465 ³
3	1,21485 ⁵	1,25580 ⁵	1,29766 ⁵	1,34044 ⁵	1,38415 ⁵
4	2,672670 ⁶	2,794155 ⁶	2,919735 ⁶	3,049501 ⁶	3,183545 ⁶
5	4,6504458 ⁷	4,9177128 ⁷	5,1971283 ⁷	5,4891018 ⁷	5,7940519 ⁷
6	6,6656390 ⁸	7,1306836 ⁸	7,6224548 ⁸	8,1421677 ⁸	8,6910779 ⁸
7	8,0939902 ⁹	8,7605541 ⁹	9,4736224 ⁹	1,0235868 ¹⁰	1,1050085 ¹⁰
8	8,4986897 ¹⁰	9,3080887 ¹⁰	1,0184144 ¹¹	1,1131506 ¹¹	1,2155093 ¹¹
9	7,8376805 ¹¹	8,6875495 ¹¹	9,6183583	1,0636773 ¹²	1,1749923 ¹²
10	6,4268980 ¹²	7,2106661 ¹²	8,0794210 ¹²	9,0412569	1,0104934 ¹³
11	4,7325340 ¹³	5,3752238 ¹³	6,0962904 ¹³	6,9042325 ¹³	7,8083582
12	3,1550227 ¹⁴	3,6282761 ¹⁴	4,1657984 ¹⁴	4,7754275 ¹⁴	5,4658507 ¹⁴
13	1,9172830 ¹⁵	2,2327853 ¹⁵	2,5956129 ¹⁵	3,0121927 ¹⁵	3,4897355 ¹⁵
14	1,0682005 ¹⁶	1,2599288 ¹⁶	1,4832074 ¹⁶	1,7427686 ¹⁶	2,0439879 ¹⁶
15	5,4834294	6,5516299	7,8115587	9,2947661	1,1037535 ¹⁷
16	2,6046290 ¹⁷	3,1529719 ¹⁷	3,8081349 ¹⁷	4,5892908 ¹⁷	5,5187674
17	1,1491010 ¹⁸	1,4095639 ¹⁸	1,7248611 ¹⁸	2,1056746 ¹⁸	2,5646037 ¹⁸
18	4,7240819	5,8731829	7,2827468	9,0076079	1,1113283 ¹⁹
19	1,8150420 ¹⁹	2,2874502 ¹⁹	2,8747685 ¹⁹	3,6030432 ¹⁹	4,5038040
20	6,5341512	8,3491932	1,0636643 ²⁰	1,3511412 ²⁰	1,7114455 ²⁰
21	2,2091654 ²⁰	2,8625805 ²⁰	3,6974999 ²⁰	4,7611642 ²⁰	6,1123054 ²⁰
22	7,0291627	9,2383281	1,2100909 ²¹	1,5798408 ²¹	2,0559573 ²¹

n	$m = 91$	$m = 92$	$m = 93$	$m = 94$	$m = 95$
23	2,1087488 ²¹	2,8116651 ²¹	3,7354979 ²¹	4,9455887 ²¹	6,5254296 ²¹
24	5,9747883	8,0835371	1,0895202 ²²	1,4630700 ²²	1,9576289 ²²
25	1,6012433 ²³	2,1987221 ²³	3,0070758	4,0965960	5,5596660
26	4,0646944	5,6659377	7,8646598	1,0871736 ²³	1,4968332 ²³
27	9,7853755	1,3850070 ²³	1,9516008 ²³	2,7380667	3,8252403
28	2,2366572 ²³	3,2151948	4,6002018	6,5518025	9,2898693
29	4,8589451	7,0956023	1,0310797 ²⁴	1,4910999 ²⁴	2,1462801 ²⁴
30	1,0041820 ²⁴	1,4900765 ²⁴	2,1996367	3,2307164	4,7218163
31	1,9759710	2,9801530	4,4702295	6,6698662	9,9005826
32	3,7049456	5,6809166	8,6610696	1,3131299 ²⁵	1,9801165 ²⁵
33	6,6239937	1,0328939 ²⁵	1,6009856 ²⁵	2,4670925	3,7802224
34	1,1299754 ²⁵	1,7923748	2,8252687	4,4262543	6,8933468
35	1,8402456	2,9702210	4,7625958	7,5878645	1,2014119 ²⁶
36	2,8626043	4,7028500	7,6730710	1,2435667 ²⁶	2,0023531
37	4,2552226	7,1178270	1,1820677 ²⁶	1,9493748	3,1929415
38	6,0468953	1,0302118 ²⁶	1,7419945	2,9240622	4,8734370
39	8,2175757	1,4264471	2,4566589	4,1986534	7,1227156
40	1,0682848 ²⁶	1,8900424	3,3164895	5,7731484	9,9718018
41	1,3288421	2,3971269	4,2871694	7,6036589	1,3376807 ²⁷
42	1,5819549	2,9107970	5,3079240	9,5950934	1,7198752
43	1,8026928	3,3846477	6,2954447	1,1603369 ²⁷	2,1198462
44	1,9665740	3,7692667	7,1539144	1,3449359	2,5052728
45	2,0539772	4,0205512	7,7898179	1,4943732	2,8393092
46	2,0539772	4,1079545	8,1285057	1,5918324	3,0862056
47			8,1285057	1,6257011	3,2175335
48					3,2175335
n	$m = 96$	$m = 97$	$m = 98$	$m = 99$	$m = 100$
1	9,6 ¹	9,7 ¹	9,8 ¹	9,9 ¹	1,00 ²
2	4,560 ³	4,656 ³	4,753 ³	4,851 ³	4,950 ³
3	1,42880 ⁶	1,47440 ⁶	1,52096 ⁶	1,56849 ⁶	1,61700 ⁶
4	3,321960 ⁶	3,464840 ⁶	3,612280 ⁶	3,764376 ⁶	3,921225 ⁶
5	6,1124064 ⁷	6,4446024 ⁷	6,7910864 ⁷	7,1523144 ⁷	7,5287520 ⁷
6	9,2704830 ⁸	9,8817237 ⁸	1,0526184 ⁹	1,1205293 ⁹	1,1920524 ⁹
7	1,1919192 ¹⁰	1,2846241 ¹⁰	1,3834413 ¹⁰	1,4887032 ¹⁰	1,6007561 ¹⁰
8	1,3260102 ¹¹	1,4452021 ¹¹	1,5736645 ¹¹	1,7120086 ¹¹	1,8608789 ¹¹
9	1,2965433 ¹²	1,4291443 ¹²	1,5736645 ¹²	1,7310309 ¹²	1,9022318 ¹²

n	$m = 96$	$m = 97$	$m = 98$	$m = 99$	$m = 100$
10	1,1279926 ¹³	1,2576470 ¹³	1,4005614 ¹³	1,5579279 ¹³	1,7310309 ¹³
11	8,8188516 ¹³	9,9468442 ¹³	1,1204491 ¹⁴	1,2605053 ¹⁴	1,4162980 ¹⁴
12	6,2466865 ¹⁴	7,1285717 ¹⁴	8,1232561	9,2437052	1,0504211 ¹⁵
13	4,0363205 ¹⁵	4,6609892 ¹⁵	5,3738464 ¹⁵	6,1861720 ¹⁵	7,1105425
14	2,3929615 ¹⁶	2,7965935 ¹⁶	3,2626924 ¹⁶	3,8000771 ¹⁶	4,4186943 ¹⁶
15	1,3081523 ¹⁷	1,5474484 ¹⁷	1,8271078 ¹⁷	2,1533770 ¹⁷	2,5333847 ¹⁷
16	6,6225208	7,9306731	9,4781215	1,1305229 ¹⁸	1,3458606 ¹⁸
17	3,1164804 ¹⁸	3,7787325 ¹⁸	4,5717998 ¹⁸	5,5196119	6,6501349
18	1,3677886 ¹⁹	1,6794367 ¹⁹	2,0573099 ¹⁹	2,5144899 ¹⁹	3,0664511 ¹⁹
19	5,6151322	6,9829208	8,6623575	1,0719667 ²⁰	1,3234157 ²⁰
20	2,1618259 ²⁰	2,7233391 ²⁰	3,4216312 ²⁰	4,2878670	5,3598337
21	7,8237509	9,9855768	1,2708916 ²¹	1,6130547 ²¹	2,0418414 ²¹
22	2,6671878 ²¹	3,4495629 ²¹	4,4481206	5,7190122	7,3320669
23	8,5813869	1,1248575 ²²	1,4698138 ²²	1,9146258 ²²	2,4865270 ²²
24	2,6101718 ²²	3,4683105	4,5931680	6,0629817	7,9776076
25	7,5172949	1,0127467 ²³	1,3595777 ²³	1,8188945 ²³	2,4251927 ²³
26	2,0527998 ²³	2,8045292	3,8172759	5,1768536	6,9957482
27	5,3220734	7,3748732	1,0179402 ²⁴	1,3996678 ²⁴	1,9173532 ²⁴
28	1,3115110 ²⁴	1,8437183 ²⁴	2,5812056	3,5991459	4,9988137
29	3,0752671	4,3867780	6,2304963	8,8117019	1,2410848 ²⁵
30	6,8680965	9,9433635	1,4330142 ²⁵	2,0560638 ²⁵	2,9372340
31	1,4622399 ²⁵	2,1490495 ²⁵	3,1433859	4,5764000	6,6324638
32	2,9701748	4,4324147	6,5814642	9,7248501	1,4301250 ²⁶
33	5,7603390	8,7305137	1,3162928 ²⁶	1,9744393 ²⁶	2,9469243
34	1,0673569 ²⁶	1,6433908 ²⁶	2,5164422	3,8327350	5,8071743
35	1,8907466	2,9581035	4,6014943	7,1179365	1,0950672 ²⁷
36	3,2037650	5,0945115	8,0526150	1,2654109 ²⁷	1,9772046
37	5,1952946	8,3990596	1,3493571 ²⁷	2,1546186	3,4200295
38	8,0663784	1,3261673 ²⁷	2,1660733	3,5154304	5,6700490
39	1,1996153 ²⁷	2,0062531	3,3324204	5,4984937	9,0139240
40	1,7094517	2,9090670	4,9153201	8,2477405	1,3746234 ²⁸
41	2,3348609	4,0443126	6,9533796	1,1868700 ²⁸	2,0116440
42	3,0575560	5,3924169	9,4367295	1,6390109	2,8258809
43	3,8397214	6,8972774	1,2289694 ²⁸	2,1726424	3,8116533
44	4,6251190	8,4648404	1,5362118	2,7651812	4,9378236
45	5,3445820	9,9697009	1,8434541	3,3796659	6,1448471
46	5,9255148	1,1270097 ²⁸	2,1239798	3,9674339	7,3470998
47	6,3037391	1,2229254	2,3499351	4,4739148	8,4413487
48	6,4350670	1,2738806	2,4968060	4,8467411	9,3206559
49		1,2738806	2,5477612	5,0445672	9,8913083
50				5,0445672	1,0089134 ²⁹

Критерий Пирсона для определения степени соответствия, $P(>\chi^2)$
 (таблица взята из книги «Statistical Methods for Research Workers» by Fisher.
 Oliver and Boyd, Edinburgh.)

s'	$P = 0,99$	$P = 0,98$	$P = 0,95$	$P = 0,90$	$P = 0,80$	$P = 0,70$
1	0,000157	0,000628	0,00393	0,0158	0,0642	0,148
2	0,0201	0,0404	0,103	0,211	0,446	0,713
3	0,115	0,185	0,352	0,584	1,005	1,424
4	0,297	0,429	0,711	1,064	1,649	2,195
5	0,554	0,752	1,145	1,610	2,343	3,000
6	0,872	1,134	1,635	2,204	3,070	3,828
7	1,239	1,564	2,167	2,833	3,822	4,671
8	1,646	2,032	2,733	3,490	4,594	5,527
9	2,088	2,532	3,325	4,168	5,380	6,393
10	2,558	3,059	3,940	4,865	6,179	7,267
11	3,053	3,609	4,575	5,578	6,989	8,148
12	3,571	4,178	5,226	6,304	7,807	9,034
13	4,107	4,765	5,892	7,042	8,634	9,926
14	4,660	5,368	6,571	7,790	9,467	10,821
15	5,229	5,985	7,261	8,547	10,307	11,721
16	5,812	6,614	7,962	9,312	11,152	12,624
17	6,408	7,255	8,672	10,085	12,002	13,531
18	7,015	7,906	9,390	10,865	12,857	14,440
19	7,633	8,567	10,117	11,651	13,716	15,352
20	8,260	9,237	10,851	12,443	14,578	16,266
21	8,897	9,915	11,591	13,240	15,445	17,182
22	9,542	10,600	12,338	14,041	16,314	18,101
23	10,196	11,293	13,091	14,848	17,187	19,021
24	10,856	11,992	13,848	15,659	18,062	19,943
25	11,524	12,697	14,611	16,473	18,940	20,867
26	12,198	13,409	15,379	17,292	19,820	21,792
27	12,879	14,125	16,151	18,114	20,703	22,719
28	13,565	14,847	16,928	18,939	21,588	23,647
29	14,256	15,574	17,708	19,768	22,475	24,577
30	14,953	16,306	18,493	20,599	23,364	25,508

s'	$P = 0,50$	$P = 0,30$	$P = 0,20$	$P = 0,10$	$P = 0,05$	$P = 0,02$	$P = 0,01$
1	0,455	1,074	1,642	2,706	3,841	5,412	6,635
2	1,386	2,408	3,219	4,605	5,991	7,824	9,210
3	2,366	3,665	4,642	6,251	7,815	9,837	11,341
4	3,357	4,878	5,989	7,779	9,488	11,668	13,277
5	4,351	6,064	7,289	9,236	11,070	13,388	15,086
6	5,348	7,231	8,558	10,645	12,592	15,033	16,812
7	6,346	8,383	9,803	12,017	14,067	16,622	18,475
8	7,344	9,524	11,030	13,362	15,507	18,168	20,090
9	8,343	10,656	12,242	14,684	16,919	19,679	21,666
10	9,342	11,781	13,442	15,987	18,307	21,161	23,209
11	10,341	12,899	14,631	17,275	19,675	22,618	24,725
12	11,340	14,011	15,812	18,549	21,026	24,054	26,217
13	12,340	15,119	16,985	19,812	22,362	25,472	27,688
14	13,339	16,222	18,151	21,064	23,685	26,873	29,141
15	14,339	17,322	19,311	22,307	24,996	28,259	30,578
16	15,338	18,418	20,465	23,542	26,296	29,633	32,000
17	16,338	19,511	21,615	24,769	27,587	30,995	33,409
18	17,338	20,601	22,760	25,989	28,869	32,346	34,805
19	18,338	21,689	23,900	27,204	30,144	33,687	36,191
20	19,337	22,775	25,038	28,412	31,410	35,020	37,566
21	20,337	23,858	26,171	29,615	32,671	36,343	38,932
22	21,337	24,939	27,301	30,813	33,924	37,659	40,289
23	22,337	26,018	28,429	32,007	35,172	38,968	41,638
24	23,337	27,096	29,553	33,196	36,415	40,270	42,980
25	24,337	28,172	30,675	34,382	37,652	41,566	44,314
26	25,336	29,246	31,795	35,563	38,885	42,856	45,642
27	26,336	30,319	32,912	36,741	40,113	44,140	46,963
28	27,336	31,391	34,027	37,916	41,337	45,419	48,278
29	28,336	32,461	35,139	39,087	42,557	46,693	49,588
30	29,336	33,530	36,250	40,256	43,773	47,962	50,892

* Для больших величин s' используйте приложение V указанной книги при $u = \sqrt{2s' - 1} - \sqrt{2\chi^2}$ и $P = \varphi - 1 (y)$.

Из таблицы 7.6 следует, что $P(n) = \frac{\varepsilon^n e^{-\varepsilon}}{n!}$ и $\varepsilon = \bar{n}$, так что закон Пуассона принимает вид уравнения (7.85), причем величина $\bar{n}$ определяется из экспериментальных данных. Процесс вычислений остается тем же самым, только величины $P(n)$ подсчитываются по уравнению (7.85). В данном случае добаваются согласования формулы с опытными данными по двум показателям: по общему числу благоприятных событий и по среднему значению $\bar{n}$. Поэтому число степеней свободы равно

$$s' = m - 2 = 21 - 2 = 19.$$

Аналогичным образом можно исследовать и другие законы распределения, приведенные в таблице 7.6. Эти законы более сложные и требуют значительно большего объема работы, чем в нашей гипотетической задаче.

В заключение необходимо сделать замечание относительно этой гипотетической задачи. Принятое нами в расчетах количество снарядов не является характерным. Оно было выбрано исключительно в целях удобства вычислений. Статистические методы можно успешно применять и в задачах, где число наблюдаемых значений величины составляет лишь небольшую часть от 1000 серий данных, которые мы использовали при расчетах.

ЛИТЕРАТУРА

Специального характера

1. Morse P. M. and Kimball G. E., Methods of Operations Research, The Technology Press of Massachusetts Institute of Technology and John Wiley and Sons, Inc., New York, Chapman and Hall, Ltd., London. (Есть русский перевод: Морз Ф. М. и Кимбелл Дж. Е., Методы исследования операций, Издательство «Советское радио», М., 1956.)
2. Fry, T. C., Probability and Its Engineering Uses, D. Van Nostrand Co., Inc., Princeton, N. Y.
3. Uspensky J. V., Introduction to Mathematical Probability, McGraw-Hill Book Co., Inc., New York.
4. Brainerd H. B., Probability for Instrument Engineering Applications, Instrumentation Laboratory Engineering Memorandum E-101 Massachusetts Institute of Technology.
5. Simon P. and de Laplace M., A Philosophical Essay on Probabilities, Dover Publications, New York.
6. Harry Ch. H., The Probabilities of Success Associated with Small Scale Military Missions, BAUER Report DR 1136.
7. Draper, McKay and Lees, Instrument Engineering, vol. I, McGraw-Hill Book Co., Inc., New York.

Общего характера (ссылки в тексте нет)

8. Batchelor J. H., Operations Research, A Preliminary Annotated Bibliography, Case Institute of Technology, Cleveland, 1952.
9. Baxter J. P., III, Scientists Against Time, Little, Brown and Company, Boston, 1946.

10. Blackett P. M. S., Operational Research, Advance of Science, April 1948.
11. Crowther J. G. and Whiddington H. M., Science at War, H. M. Stationery Office, London, 1948.
12. Gerstin, Stanley, Defense Contracts, How to Sell to the Navy, Signal Corps and Air Force, Tele-Tech, March, April, May, 1951.
13. Goodeve Ch., Operational Research, *Nature*, 161, 377 (1948).
14. Hald A., Statistical Theory With Engineering Applications, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1952. (Есть русский перевод: Хальд А., Математическая статистика с техническими приложениями, Издательство, М., 1956.)
15. Horvath W., Operations Research—A Scientific Basis for Executive Decisions, *The American Statistician*, 2, № 5, 6 (1948).
16. Kimball G. E., Area of Usefulness of Game Theory in Operations Research, Columbia University Press, New York.
17. King G. W., Operational Analysis, Arthur D. Little, Inc., Cambridge, Mass., 1951.
18. Kittel Ch., The Nature and Development of Operations Research, *Science*, 105, 150 (1947).
19. Lanchester F. W., Aircraft in Warfare; the Dawn of the Fourth Arm, Constable and Company, London, 1916.
20. McKinsey J. C. C., Introduction To The Theory of Games, McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, 1952.
21. Steinhardt J., jr., The Role of Operations Research in the Navy, *U. S. Naval Institute Proceedings*, 72, 649 (1946).
22. Thiesmeyer L. R. and Burchard J., *Combat Scientists*, Little, Brown and Company, Boston, 1947.
23. Van Neumann J. and Morgenstern O., Theory of Games and Economic Behavior, Princeton University Press, Princeton, 1944.
24. Parson N. A., Guided Missiles in War and Peace, Co., Inc., New York, 1952.
25. Wilson E. B., An Introduction to Scientific Research, McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, 1952.
26. Good I. J., Probability and the Weighing of Evidence, Charles Griffen and Co., Ltd., London.

ЧАСТЬ II
БОЕВЫЕ ЧАСТИ

Читатель, который внимательно изучил материал, изложенный в предыдущих книгах серии «Основы проектирования управляемых снарядов» и в первом разделе настоящей книги, приобрел немало сведений. Были изложены основные положения и рекомендована открытая литература, хотя читатель, несомненно, понимает, что по соображениям секретности о многих вещах мы не говорили.

При изучении раздела «Боевые части управляемых снарядов» у читателя может сложиться мнение, что здесь еще больше таких вещей, о которых мы предпочли умолчать — особенно это относится к количественным характеристикам. Это объясняется тем, что сведения о боевых частях управляемых снарядов содержатся почти исключительно в закрытой литературе, поскольку боевые части имеют применение только в военном деле. Настоящий раздел представляет собой первую попытку изложения этого предмета в открытой литературе.

Оказывается, можно многое сказать о боевых частях управляемых снарядов, если придерживаться принципов, вытекающих из физических законов, и вдумчиво осмыслить весь материал, помещенный в открытой литературе. После ознакомления с содержанием настоящего раздела читатель будет хорошо подготовлен к изучению закрытой литературы. Так же обстоит дело и с другими разделами настоящей серии книг, за исключением того обстоятельства, что по этим разделам может быть рекомендована и дополнительная открытая литература.

Предполагается, что читатель уже знаком с предыдущими книгами серии. В настоящем разделе не будет повторяться материал, который можно найти в предыдущих разделах, за исключением тех случаев, когда имеются различия в трактовке вопросов или необходимо выделить очень важные моменты. Больше того, мы не будем останавливаться на деталях технического порядка, изложенных в других источниках, если это не является необходимым для показа той или иной особенности боевой части управляемого снаряда.

Настоящий раздел включает девять глав. В главе 1 рассматривается назначение боевых частей и вводится ряд терминов, важных для понимания предмета. Несмотря на то, что обычно все снаряды имеют боевые части, практика настоятельно требует обоснования необходимости снабжения боевыми частями управляемых снарядов. Это обоснование нужно для инженера-неспециалиста, который может думать, что каждый снаряд обязательно попадает в цель, и поэтому может подвергнуть сомнению ценность боевых частей.

В главе 2 излагается организация разработки и производства боевых частей управляемых снарядов. Она представляет особый интерес для студентов, которым предстоит впоследствии работать в области производства боевых частей. В эту главу также включена методика выработки основных требований, предъявляемых к боевым частям военным ведомством-заказчиком, на базе которых конструктор разрабатывает проект боевой части. При этом важно знать и правильно оценить все существенные факторы, относящиеся к системе оружия, ее назначению и методам боевого использования.

В главе 3 описывается организация работы конструктора по созданию боевых частей на основе данных, перечисленных во второй главе. Рассматриваются организационные требования, связанные с развитием боевых частей управляемых снарядов, и предварительная работа конструктора. Приводятся сведения из некоторых специальных областей знания, необходимые для создания боевых частей. Хотя читатель, возможно, предвидел потребность в использовании различных областей знания, он все же, вероятно, будет поражен той широтой знаний и опыта, которые необходимы для проектирования боевых частей управляемых снарядов.

Детальное рассмотрение вопроса начинается с главы 4, где говорится о целях, для поражения которых предназначены управляемые снаряды. Приводится классификация целей и перечисляются их важнейшие характеристики. В этой главе также определяется степень поражения цели и рассматриваются те уязвимые места цели, при поражении которых цель выводится из строя.

Результаты исследования уязвимости целей используются в следующей главе, где речь идет о боевых зарядах управляемых снарядов. Они рассматриваются с точки зрения характера цели, которую требуется уничтожить, и с точки зрения используемого взрывчатого вещества. Сведения из главы 5 применяются впоследствии при рассмотрении взрывателей, т. е. устройств для подрыва боевых зарядов в тот момент, когда эффективность их действия является максимальной.

В главе 6 анализируются методы разработки (на основе характеристик цели, боевого заряда и системы управления) требований к взрывателям с задачей обеспечить оптимальную эффективность действия боевой части. «Взрыватель», который должен отвечать этим требованиям, рассматривается на основе анализа возможных взрывательных устройств. Описания конкретных конструкций этих устройств умышленно не приводится. Общие проблемы проектирования взрывателей рассматриваются позднее, в главе 8.

Глава 7 касается другого компонента боевой части — предохранительного устройства, которое делает боевую часть безопасной в обращении. Это устройство также защищает взрыватели от радиопомех, предотвращает преждевременный взрыв боевого заряда. В этой главе перечисляются основные требования, предъявляемые к предохранительным устройствам, и рассматриваются способы выполнения этих требований. Специфические требования к отдельным узлам приводятся в главе «Некоторые вопросы организации производства систем применительно к боевым частям».

В главе 8 рассматриваются наиболее важные проблемы организации производства систем боевых частей. Значительное внимание уделяется вопросам надежности работы и разумной экономии приборов. Особый интерес представляет метод повышения надежности работы путем дублирования устройств.

Глава 9 касается последнего этапа в создании боевых частей для снарядов — испытаний, которые определяют пригодность оружия для использования в боевых условиях. Речь идет о летных испытаниях на полигоне и войсковых испытаниях. Эти вопросы настолько важны, что заслуживают специального рассмотрения (см. четвертую книгу настоящей серии). Здесь же рассматриваются только отдельные моменты, относящиеся к испытанию боевых частей снарядов.

* * *

Автор хочет выразить свою благодарность многим лицам, чья помощь в подготовке и просмотре материала, изложенного в настоящем разделе, сделала возможным его издание.

Наиболее ценными были указания, руководство и советы со стороны капитана 2 ранга Грейсона Мерилла (редактора серии), работа Мортена Гейла из Эмерсоновской исследовательской лаборатории, который принимал участие в редактировании и подготовке к печати нескольких разделов серии, и советы д-ра Дональда П. Бэрчема директора Эмерсоновской исследовательской лаборатории.

Автор также благодарит за ценные указания многих рецензентов из военных учреждений, просмотревших материал с точки зрения секретности. Особенно полезными были замечания Ф. С. Дайера и Дж. Брауна из лаборатории вооружения экспериментального центра морской авиации и К. Д. Данкла из лаборатории боеприпасов Самуила Фельтмана (Пикатинский арсенал).

Гарольд Гольдберг.

НАЗНАЧЕНИЕ БОЕВЫХ ЧАСТЕЙ

1.1. Введение

Каждый управляемый снаряд, используемый в качестве оружия, снабжен *боевой частью*. Боевая часть включает в себя *боевой заряд*, *взрыватель* и *предохранительное устройство*. Эти три элемента встречаются не только в управляемых снарядах — они представляют собой результат эволюционного развития снарядов вообще. Преимущества метательных снарядов как боевого средства перед холодным оружием были замечены человеком еще очень давно. Первыми снарядами были камни. Постепенно размеры, скорость и дальность полета снарядов возрастали. Праща удлинила руку человека; *лук* позволил накапливать энергию для пуска стрелы с *большой скоростью* на большие расстояния; катапульта представляла собой по существу огромный лук, который позволял аккумулировать энергию многих людей или животных; наконец, появление аккумулятивной химической энергии в виде пороха привело к такому росту размеров снарядов, их скорости и дальности полета, который означал техническую революцию. Ядерная энергия произвела новую революцию в технике, однако ее применение для метания снарядов пока еще не осуществлено.

На протяжении всей истории развития оружия изобретатели искали пути увеличения разрушительной мощи снарядов, стремясь сделать ее больше той, которая определяется их кинетической энергией. Так появились горящие и отравленные стрелы, катапульты стали метать горящую смолу или грязь (первое «биологическое» оружие), а в пушечные ядра были помещены разрывные заряды и шрапнель. Современные *боевые заряды* управляемых снарядов представляют собой продукт этого развития. Появление *взрывателей* было связано с тем обстоятельством, что некоторые снаряды действовали более эффективно при подрыве их в определенный, наивыгоднейший момент времени. Наконец, после многих печальных случаев, когда преждевременный разрыв снаряда уничтожал вместо противника свой обслуживающий персонал, конструкторы боеприпасов убедились в необходимости создания *предохранительных устройств*.

Итак, современные боевые части появились в результате стремления увеличить разрушительную мощь снаряда, сделать ее выше той, которая определяется его кинетической энергией, в результате стремления обеспечить максимальное разрушающее действие при разрыве снаряда в определенный момент времени и, наконец, в результате заботы о том, чтобы снаряд был безопасен в обращении.



Рис. 1.1. Назначения элементов боевой части.

Необходимо отметить, что приведенная терминология (боевой заряд — warhead, взрыватель — fuze, и предохранительное устройство — safety and arming mechanism как составные элементы боевой части — armament) не является общепринятой среди конструкторов боевых частей. Тот факт, что боевая часть должна выполнять упомянутые три функции, никем не оспаривается, но некоторые конструкторы предпочитают называть «боевой частью» только боевой заряд, а некоторые понимают под «взрывателем» комбинацию взрывателя и предохранительного устройства. Несмотря на существующие расхождения в терминологии, в настоящем разделе боевые части будут рассматриваться так, как определено выше, т. е. состоящими из

трех элементов, хотя в конструкциях конкретных образцов снарядов некоторые функции элементов боевых частей могут выполняться другими частями управляемых снарядов. Функции боевой части снаряда показаны на рис. 1.1.

Ниже будут рассмотрены основные характеристики составных элементов боевых частей. Глава заканчивается обоснованием необходимости боевых частей для управляемых снарядов. В последующих главах элементы боевых частей будут рассмотрены более детально.

1.2. Боевой заряд

Боевой заряд — полезный груз снаряда — является его единственным существенным поражающим элементом. Кинетическая энергия снаряда и химическая энергия невыгоревшего топлива обычно не принимаются во внимание при расчете боевой эффективности управляемых снарядов.

Боевой заряд может поразить или разрушить цель:

- при превращении химической или ядерной энергии в энергию взрыва;
- готовыми элементами (субснарядами), которые могут иметь свои боевые части;
- с помощью химических веществ, которые разрушают материалы или отравляют живые организмы;
- с помощью биологических или радиоактивных веществ, поражающих живые организмы и заражающих местность.

Тип и размеры боевого заряда, который должен быть использован в каждом конкретном случае, зависят от характеристик цели и снаряда. *Любой управляемый снаряд, используемый в качестве боевого средства, независимо от точности работы его системы управления имеет боевой заряд.*

1.3. Взрыватель

Взрыватель — это тот элемент боевой части, который определяет оптимальный момент времени для детонации и инициирует взрыв боевого заряда. Оптимальный момент времени зависит от типа цели и взаимного положения снаряда и цели. Хорошо сконструированный взрыватель определяет оптимальный момент взрыва для любого случая встречи снаряда с целью. Иначе говоря, взрыватель определяет наивыгоднейший момент для взрыва вне зависимости от того, является ли траектория снаряда оптимальной. Для определения момента подрыва используются различные принципы. Например, для этой цели может использоваться энергия, излучаемая или отражаемая целью, или же применяется принцип определения положения снаряда

путем измерения ускорения или времени полета. Все эти способы рассмотрены в главе 6. Взорватель может быть независимым от системы управления снарядом или же быть частично или полностью связанным с ней. Примером частичной связи является взорватель, который самостоятельно обнаруживает цель, но нуждается в помощи системы управления для уточнения деталей цели. Примером полной взаимосвязи между взорвателем и системой управления является случай, когда вычисление момента подрыва производится исключительно по данным, получаемым системой управления. По сложности устройства взорватели могут быть самыми различными, начиная с простейшего контактного взорвателя и кончая системой, которая определяет положение и скорость цели и решает задачу встречи снаряда с целью для определения наивыгоднейшего момента подрыва боевой части.

1.4. Предохранительное устройство

Предохранительное устройство является промежуточным механизмом между взорвателем и боевым зарядом. Оно замыкает детонационную цепь между взорвателем и боевым зарядом только после того, как взрыв боевой части станет неопасным для обслуживающего персонала. Дополнительное требование к предохранительному устройству иногда заключается в самоликвидации снаряда путем подрыва боевого заряда по истечении определенного промежутка времени, если встреча с целью не вызвала детонации боевой части.

Однако основное назначение предохранительного устройства состоит в разобщении детонационной цепи между взорвателем и боевым зарядом, когда взрыв боевой части является нежелательным. Если боевая часть сконструирована правильно и предохранительное устройство включено, то вероятность непредвиденного взрыва при любых обстоятельствах очень мала. Включенное положение предохранительного устройства поэтому называется «безопасным положением». Предохранительное устройство должно оставаться в таком положении по крайней мере до тех пор, пока обслуживающий персонал находится в пределах поражающего действия боевого заряда. Выключение (перевод в боевое положение) предохранительного устройства должно производиться до наступления наивыгоднейшего момента для взрыва боевого заряда при встрече снаряда с целью.

Желательно производить выключение предохранительного устройства как можно ближе в наивыгоднейшему моменту взрыва, чтобы предотвратить подрыв боевого заряда в результате воздействия на взорватель создаваемых противником помех. Таким образом, предохранительное устройство может оставаться в «безопасном положении» даже за пределами зоны,

в которой взрыв боевого заряда может причинить ущерб личному составу или материальной части.

Итак, до некоторого момента предохранительное устройство должно находиться в «безопасном положении». Затем, после его выключения, проходит еще некоторый промежуток времени до момента срабатывания взрывателя. В соответствии с этим

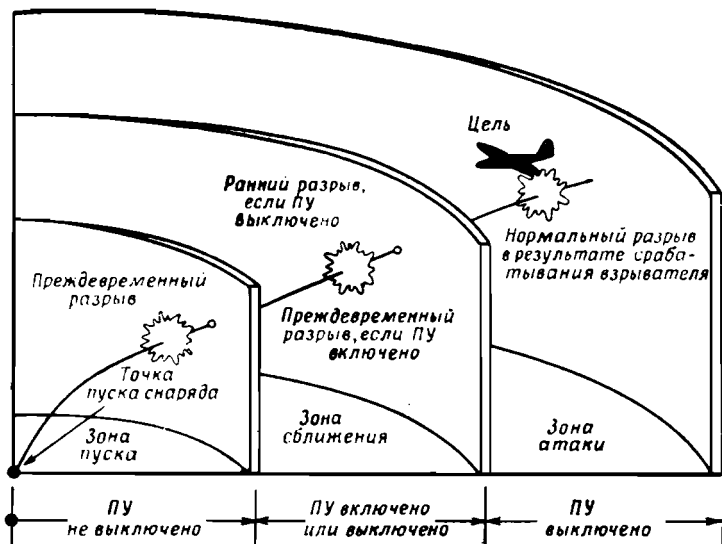


Рис. 1.2. Условия получения преждевременных и ранних разрывов снаряда.

введем два термина: «преждевременный разрыв» и «ранний разрыв». *Преждевременным* разрывом называют детонацию, которая произошла до выключения предохранительного устройства. В основном это может произойти в результате повреждения предохранительного устройства, т. е. при невыполнении им своей основной функции.

Ранним разрывом называют детонацию боевой части, происшедшую в период между выключением предохранительного устройства и моментом, когда взрыватель должен нормально сработать. Ранний разрыв происходит обычно при неправильной работе механизмов взрывателя или в результате воздействия помех со стороны противника и очень редко вызывается повреждением предохранительного механизма или боевого заряда. Термины «ранний» и «преждевременный» часто смешивают. На рис. 1.2 показаны условия стрельбы, при которых разрывы снарядов должны рассматриваться как ранние или как преждевременные.

1.5. Необходимость боевых частей для управляемых снарядов

Конечной задачей управляемого снаряда является доставка боевой части в точку, находящуюся на таком расстоянии от цели, чтобы детонация боевого заряда причинила максимальное разрушение цели. Это категорическое утверждение подчеркивает, что управляемый снаряд *сам по себе* не является боевым средством и что он должен быть снабжен полезным грузом (боевой частью), обладающим сильным разрушительным действием. Только при этом условии управляемый снаряд становится эффективным средством борьбы. Этот вывод очевиден, если подразумевается большой снаряд с атомной боевой частью, но он не всегда ясен, если речь идет о небольших снарядах, применяющихся для стрельбы по воздушным или наземным целям. На результаты стрельбы оказывают влияние следующие факторы: наличие ошибок управления, вызывающих «рассеивание», трудность сосредоточения всей энергии взрыва на цели для ее разрушения и необходимость обеспечения максимально возможной области поражения.

1.6. Ошибки управления

Так же как и стрельба всеми другими видами снарядов, стрельба управляемыми снарядами сопровождается рассеиванием, связанным с ошибками управления полетом. Если произвести несколько выстрелов одинаковыми снарядами при одинаковых (насколько возможно) условиях стрельбы, то разрывы расположатся вокруг какой-то средней точки. Если условия стрельбы будут меняться, например если атмосферные условия каждый раз будут иными или цель станет произвольно смещаться, то распределение разрывов, или «рассеивание», может характеризоваться весьма значительной площадью. В этом отношении управляемые снаряды не отличаются от других видов снарядов, таких, как артиллерийские снаряды, неуправляемые реактивные снаряды и т. п. Единственной особенностью управляемых снарядов является то, что управление их полетом может вестись практически на всей траектории с учетом любых маневров цели. В результате управляемые снаряды имеют большие дальности стрельбы при данном рассеивании и более высокую вероятность попадания в цель при этих дальностях.

Для того чтобы правильно понять сущность рассеивания, рассмотрим семейство траекторий большого числа снарядов, выстреленных при одинаковых условиях. Вследствие рассеивания траектории расположатся вокруг средней траектории по некоторому статистическому закону. Если провести перед целью плоскость, перпендикулярную средней траектории, то точки пере-

сечения траектории с этой плоскостью расположатся в «зоне рассеивания» снарядов, как показано на рис. 1.3. Проекция цели на ту же плоскость образует «эффективную площадь цели». Указанные понятия можно использовать для анализа соотношения между рассеиванием снарядов и размерами цели. Центр зоны рассеивания снарядов должен совпасть с центром эффективной площади цели, если система управления работает нормально.

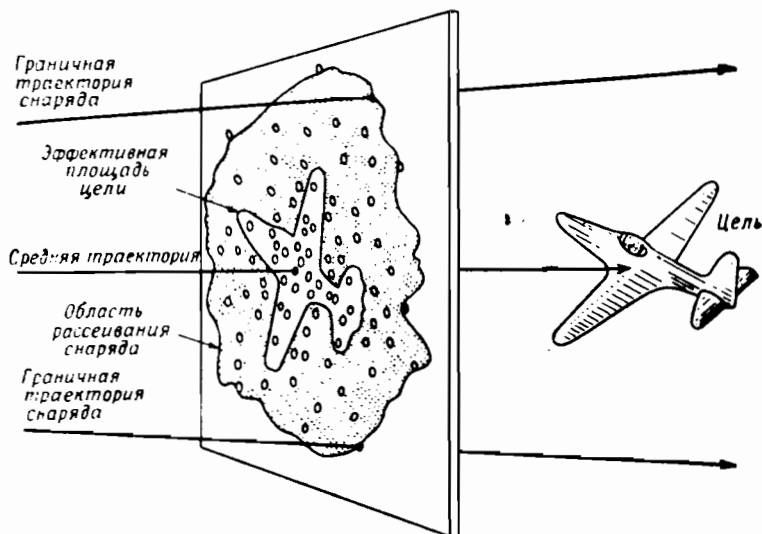


Рис. 1.3. Соотношение между областью рассеивания снаряда и эффективной площадью цели.

Могут иметь место три случая: 1) эффективная площадь цели больше зоны рассеивания; 2) эффективная площадь цели и зона рассеивания примерно одинаковы; 3) эффективная площадь цели меньше зоны рассеивания. В случае ненормальной работы системы управления эффективная площадь цели и зона рассеивания могут даже частично не совпадать. В первом случае будет получено большое число прямых попаданий снарядов в цель, во втором случае это число будет несколько меньше, а в третьем случае число попаданий и промахов будет зависеть от относительных размеров цели и зоны рассеивания.

Если для поражения цели требуется прямое попадание и размеры цели невелики, то система управления должна работать с очень большой точностью. Если зона рассеивания больше эффективной площади цели, то для получения прямого попадания в цель необходимо произвести большое число выстрелов. Например, для получения вероятности хотя бы одного попадания,

равной 0,99, необходимо произвести в среднем 7 выстрелов, если вероятность попадания при одном выстреле равна 0,5; 21 выстрел, если вероятность попадания при одном выстреле равна 0,2; наконец, 44 выстрела, если вероятность попадания при каждом выстреле равна 0,1 (см. §2.5, рис. 2.2). Поэтому перед конструктором управляемого снаряда всегда возникает проблема: увеличить размеры и вес снаряда, чтобы уменьшить рассеивание (хотя эти меры не всегда приводят к желаемым результатам), или же снабдить снаряд такой боевой частью, которая обеспечит поражение цели даже в случае промаха? При большом рассеивании отрицательные стороны второго способа становятся очевидными.

Все изложенное выше относилось к случаю стрельбы по воздушной цели в предположении, что цель может быть уничтожена при попадании одного снаряда. Однако существуют и другие цели (например, крупные наземные цели), для разрушения которых требуется более одного снаряда, хотя площадь цели может быть больше зоны рассеивания. Чрезмерное рассеивание нежелательно даже и в этом случае, поскольку для полного разрушения цели могут потребоваться дополнительные попадания. Это объясняется тем, что распределение попаданий в результате рассеивания не может быть оптимальным и, кроме того, несколько снарядов могут попасть в цель, уже разрушенную ранее попавшими снарядами.

Читатель может спросить, какое это имеет отношение к вопросу о необходимости снабжения управляемых снарядов боевыми частями? Эта необходимость будет доказана ниже как для случаев, когда цель уничтожается при прямом попадании, так и для случаев, когда поражение цели может быть обеспечено даже при промахе.

1.7. Зона поражения

Продолжая обосновывать необходимость боевых частей для управляемых снарядов, мы должны рассмотреть термин «зона поражения». Представим себе, что снаряд является фокусом, в котором помещен поражающий элемент, и что вокруг этой точки образована поверхность, обозначающая границу эффективного действия снаряда. Объем, ограниченный такой поверхностью, называется *зоной поражения снаряда*. Она может просто совпадать с объемом самого снаряда, если боевая часть отсутствует (например, в пушечном ядре), или превосходить этот объем при наличии боевой части. Теперь представим себе, что зона поражения движется вместе со снарядом по траектории (рис. 1.4). Если поражающий элемент подействует в момент, когда зона поражения и цель частично совпадают, то цель

будет поражена. Если снаряд имеет несколько боевых частей, то его можно рассматривать как группу снарядов, каждый из которых имеет свою собственную зону поражения.

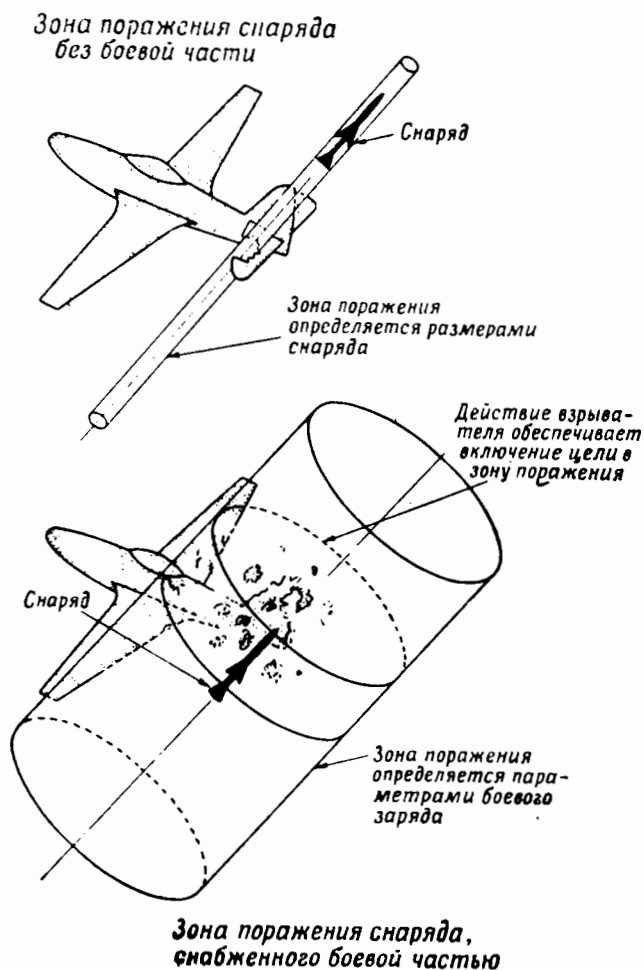


Рис. 1.4. Увеличение зоны поражения снаряда при добавлении боевой части.

Рассмотрим теперь снаряд, не имеющий боевой части. Он может поразить цель только благодаря своей кинетической энергии, определяющейся скоростью относительно цели, или взрыву остатков жидкого топлива вблизи цели. Обычно лишнего топлива на снаряде не бывает, так как оно утяжелило бы конструкцию, и наилучшим полезным грузом, если нужно уничтожить

цель, является боевая часть. Поэтому при определении поражающего действия снаряда можно пренебречь эффектом взрыва остатков топлива и рассматривать только относительную кинетическую энергию снаряда. При скорости цели 1000 *фут/сек* снаряд, летящий со скоростью 2000 *фут/сек*, может иметь относительную скорость от 1000 до 3000 *фут/сек*. Средняя кинетическая энергия относительно цели составляет 77 600 *фут·фунт* на каждый фунт веса снаряда. Если снаряд весит 2000 фунтов, то его средняя кинетическая энергия относительно цели будет равна 15 500 000 *фут·фунт*. Такого количества энергии при правильном ее использовании вполне достаточно для уничтожения самолета. К сожалению, пули и снаряды, летящие с большими скоростями, обычно пробивают легкие цели насквозь и расходуют лишь незначительную часть своей энергии. Другими словами, кинетическую энергию быстро летящего снаряда трудно сосредоточить на цели. Поэтому снаряд, лишенный боевой части, имеет зону поражения, определяющуюся собственными размерами снаряда, т. е. он может только пробить отверстие, равное площади поперечного сечения снаряда (см. рис. 1.4), не уничтожив цели.

Допустим теперь, что мы поместили в снаряд несколько фунтов взрывчатого вещества. Современные взрывчатые вещества имеют энергию взрыва порядка 1 400 000 *фут·фунт/фунт*. Десять фунтов взрывчатого вещества уже будут иметь энергию, эквивалентную вычисленной ранее кинетической энергии снаряда. Больше того, если произвести взрыв этого боевого снаряда при прохождении снаряда через цель, то энергия взрыва будет распространяться во все стороны и эффективно воздействовать на цель. Таким образом, при добавлении 10 фунтов веса можно не только удвоить потенциальную энергию снаряда, но и существенно повысить степень воздействия этой энергии на цель. Кроме того, у снаряда появляется боевая часть и, следовательно, увеличивается его зона поражения.

При дальнейшем увеличении веса боевого заряда может оказаться, что энергия снаряда превышает величину, необходимую для полного разрушения цели при прямом попадании; тогда зона поражения возрастает настолько, что поражение цели происходит даже в случае промаха снаряда. Конструктор не может произвольно увеличивать зону поражения, так как лишнее количество взрывчатого вещества увеличивает вес реактивного снаряда. Поэтому он должен решить, следует ли увеличить вес приборов управления, чтобы уменьшить рассеивание снарядов, или увеличить вес боевого заряда, чтобы уменьшить влияние рассеивания.

Только в одном вопросе положение совершенно ясно для конструктора. Известно, что энергия атомного взрыва несоизме-

римо больше энергии взрыва обычных взрывчатых веществ. Следовательно, можно получить зону поражения колоссальных размеров без существенного увеличения веса боевой части путем перехода от обычного химического взрывчатого вещества к ядерному. Может оказаться даже, что в столь большой зоне поражения нет никакой надобности. Таким образом, конструктор всегда может резко увеличить размеры зоны поражения, чтобы компенсировать влияние рассеивания, если размеры снаряда достаточно велики, чтобы нести атомный заряд.

Итак, необходимость снабжения снарядов боевыми частями становится очевидной. Надо сказать, что, кроме ядерных, существуют еще и другие вещества, способные в значительной мере увеличить зону поражения снаряда при относительно малом весе боевой части. Это химические, бактериологические и радиоактивные вещества. Химические вещества могут использоваться против воздушных целей, а бактериологические и радиоактивные вещества, по-видимому, могут применяться в основном для борьбы с наземными целями. Характеристики боевых частей, снаряженных такими веществами, будут рассмотрены более подробно в последующих главах.

РАЗРАБОТКА ТАКТИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ К БОЕВЫМ ЧАСТЯМ

2.1. Введение

В главе «Процесс создания управляемых снарядов» (в разделе «Исследование операций») настоящей книги описана роль государственных учреждений в разработке управляемых снарядов. В настоящей главе рассматривается более детально участие этих учреждений в научно-исследовательских работах и разработках, проводимых в области боевых частей управляемых снарядов.

В отличие от области управления и аэродинамики реактивных снарядов разработка и исследование боевых частей сконцентрированы в небольшом числе государственных учреждений. В прошлом моральное порицание со стороны общественности и отсутствие устойчивого рынка сбыта внутри страны отбивали у американских бизнесменов охоту заниматься этими вопросами. Конечно, если бы боевые части имели такое же очевидное практическое применение, как системы управления или аэродинамика, то упомянутые факторы не остановили бы предпринимателей, несмотря на большие накладные расходы, связанные с необходимыми при разработке боевых частей обширными полигонными испытаниями. В общем частные предприниматели не желали работать в этой области, и правительство было вынуждено организовать свою собственную промышленность по производству боевых частей.

В результате событий, происшедших после второй мировой войны, обстановка в Соединенных Штатах изменилась. Военное производство в настоящее время составляет существенную часть нашей экономики. В связи с перспективой сохранения теперешнего состояния международной напряженности потребности в военном снаряжении продолжают возрастать. Предвидя создание устойчивого рынка сбыта военной продукции, многие частные фирмы энергично приступили к разработке боевых частей управляемых снарядов. Правительство облегчает решение проблем, требующих дорогостоящих испытаний, путем оказания помощи подрядчикам в проведении испытаний, а также путем финансирования подрядчиков, имеющих в своем распоряжении ограниченные средства.

2.2. Государственные учреждения, занимающиеся разработкой боевых частей управляемых снарядов

Работой учреждений, которые в первую очередь занимаются исследованием и разработкой боевых частей для управляемых снарядов, руководят три основных государственных учреждения: Министерство армии, Управление вооружений Министерства военно-морских сил и Комиссия по атомной энергии. Работы в одних государственных лабораториях ведутся государством, в других — подрядчиками. Испытания боевых частей в реальных полетных условиях производятся на специальных полигонах, находящихся в распоряжении различных министерств.

Список основных центров, работающих под руководством или наблюдением указанных государственных учреждений, приводится ниже.

Химический корпус, Министерство армии

Эджвудский арсенал, Эджвуд (Мэриленд).

Артиллерийско-технический корпус, Министерство армии

Даймондская лаборатория взрывателей, Вашингтон (округ Колумбия),

Пикатинский арсенал, Дувр (Нью-Джерси),

Исследовательский центр боеприпасов, Джолиет (Иллинойс),

Франкфордский арсенал, Филадельфия (Пенсильвания),

Абердинский исполнительный полигон, Абердин (Мэриленд),

Уайтсандский испытательный полигон, Уайт-Сандс (Нью-Мексико),

Рэдстоунский арсенал, Хантсвилл (Алабама).

Управление вооружений, Министерство ВМС

Артиллерийско-техническая лаборатория ВМС Уайт-Оук (Мэриленд),

Артиллерийско-техническая лаборатория ВМС Корона (Калифорния),

Морской испытательный полигон, Чайна-Лейк (Калифорния),

Лаборатория прикладной физики при университете Джона Гопкинса, Сильвер-Спринг (Мэриленд).

Комиссия по атомной энергии

Сандиа Корпорейшн, Альбукерке (Нью-Мексико),

Лос-Аламосская научная лаборатория (Нью-Мексико),

Лаборатория излучений Калифорнийского университета.

Ливермор (Калифорния).

Эти учреждения могут заключать договорные соглашения с частными фирмами, специализирующимися в определенной

области, а также с государственными научно-исследовательскими учреждениями.

Следует отметить, что Министерство ВВС не входит в число основных государственных учреждений, руководящих разработкой боевых частей управляемых снарядов. Такое положение создалось потому, что перечисленные выше центры появились еще до подписания «Ки-Уэстского соглашения», о котором шла речь в § 1.1 первой части настоящей книги. Поэтому военно-воздушные силы используют уже существующие учреждения для удовлетворения своих потребностей в боевых частях снарядов.

2.3. Определение тактико-технических требований к боевым частям

Характеристики системы оружия не могут быть выбраны конструктором произвольно. Они должны соответствовать требованиям, составленным заказчиком, т. е. тем военным ведомством, которое руководит разработкой комплекса управляемых снарядов. Ниже будет показано, как определяются подобные требования и как выбираются исходные данные для проектирования боевых частей. Читатель должен предварительно вспомнить содержание § 1.2 (часть 1-я), особенно пунктов «Определение потребности в новом образце» и «Выработка тактико-технических требований». Там рассматривались причины, вызывающие появление новых видов оружия, и основные инстанции, определяющие их тактико-технические характеристики.

Для определения тактико-технических требований к составным частям нового образца сначала требуется собрать необходимую информацию из различных источников. Эта информация часто представляется в форме ответов на различные конкретные вопросы. Из-за недостатка или ограниченности необходимых данных представленные ответы обычно не являются исчерпывающими и поэтому должны периодически пересматриваться с учетом новых сведений. Вопросы, на которые должны быть даны ответы, касаются в основном характеристик и значения системы оружия, а также условий ее боевого использования. Последующие параграфы дают представление о характере вопросов, ответы на которые необходимы для определения характеристик боевых частей конкретного образца управляемого снаряда. Число таких вопросов может достигать иногда до сотни и больше.

2.4. Вопросы, касающиеся системы оружия

1. К какому типу относится снаряд? Снаряды обычно классифицируют по местоположению точек старта и цели («воздух—воздух», «земля—воздух», «воздух—земля», «земля—земля»

и т. п.). Снаряды одного и того же класса имеют больше сходства друг с другом, чем со снарядами других классов. Общие характеристики снарядов накладывают первое ограничение на тип используемой боевой части. Место старта, как правило, не имеет особого значения для боевой части, в то время как положение цели оказывается весьма существенным. Таким образом, необходимо определить тип цели, для борьбы с которой предназначена боевая часть. Различают воздушные, наземные (надводные) и подземные (подводные) цели.

2. *Каков диапазон скоростей и высот полета снаряда в момент цели? Каково взаимное положение снаряда и цели (при отсутствии ее маневра) в момент встречи?* Вопросы такого рода выясняют условия встречи снаряда с целью, которые ограничивают время обнаружения цели и определяют требования к боевым частям. Время, необходимое для обнаружения цели, зависит от скорости встречи, а характеристики боевой части определяются частично взаимным положением цели и снаряда в момент встречи. Более полно эти вопросы освещены в главе 6.

3. *Каков тип системы управления, используемой на снаряде, и какова точность ее работы?* Этот вопрос обычно сопровождается рядом других вопросов, выясняющих более детально характеристики работы системы управления. В частности, необходимо установить: вид командных сигналов, вырабатываемых системой управления; их мощность и частоту; возможность взаимных помех между сигналами системы управления и радиовзрывателя; возможность управления взрывателем с помощью сигналов системы управления и способы передачи этих сигналов от системы управления к взрывателю. Некоторые системы управления обеспечивают достаточную величину отраженного сигнала вблизи цели для обнаружения ее без всякой дополнительной аппаратуры; другие же системы управления не могут этого сделать. Точность работы системы управления имеет огромное значение, так как она определяет собой тип и размеры необходимой боевой части, а также дальность действия взрывателя. В случае необходимости зона поражения боевой части, о которой шла речь в предыдущей главе, должна быть такой, чтобы компенсировать большое рассеивание. Если это не может быть выполнено из-за ограниченных размеров и веса снаряда, нужно немедленно пересмотреть проект всего комплекса управляемого снаряда.

4. *Каковы размеры и форма снаряда и допустимые габариты и вес боевой части?* Многие конструктивные параметры снаряда накладывают ограничения на характеристики боевой части. Боевая часть не только должна иметь допустимые габариты и вес, но также не должна оказывать заметного влияния на положе-

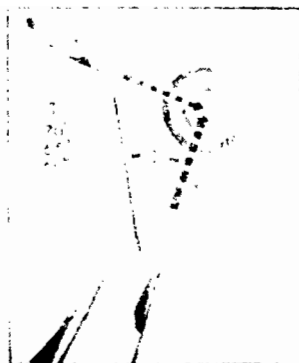


Рис. 2.1. Системы оружия, системы и условия эксплуатации являются факторами, которые должны учитываться при определении требований к основным частям управляемых стрелков.

ние центра тяжести и величины моментов. Расположение боевой части должно обеспечивать ее эффективное действие.

Следует позаботиться о размещении в снаряде приемного и передающего устройства взрывателей и спроектировать эти приборы так, чтобы они не усложняли конструкцию снаряда и не увеличивали заметно его лобовое сопротивление. Определенные детали боевой части должны быть соединены с деталями снаряда; элементы снаряда соединяются между собой через боевую часть. Конструкция боевой части, являющейся частью корпуса снаряда, должна соответствовать требованиям, предъявляемым к конструкции снаряда в целом.

5. Каковы размеры несущих поверхностей и воздушных рулей снаряда? Каковы максимальные углы отклонения рулей? Крылья и рули могут устанавливаться на корпусе снаряда вблизи расположения боевой части и взрывателя. Движения воздушных рулей, происходящие вблизи выводов антенн взрывателя, могут вызвать отраженные сигналы. Поэтому необходимо постоянное взаимодействие между конструкторами боевой части и корпуса снаряда с тем, чтобы обеспечить правильное функционирование боевой части.

6. Какие источники питания, находящиеся на борту снаряда, можно использовать для боевой части? Боевая часть, особенно взрыватель, нуждается в источниках питания. Для удешевления всей системы оружия желательно использовать единый источник для питания всех агрегатов снаряда, нуждающихся в энергии. Поскольку наиболее часто используется электрическая энергия, необходимо установить, каковы величины и частоты напряжений, потребных для питания различных агрегатов снаряда, а также каковы допустимые отклонения этих параметров. В случае если потребности различных агрегатов несовместимы, следует определить возможность использования нескольких независимых источников питания. Поскольку в процессе проектирования снаряда энергетические потребности непрерывно изменяются, необходимо постоянное взаимодействие конструкторов и в этих вопросах.

7. Какие температуры развиваются в различных деталях боевой части в результате работы реактивного двигателя и аэродинамического нагрева? Какие ударные и вибрационные нагрузки действуют на боевую часть, помещенную в снаряд? Очень важно знать максимальные значения температур различных частей снаряда. При полете снаряда со сверхзвуковыми скоростями температура его поверхности может достигать нескольких сот градусов. Такие температуры могут вывести из строя взрыватель и предохранительный механизм и даже вызвать преждевременный взрыв боевого заряда. Сильные вибрации и ударные нагрузки, возникающие в снаряде, ставят перед

конструкторами задачи, не встречавшиеся ранее в практике проектирования оружия. Природа вибрации и ударов в управляемых снарядах еще до конца не выяснена, и методы расчета элементов снаряда на прочность при этих условиях находятся, можно считать, в стадии разработки. Сейчас развиваются методы моделирования, позволяющие определить возникающие нагрузки в лабораторных условиях.

8. *Каковы осевые и поперечные ускорения, действующие на боевую часть при полете от точки старта до встречи с целью?* Ускорениям соответствуют силы, действующие на агрегаты боевой части, отличающиеся от ударов и вибраций. Они создают нагрузки на конструкцию. С другой стороны, эти ускорения часто используются для определения момента выключения предохранительного устройства. Обычно последнее измеряет ускорения, действующие на снаряд при пуске и на начальном участке полета, для определения скорости и пути, пройденного снарядом. Эти ускорения описаны в § 1.4 раздела «Пуск снарядов».

9. *Каковы максимальные углы отклонения оси снаряда от касательной и его траектории?* Обычно снаряд летит при некотором угле атаки, необходимом для подъема или совершения маневра. При определенных типах боевых частей, особенно предназначенных для поражения воздушных целей, эти отклонения являются весьма важными параметрами и в ряде случаев могут ухудшить характеристики боевой части. По этой причине конструктор боевой части может потребовать, чтобы в момент прекращения своей работы система управления полетом устанавливала бы рули в положение, соответствующее нулевой подъемной силе. Тогда дальнейший полет снаряда будет происходить по чисто баллистической траектории.

10. *Какого типа реактивный двигатель используется на снаряде?* При проектировании взрывателя и предохранительного устройства необходимо знать, имеет ли снаряд отделяющиеся стартовые ускорители и работает ли двигатель при подходе снаряда к цели. Ударные и вибрационные нагрузки, а также местные температурные условия в снаряде определяются характеристиками двигателя, которые должны поэтому учитываться при конструировании деталей боевых частей. Следует также принимать во внимание, что ионизация атмосферы вытекающими из сопла газами может оказать вредное влияние на работу взрывателя.

2.5. Вопросы, касающиеся назначения оружия

1. *Для поражения каких целей предназначен снаряд? Какова желаемая и минимально допустимая величина вероятности попадания при одном выстреле?* Эти вопросы относятся к наи-

более важным. Назначение снаряда состоит в уничтожении цели, а вероятность попадания оценивает среднюю эффективность выполнения снарядом своей основной задачи. Если вероятность попадания при одном выстреле равна p_k , то полная вероятность попадания при m выстрелах равна

$$p_{km} = 1 - (1 - p_k)^m. \quad (2.1)$$

При этом предполагается, что мелкие повреждения цели при отдельных выстрелах не накапливаются. Если m неограниченно возрастает, полная вероятность попадания стремится к единице. Нарастание величины p_k происходит довольно медленно, если только она не близка к единице. Изменение p_k в зависимости от числа выстрелов показано на рис. 2.2.

2. Каково максимальное число снарядов, которыми может одновременно или почти одновременно управлять система управления? Выше были рассмотрены способы увеличения вероятности попадания в цель при увеличении числа выстрелов и показана возможность ведения огня залпом или очередью. При таких режимах стрельбы имеется вероятность того, что детонация боевых частей произойдет в результате взрыва боевых частей других снарядов вблизи цели или в результате взаимного воздействия снарядов друг на друга. Боевая часть должна быть спроектирована так, чтобы допускать стрельбу залпом и очередью. В противном случае система оружия будет несовершенной.

3. Для поражения каких целей предназначена система оружия, отдельно летящих или групповых? При стрельбе по групповым целям взрыватель может среагировать на сигнал от более удаленной цели и вызвать взрыв боевой части раньше, чем снаряд приблизится к намеченной цели. Поэтому дальность действия взрывателя обычно ограничивают радиусом эффектив-

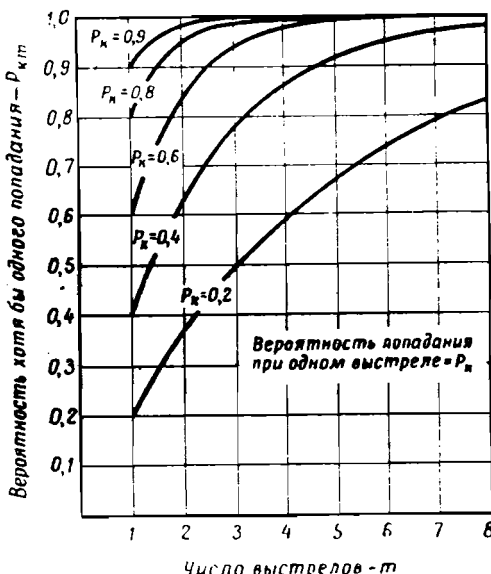


Рис. 2.2. Вероятности хотя бы одного попадания при нескольких выстрелах.

ного действия боевой части. При этом любая цель, вызвавшая срабатывание взрывателя, будет надежно поражена.

4. *Какой промежуток времени проходит с момента пуска снаряда до начала атаки цели, а также до окончания атаки? Требуется ли производить самоликвидацию снаряда путем подрыва боевого заряда или нужно включать предохранительное устройство, чтобы можно было подобрать и повторно использовать снаряд?* Вопросы такого рода служат для определения требований к предохранительному устройству. Боевая часть должна быть, конечно, безопасной в обращении на стартовой позиции. Кроме того, может потребоваться, чтобы взведение взрывателей производилось непосредственно при подходе снаряда к цели. Такие требования предъявляются в случаях, когда на пути к цели снаряд пролетает мимо своих объектов или сооружений. Дополнительным требованием к предохранительному устройству может быть самоликвидация снаряда при повреждении системы управления. Это требование обычно предъявляется к опытным снарядам или недавно принятым на вооружение. В последнем случае самоликвидация способствует сохранению секретности оружия, а также предотвращает несчастные случаи при использовании снарядов над своей территорией. При проектировании учитывается, что дорогостоящие боевые части снарядов класса «земля—земля» после неудачного пуска могут подбираться и демонтироваться (для повторного использования). В этом случае предохранительное устройство должно быть обязательно включено.

2.6. Вопросы, касающиеся условий хранения и использования боевых частей

1. *Какие физические факторы (температура, давление, влажность, коррозия) действуют на боевую часть в период ее хранения, при обращении с ней, а также во время полета снаряда?* Боевые части, предназначенные для управляемых снарядов ВМФ, должны сопротивляться коррозионному воздействию морской воды и выдерживать любую температуру от арктических морозов до тропической жары. Боевые части снарядов, предназначенных для использования при высадке морского десанта, должны безотказно действовать даже после пребывания в воде, а также переносить толчки и удары при транспортировке их к стартовым позициям. Боевые части снарядов, используемых сухопутными войсками, должны выдерживать не только высокие и низкие температуры, но и воздействие тропических ливней и песчаных бурь в пустынях. Авиационные реактивные снаряды должны выдерживать длительный полет на самолете-носителе при низких температурах и давлениях, существующих на боль-

ших высотах. Количественные показатели, характеризующие условия боевого применения управляемых снарядов, приведены во второй книге настоящей серии в разделе «Практика проектирования и производства».

2. *Требуются ли специальные предохранительные приспособления для предотвращения выхода из строя боевой части при ненормальных условиях хранения и обращения?* Вопросы такого рода способствуют выработке необходимых требований для обеспечения безопасности и удобства обращения с боевой частью в процессе ее эксплуатации. Следует учитывать, что в боевой обстановке возможны всякие неожиданности, поэтому должны быть приняты во внимание, например, последствия удара противника по стартовой позиции. Эти особые условия могут потребовать специальной укупорки, блокировок в электрических цепях и особого порядка сборки снаряда.

2.7. Вопросы общего характера

Кроме технических вопросов, перечисленных выше, имеются еще вопросы общего характера, которые необходимо выяснить до начала проектирования боевой части для конкретного управляемого снаряда. Во время разработки проекта должны приниматься меры по сохранению секретности работы (особая проверка сотрудников, охрана и т. д.). По плану работ над снарядом должно отводиться достаточное время для различных этапов разработки конструкции боевой части. Все инстанции должны работать в тесном контакте, чтобы, как только станут известны новые факты, можно было своевременно пересмотреть исходные данные для расчета. О возникновении в ходе разработки непредвиденных проблем следует ставить в известность всех, кто может с ними столкнуться. Успех работы в значительной мере зависит от своевременной информации, распространение которой является в основном функцией администрации.

2.8. Заключение

Ни один специалист не сможет ответить на все перечисленные вопросы — для этого необходима совместная работа специалистов по всем отраслям знания, связанным с управляемыми снарядами. Руководство такой работой обычно осуществляется тем видом вооруженных сил, который заинтересован в создании снаряда. Только после того, как основная часть необходимой информации будет собрана, конструктор боевой части может приступить к обоснованному выбору параметров своего изделия. В процессе работы он должен поддерживать контакт с конструкторами других агрегатов для того, чтобы согласовывать

параметры боевой части с характеристиками всего снаряда. В третьей главе рассматривается этап работы по созданию боевых частей, следующий за сбором информации, содержащейся в ответах на перечисленные выше вопросы. В этой главе рассматриваются также вопросы организации работ по проектированию боевых частей и применения в процессе разработки новейших достижений науки и техники.

ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТ ПО РАЗРАБОТКЕ БОЕВЫХ ЧАСТЕЙ

3.1. Введение

В предыдущих главах были рассмотрены назначение и устройство боевых частей управляемых снарядов, система их разработки в США и изложены вопросы, на которые необходимо ответить для определения тактико-технических требований к боевой части конкретного снаряда. Эти требования необходимо знать тем исследовательским и проектным организациям, которые занимаются разработкой конструкции боевой части. Рассмотрим, какие специалисты им нужны и каков круг вопросов, решением которых они должны заниматься.

3.2. Организация проектных работ

Прежде чем приступить к разработке конструкции боевой части, необходимо конкретизировать тактико-технические требования к ней. Для выполнения этой задачи должна быть создана проектная группа, во главе которой должен стоять человек, осведомленный во всех отраслях техники, имеющих отношение к комплексу управляемого снаряда и его боевому использованию. Ядро проектной группы должны составлять специалисты по различным вопросам, связанным с боевыми частями, и специалисты по исследованию операций, которые вместе с главным конструктором должны руководить работой всех участников создания такой сложной системы, какой является боевая часть. Кроме узких специалистов по боевым частям, в составе проектной группы должны быть еще и такие специалисты, которые хорошо знают весь снарядный комплекс и могут обеспечить соответствие характеристик боевой части оптимальным параметрам всего комплекса управляемого снаряда. Хотя мы говорили, что снаряд является летательным аппаратом, предназначенным для доставки боевой части к цели, это не дает права конструктору боевой части игнорировать требования ко всему снаряду в целом. *Вообще говоря, наилучшей конструкцией оружия является та, которая обеспечивает выполнение поставленной боевой задачи при наименьших габаритах и*

стоимости. Для выполнения этих условий требуется непрерывное взаимодействие всех групп конструкторов комплекса управляемого снаряда.

Поэтому группа, занимающаяся разработкой боевой части, должна изучить требования к другим элементам снаряда, а также все относящиеся к ним данные. На основе этого изучения вырабатываются конкретные требования, касающиеся цели и ее свойств, боевого заряда и его характеристик, типа взрывателей и параметров предохранительного устройства. Выработанные требования передаются специалистам по узким вопросам для дальнейшей конкретизации и последующего воплощения конструкции в металл. Проектная группа должна действовать как единый коллектив и непрерывно контролировать ход выполнения работ.

Первым шагом в работе проектной группы является изучение упомянутых выше вопросов. Сначала нужно изучить данные о цели. Это изучение должно помочь установить размеры и характер повреждений цели, необходимых для ее уничтожения, определить уязвимость цели, требуемый боевой заряд и т. п. Например, в случае такой типичной воздушной цели, как самолет, сначала изучается конструкция и расположение системы управления, вооружения, экипажа и полезного груза. Затем с помощью авиационных конструкторов, летчиков, имеющих боевой опыт, и исследовательских организаций выясняется уязвимость различных частей самолета при действии тех или иных взрывчатых веществ. На основании этих сведений проектная группа может определить, при поражении каких элементов самолет будет выведен из строя. Далее можно рассмотреть различные конструкции боевых частей с точки зрения их способности поразить наиболее уязвимые части самолета с дальностей, определяющихся ошибками работы системы управления.

Следующим шагом является определение требований к взрывательному устройству с тем, чтобы взрыв боевого заряда происходил в наиболее выгодный момент. Например, если цель представляет собой самолет известного типа, проектная группа будет располагать сведениями о «видимости» цели при освещении ее или облучении радиолокатором, о магнитных свойствах цели, о возможной величине электростатического заряда цели и о ее радиоактивном действии. Прежде чем сделать какие-либо рекомендации в отношении взрывательного устройства, необходимо сопоставить эти характеристики цели с потребностями вооруженных сил в данном комплексе снаряда, возможными контрмерами со стороны противника и техническими возможностями по созданию облучающих и приемных устройств.

Аналогичным путем определяются и основные параметры предохранительного устройства. На этом этапе работы проект-

ная группа собирает необходимые сведения из других групп и затем оценивает, анализирует и обобщает эти данные с помощью методов исследования операций, таких, как теория вероятностей, теория игр и др. (см. главу 6 раздела «Исследование операций»).

Сотрудники специализированных групп, занимающиеся конструированием отдельных узлов боевой части (боевого заряда, взрывателя, предохранительного устройства и вспомогательных механизмов), не нуждаются в столь широких знаниях, как работники проектной группы. Но зато они должны глубоко разбираться в вопросах проектирования, с тем чтобы успешно довести изделие до испытаний и массового выпуска. Особо следует подчеркнуть следующее положение. *Комплекс управляемого снаряда представляет собой самый сложный вид оружия из всех, когда-либо изобретенных человеком, и поэтому может быть создан только в результате усилий группы людей. Это требует невиданного в истории военной техники взаимодействия бурно развивающихся отраслей знания.* Такое состояние дел диктует необходимость постоянной взаимопомощи и взаимосвязи между различными группами, работающими над созданием оружия.

3.3. Использование достижений науки и техники

С разработкой управляемых снарядов связано использование многих отраслей науки и техники. Достаточно перечислить такие из них, как гидродинамика, аэродинамика, ядерная физика, радио, свет, магнетизм, электростатика, акустика, теория взрыва, теория топлив и т. д. Лишь немногие физические науки не имеют отношения к созданию боевых частей. Математика, эта служанка науки, в дополнение к огромным услугам, оказанным ею перечисленным выше дисциплинам, дает в руки исследователей такой мощный инструмент, как теория вероятностей, теория игр и др.

Но знания одних физических наук недостаточно. Как это ни печально, война все еще ведется человеком против человека. Современное оружие пока еще остается просто средством, увеличивающим физические возможности самого человека, и войну в конечном счете приходится вести не против оружия, а против самого человека и созданного им общества или строя. Так, наиболее уязвимым в самолете является пилот. Его можно убить, оглушить, ослепить, сделать больным, испугать, отвлечь его внимание, истощить его волю к борьбе — в общем применить любое средство воздействия. Население города должно рассматриваться как более важная цель, чем любые сооружения. Поэтому необходимо владеть биологической наукой, чтобы знать,

как заразить человека или как уничтожить его посевы и скот. Нужно знать психологию для того, чтобы уметь вызвать панику, ослабить волю людей к сопротивлению или поднять их на революцию против своего правительства. Следует изучать экономический строй вражеской страны, чтобы определить наилучшие способы нарушения производства и внушения людям страха за их судьбу и имущество. Короче говоря, современная война — это война тотальная, и конечным ее объектом является человек. Поэтому необходимо изучать не только оружие людей, но и самих людей и их общество для того, чтобы достигнуть наибольших результатов во время войны. Для этого конструктор оружия должен быть знаком с точными, естественными и общественными науками.

Подробнее обо всем этом пойдет речь ниже. В следующей главе будет рассмотрен один из важнейших моментов в области проектирования оружия — понятие цели, уничтожение которой составляет назначение любого комплекса управляемого снаряда. В этой же главе рассматривается среди других термин *поражение*, который часто употреблялся, но не был еще четко определен.

ЦЕЛИ, ИХ УЯЗВИМОСТЬ И ПОРАЖЕНИЕ

4.1. Введение

На первый взгляд может показаться, что определение целей для управляемых снарядов не представляет особых трудностей, но, как ни странно, это является одной из самых сложных задач. Дело в том, что при определении основных параметров цели и их количественных мер возникают большие трудности. Например, определение абсолютного значения отражающей способности самолета или наземной цели при облучении их электромагнитными волнами является сложной задачей потому, что даже небольшие изменения в положении цели приводят к чрезвычайно сильным изменениям отражающей способности. Уязвимость цели также трудно выразить в абсолютных количественных мерах.

Другая проблема, связанная с определением целей, состоит в том, что необходимо знать, с какими целями будут иметь дело управляемые снаряды в будущей войне. Это особенно важно в случае воздушных целей. Может быть, создание управляемых снарядов, способных сбивать такую мишень, как бомбардировщик периода второй мировой войны В-17, и представляет некоторый интерес, однако совершенно очевидно, что вооруженные силы не должны тратить средства на разработку оружия, способного бороться лишь с нашими собственными самолетами времен минувшей войны. Для того чтобы приблизительно оценить характеристики оружия, против которого должны применяться наши управляемые снаряды, необходимо определить, чем будет располагать потенциальный противник в будущей войне. Такую задачу решить чрезвычайно трудно, особенно если подойти к ее решению всесторонне.

Для определения технических возможностей нашего собственного оружия нужно произвести экстраполяцию существующих данных с учетом технического прогресса в течение ближайших нескольких лет. Для определения же будущих целей необходимо произвести аналогичную экстраполяцию в отношении техники предполагаемого противника. Последняя задача услож-

няется еще тем, что сведения о состоянии техники за рубежом являются весьма недостоверными. При отсутствии достаточно полной разведывательной информации приходится считать, что развитие техники потенциального противника пойдет теми же путями, что и у нас самих. Для этого необходимо предугадать возможное направление наших собственных усилий и в дальнейшем опираться на эти предположения. Современные войны характеризуются все более широким применением техники и использованием методов исследования операций всеми странами. Поэтому выводы, полученные у нас и в лагере противника, будут, по-видимому, более или менее аналогичными. Законы физики, доступные нам, доступны и нашим потенциальным врагам. Таким образом, решения будут, вероятно, одинаковыми с обеих сторон, если только в одной из стран-противников не произойдет революции в технике, которая даст ей большие преимущества. Такое положение существовало несколько лет тому назад, когда США были монополистами в области производства атомных бомб.

Несмотря на ограниченность сведений о характеристиках будущих целей, для определения требований к боевым частям целесообразно сначала рассмотреть классификацию целей, а затем обобщить наиболее важные характеристики, относящиеся к одному и тому же классу целей.

4.2. Классификация целей

С помощью методов исследования операций можно прийти к заключению, что комплекс управляемого снаряда предназначен для борьбы не с любой целью, а с небольшим классом целей, имеющих сходные характеристики. Вообще говоря, системы оружия редко бывают многоцелевыми, и управляемые снаряды не являются в этом смысле исключением. Классифицируя цели на группы, обладающие одинаковыми признаками, мы тем самым получаем возможность рассматривать проблемы, затрагивающие многие конкретные цели. Характеристики целей необходимо знать не только конструктору боевых частей, но и конструкторам других элементов комплекса управляемого снаряда (системы управления, корпуса и органов управления, наземного и пускового оборудования).

Наиболее распространенным признаком классификации является местоположение целей. Различают цели воздушные, наземные (надводные) и подземные (подводные). В этом имеется определенный смысл, поскольку методы стрельбы по цели одного и того же класса сходны между собой, а по целям разных классов — различны. Например, современные воздушные цели составляют особый класс целей, характеризующихся (в от-

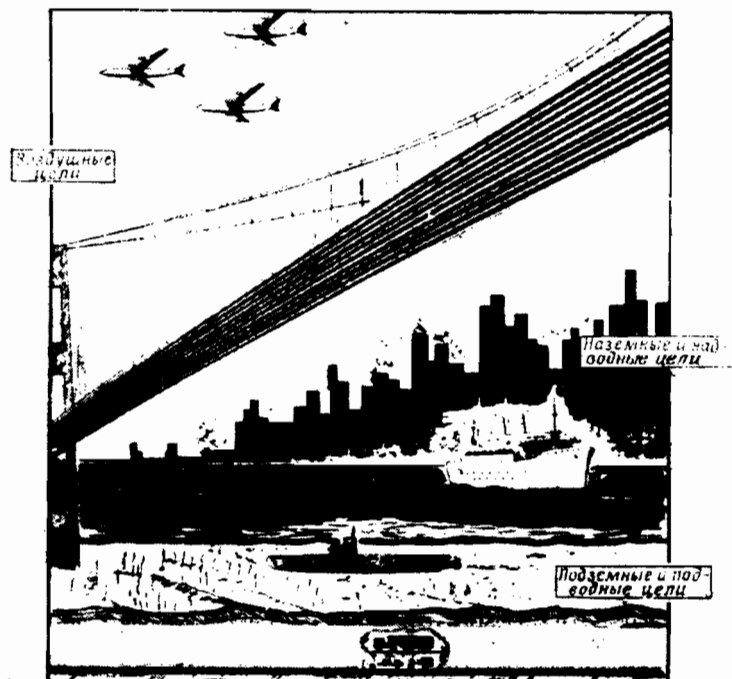


Рис. 4.1. Классификация целей по их местоположению.

личие от наземных и подземных целей) одинаковой степенью уязвимости.

В следующих параграфах будут рассмотрены характеристики различных классов целей. Вопросы обнаружения целей и определения степени поражения будут изложены вместе с вопросом уязвимости цели в конце главы.

4.3. Воздушные цели

Класс воздушных целей делится на два основных подкласса: цели тяжелее воздуха и цели легче воздуха. Первый подкласс включает самолеты, вертолеты, конвертипланы, управляемые и неуправляемые реактивные снаряды, спутники Земли и т. п. Второй подкласс включает мягкие, полужесткие и жесткие дирижабли и аэростаты (жесткие дирижабли в настоящее время не применяются). Цели тяжелее воздуха характеризуются более высокой подвижностью.

Конструктору боевой части необходимо знать такие характеристики цели, как размеры, форма, конструкция, тип двигателей,

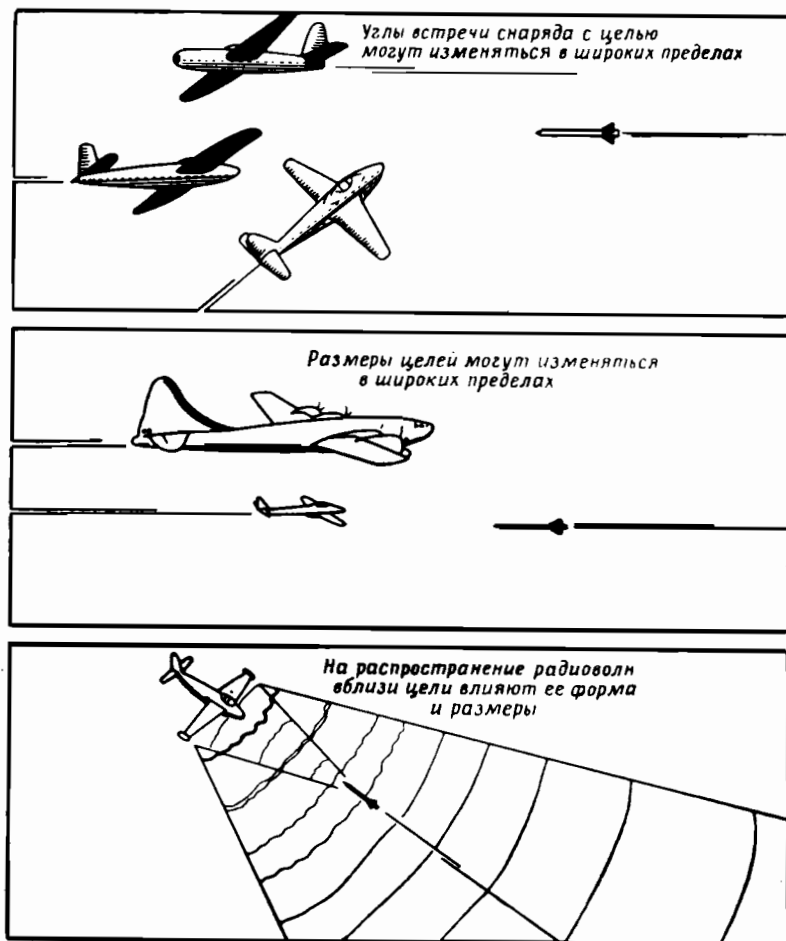
маневренность, траектория полета, полезный груз и способ управления. Например, конструктор должен знать, какова форма цели — сферическая, цилиндрическая или какая-нибудь еще; имеются ли выступающие поверхности; каковы размеры и форма крыльев и оперения. При рассмотрении конструкции выясняют, из какого материала изготовлена цель, является ли оболочка напряженной, имеются ли силовые элементы внутри фюзеляжа и в какой мере они влияют на прочность всей конструкции. От размеров цели зависит способность цели отражать энергию, используемую для работы взрывателя, и промежуток времени, в течение которого взрывательное устройство должно определить наивыгоднейший момент для подрыва боевого заряда. Уязвимость цели в значительной степени зависит от типа двигательной установки, поскольку им определяются положение моторов и топливных баков, а также способы вывода двигателей из строя. Маневренность самолета очень важна для расчета вероятной дистанции промаха и возможного взаимного расположения снаряда и цели при встрече, так же как и способности цели уклониться от встречи со снарядом. При выборе типа боевого заряда для управляемого снаряда требуется знать, какой полезный груз находится на цели; следует учитывать, что полезный груз может являться наиболее уязвимым компонентом цели. Наконец, характеристики системы управления целью нужно знать для того, чтобы избежать возможных помех между радиоустройствами снаряда и цели.

4.4 Наземные и подземные цели

Наземные (надводные) и подземные (подводные) цели образуют единый класс целей для управляемых снарядов. Они характеризуются сравнительно малой подвижностью, по крайней мере в сравнении с подвижностью управляемых снарядов. Другими словами, эти цели являются неподвижными или почти неподвижными, в то время как воздушные цели очень часто обладают высокой подвижностью. В рассматриваемый класс целей не включаются надводные и подводные цели, которые должны уничтожаться управляемыми торпедами. Торпеда представляет собой управляемый снаряд, отделяющийся под водой от другого управляемого снаряда, выпущенного с самолета.

Примерами наземных и надводных целей могут служить здания, заводы, электростанции, атомные установки, города, нефтепроводы, мосты, плотины, портовые сооружения, склады снабжения, оборонительные сооружения, аэродромы, железнодорожные узлы, танки и другие наземные боевые машины, корабли, огневые позиции артиллерии, места сосредоточения войск, стартовые позиции реактивных снарядов, посевы, стада

домашних животных, водохранилища и т. д. Примерами подземных и подводных целей являются различного рода подземные сооружения, минные поля, подводные лодки в погруженном



Р и с. 4.2. Проблемы обнаружения цели.

положении, убежища для подводных лодок, подводные оборонительные сооружения, районы рыбного промысла и т. п.

Так же как и в случае воздушных целей, конструктор должен знать многие характеристики наземных и подземных целей. В частности, необходимо выяснить размеры, расположение и отличительные признаки цели (для ее опознавания), наивыгоднейшие моменты для атаки, конструкцию цели, систему снабжения цели и большое число других данных.

4.5. Обнаружение цели

Проблема обнаружения цели впервые возникает при разработке системы управления снарядом. Для ознакомления с вопросами проектирования систем управления, связанными с обнаружением целей, читатель должен обратиться к первой книге настоящей серии («Управление снарядами»). При определенных условиях требуемые точности обнаружения цели системой управления и взрывательным устройством могут быть одинаковыми. Однако в большинстве случаев решение проблемы обнаружения цели взрывателем оказывается более сложным, чем для системы управления. Последняя может требовать, чтобы цель была обнаружена на значительном расстоянии и в дальнейшем просто оставалась «в поле зрения» системы до встречи снаряда с целью. Удаленная цель представляется в виде точки, и этого вполне достаточно существующим системам управления для слежения за целью. Для наилучшего же использования боевых частей необходимо выяснить расположение наиболее важных или наиболее уязвимых частей цели с тем, чтобы произвести вблизи них подрыв боевого заряда. При обнаружении цели на близком расстоянии возникают проблемы, связанные с влиянием размеров и формы цели на распространение электромагнитных волн, используемых для работы взрывателя. Эти проблемы мало изучены и плохо поддаются математическому исследованию.

Сложность обнаружения цели усугубляется еще и тем, что выяснение всех необходимых деталей должно происходить за небольшой промежуток времени, в течение которого взрыватель «чувствует» цель. Из-за чрезвычайно больших скоростей встречи снаряда с целью этот промежуток времени является весьма коротким. Поэтому для выбора типа взрывателя необходимо знать размеры, форму и скорость полета цели. Другие характеристики цели требуется знать для того, чтобы определить расположение наиболее уязвимых частей цели.

Прежде чем рассматривать уязвимость цели, следует установить, какая степень поражения цели является желательной при использовании управляемых снарядов. К этому мы сейчас и переходим.

4.6. Определение степени поражения цели

Хотя в первой книге настоящей серии («Управление снарядами») уже рассматривались различные категории поражения цели¹, в настоящем разделе анализ поражения целей будет произведен с другой точки зрения, чтобы выявить важные факторы, оказывающие существенное влияние на конструкцию боевых

¹ Локк А. С., Управление снарядами, перевод с английского, Гостехтеориздат, М., 1957, стр. 325.

частей управляемых снарядов. Мера эффективности комплекса управляемого снаряда определяется в зависимости от того, с какой целью это оружие используется, с *оборонительной* или *наступательной*. Назначение снаряда определяется в основном классом целей, для борьбы с которыми он используется. *Оборонительные снаряды* используются для *отражения вражеских ударов*, направленных против наших вооруженных сил или военно-экономического потенциала. *Наступательные снаряды* используются для *уничтожения вооруженных сил и военно-экономического потенциала противника*, которые могли бы впоследствии быть использованы против нас. С этой точки зрения обычно считают, что оборонительные снаряды предназначены для поражения тактических целей, а наступательные снаряды — стратегических.

Наиболее желательный результат действия оборонительного снаряда — отражение атаки и срыв намерений противника. Наступательный же снаряд должен причинить такой ущерб противнику, который вызовет уменьшение его военного потенциала. Поражение наиболее уязвимых частей цели и нанесение ей таких повреждений, которые с наибольшей вероятностью приводят к желаемым результатам, обеспечивается с помощью боевого заряда и взрывателя. При определении уязвимости цели необходимо выяснить, повреждение каких частей цели приведет к достижению желаемой степени ее поражения. Для разрушения наиболее важных частей цели и предназначен боевой заряд.

Ниже приводится таблица, в которой рассмотрены цели различных классов и желаемые степени их поражения. Следует отметить, что в результате применения оборонительных снарядов противник не только должен отказаться от своих намерений, но и понести потери.

Желаемое действие оружия по целям различных классов

	Воздушные цели	Наземные и подземные цели		
		подвижные цели		неподвижные цели
		атакующие	не атакующие	
Используемое оружие	Оборонительные снаряды	Оборонительные снаряды	Наступательные снаряды	Наступательные снаряды
Желаемое действие оружия	Отражение атаки; нанесение потерь (уничтожение)	Отражение атаки; нанесение потерь (уничтожение)	Нанесение потерь (уничтожение)	Нанесение потерь (уничтожение)

Мерой эффективности использования комплекса управляемых снарядов может служить степень достижения желаемого действия оружия. Правда, до начала практического боевого использования оружия эта мера должна рассматриваться в основном как теоретическая. Но теоретически очень трудно оценить количественные значения различных степеней поражения, которые могут быть нанесены противнику. Тем не менее автор полагает, что можно провести различие между полным

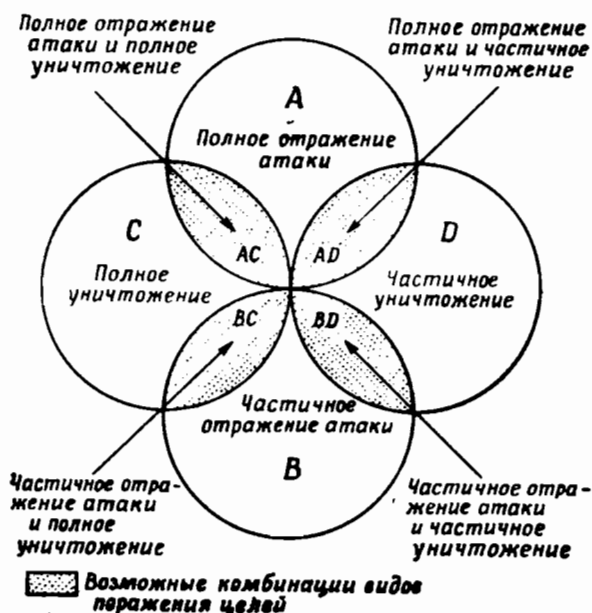


Рис. 4.3. Четыре основных вида поражения и их комбинации.

и частичным отражением атаки противника или между полным и частичным уничтожением целей. Эти различия используются конструкторами боевой части и специалистами по исследованию операций в качестве основы для определения степени поражения цели.

Определения степеней поражения цели, которые будут введены в настоящей главе, отличаются от общеизвестных, относящихся к отдельным классам целей и использующихся узким кругом лиц при рассмотрении конкретных целей. Совершенная система классификации видов поражения должна включать все классы целей. Поскольку количественные меры предпочтительнее качественных, необходимо разработать численную шкалу

для сравнения различных видов поражения на количественной основе.

Вначале будут рассмотрены виды поражения целей, затем категории повреждений, обеспечивающих данный вид поражения, и, наконец, «уязвимость» целей, т. е. характеристики целей, которые делают возможными «повреждения» целей. Для удобства сокращенной записи будут введены соответствующие буквенные символы (принятые обозначения, конечно, являются произвольными и могут быть заменены любыми другими).

<i>Символ</i>	<i>Вид поражения</i>	<i>Определение</i>
<i>A</i>	Полное отражение атаки	Эффективность вражеской атаки составляет менее 1% по сравнению с успешной атакой при полном отсутствии сопротивления
<i>B</i>	Частичное отражение атаки	Эффективность вражеской атаки понижена, но не настолько сильно, как при полном отражении атаки
<i>C</i>	Полное уничтожение	Войска или ресурсы противника полностью уничтожены или приведены в такое состояние, что их дальнейшее использование в военных целях становится невозможным
<i>D</i>	Частичное уничтожение	Войска или ресурсы противника приведены в такое состояние, что их дальнейшее использование в военных целях возможно только после пополнения, ремонта, восстановления или через определенный промежуток времени

Приведенные четыре вида поражения касаются всех классов целей. Для воздушных целей, а также для подвижных атакующих наземных (и подземных) целей можно предусмотреть следующие комбинированные виды поражения:

<i>Символ</i>	<i>Вид поражения</i>
<i>AC</i>	Полное отражение атаки, полное уничтожение
<i>AD</i>	Полное отражение атаки, частичное уничтожение
<i>BC</i>	Частичное отражение атаки, полное уничтожение
<i>BD</i>	Частичное отражение атаки, частичное уничтожение

Итак, установлены 8 видов поражения целей, которые соответствуют различным желаемым результатам действия управляемых снарядов. Графически все эти виды поражения представлены на рис. 4.3. Для того чтобы определить, какой вид поражения наиболее желателен, необходимо учесть множество

факторов. Например, опыт США по восстановлению хозяйства бывших стран-противников после войны показывает, что, может быть, более целесообразно лишать противника возможности использовать свои заводы, чем полностью уничтожать их и впоследствии восстанавливать.

Несмотря на все трудности определения наиболее желательного вида поражения, очень важно расположить различные виды поражения целей по степени желательности. Это послужит конструктору боевой части руководством для разработки эффективной боевой части. Достижение наибольшей эффективности зависит от уязвимости цели (т. е. от соотношения между размерами всей цели и ее уязвимых частей), от разрушающего действия боевого заряда (т. е. от степени его воздействия на уязвимые части цели) и от условий ведения стрельбы по цели (до атаки противника, во время его атаки и т. п.).

В общем случае при отражении атаки подвижных боевых средств противника можно расположить возможные виды поражения в ряд следующим образом (в порядке убывания желательности поражения):

<i>Вид поражения</i>	<i>Символ</i>
Полное отражение атаки и полное уничтожение цели	<i>AC</i>
Полное отражение атаки и частичное уничтожение цели	<i>AD</i>
Полное отражение атаки	<i>A</i>
Частичное отражение атаки и полное уничтожение цели	<i>BC</i>
Частичное отражение атаки и частичное уничтожение цели	<i>BD</i>
Частичное отражение атаки	<i>B</i>
Полное уничтожение цели	<i>C</i>
Частичное уничтожение цели	<i>D</i>

Попробуем теперь каждому виду поражения придать численное выражение. Для того чтобы эти численные величины были разумно выбраны, необходимо, чтобы каждый последующий вид поражения характеризовался меньшей величиной, чем предыдущий. При этом должны выполняться следующие неравенства:

$$C > D, \quad (4.1)$$

$$AD > A \text{ или } D > 1, \quad (4.2)$$

$$A > BC, \quad (4.3)$$

$$B > C. \quad (4.4)$$

К этим соотношениям нужно добавить правило, заключающееся в том, что число, характеризующее сложный вид поражения, равно произведению чисел, характеризующих простые виды поражения. Тогда для разработки системы мер поражения необходимо проделать следующее:

1. Выбрать значение для *D* больше единицы.

2. Выбрать значение для C больше выбранного для D .
3. Выбрать значение для B больше выбранного для C .
4. Выбрать значение для A больше произведения BC .

Минимально возможные целочисленные значения будут такими: $D = 2$, $C = 3$, $B = 4$ и $A = 13$. При этом система мер поражения будет выглядеть следующим образом

Символ	Мера	Символ	Мера
AC	39	BD	8
AD	26	B	4
A	13	C	3
BC	12	D	2

Если же установить, что $D = 2$, $C = 4$, $B = 8$ и $A = 64$, то получим другую систему:

Символ	Мера	Символ	Мера
AC	256	BD	16
AD	128	B	8
A	64	C	4
BC	32	D	2

Из-за отсутствия опытных данных, базирующихся на анализе результатов боевого применения оружия, нет никаких оснований предпочесть одну систему другой. Однако первую систему можно признать менее удачной потому, что она дает примерно одинаковые меры для различных видов поражения A и BC . Тот факт, что вторая система мер построена по закону геометрической прогрессии, не имеет никакого значения. В данном случае поэтому абсолютные величины или отношения мер значения не имеют, поскольку рассматриваются только неравенства или ряды чисел.

Итак, мы установили, что при отражении атаки подвижной цели ей может быть нанесено поражение любого из 8 видов. При стрельбе по неподвижной цели возможны только два последних вида поражения. Определения видов поражения могут служить лишь грубой оценкой эффективности действия управляемых снарядов. Приведенные системы мер поражения составлены произвольно и могут быть заменены другими. При обстреле неподвижной цели частичное уничтожение может оказаться более желательным, чем полное. Так, например, обстоит дело с заводами, которые могут попасть в наши руки и позднее использоваться. Тем не менее независимо от принципа расположения видов поражения в ряд всегда можно разработать соответствующую численную систему мер поражения.

У читателя может возникнуть вопрос, зачем нужна эта система? В следующем параграфе будут рассмотрены степени повреждения целей и методика использования системы мер поражения для оценки эффективности повреждения целей.

4.7. Виды повреждений цели

Результатом действия боевого заряда является повреждение цели. В зависимости от степени или вида повреждения цели может иметь место тот или иной вид поражения. Термин «повреждение» имеет довольно широкий смысл и относится не к тому, что произошло с конкретной целью, а скорее к тому, к каким последствиям приведет попадание снаряда в цель. Выше было показано, что при отражении атаки подвижной цели может встретиться значительно больше различных видов поражения, чем при стрельбе по неподвижным целям. Поэтому рассмотрим более сложный случай. Введем понятие о различных видах повреждений подвижной цели, снабдим их соответствующими символами и затем разработаем систему количественной оценки, аналогичную изложенной выше.

Если цель представляет собой подвижный летательный аппарат, переносящий боевой груз и атакующий наши войска, то, как уже было отмечено, в этом случае возможны 8 видов поражения цели. Предположим, что целью является вражеский самолет, несущий бомбовую нагрузку. Тогда можно представить следующие виды повреждения цели:

<i>Символ</i>	<i>Повреждение</i>	<i>Определение</i>
<i>E</i>	Полная потеря управляемости	Самолет не может достичь объекта и произвести бомбометание
<i>F</i>	Частичная потеря управляемости	Самолет может с большим трудом достичь объекта и произвести бомбометание, но не сможет возвратиться на свою базу
<i>G</i>	Уменьшение дальности полета	Дальность полета самолета значительно сокращена
<i>H</i>	Полное разрушение	Полет прекратился; управление потеряно; полное уничтожение

Кроме того, может произойти полное или частичное повреждение боевого груза (бомбовой нагрузки):

<i>Символ</i>	<i>«Повреждение» боевого груза</i>
<i>J</i>	Сбрасывание бомб предотвращено
<i>K</i>	Бомбометание произошло, но не с максимальной эффективностью
<i>L</i>	Весь боевой груз взорвался внутри самолета
<i>M</i>	Часть боевого груза взорвалась внутри самолета

Какими способами можно причинить самолету перечисленные виды повреждений? Полная потеря управляемости (*E*) может

произойти при сильном разрушении крыльев, нарушении работы системы управления, повреждении моторов, при пожаре или взрыве, а также в случае гибели пилота. Частичная потеря управляемости F может быть вызвана незначительным нарушением работы системы управления, частичным повреждением моторов, заменой опытного летчика, вышедшего из строя, другим членом экипажа, временными повреждениями, которые могут быть через некоторое время ликвидированы, и т. п.

Уменьшение дальности полета (G) в отличие от потери управляемости может произойти при утечке горючего из пробитых топливных баков, при уменьшении тяги двигательной установки или при частичном повреждении моторов, требующем увеличения расхода горючего или приводящем к временному отказу в работе. Такое повреждение самолета, при котором, например, отваливается хвостовая часть, полностью теряется управление и остатки самолета начинают падать на землю, называется полным разрушением (H). Случай потери управляемости рассматривается отдельно от случая полного разрушения потому, что даже неуправляемый самолет может продолжать полет и нести бомбовый груз, если он не получил повреждения, вызывающего сокращение дальности полета.

Категории повреждения полезного груза, по-видимому, не требуют особых комментариев. Они включают некоторые виды повреждений всего самолета, и это сделано не случайно. Самолет, несущий атомную бомбу, конечно, будет полностью разрушен при взрыве этой бомбы внутри самолета. Однако виды повреждения H и L рассматриваются отдельно друг от друга потому, что часто разрушение самолета является более желательным, чем детонация бомбового груза. Это становится особенно очевидным в случае отражения атаки самолета, снабженного термоядерным оружием. Детонация такой боевой части является нежелательной даже на максимальном удалении от комплекса управляемого снаряда.

Повреждение полезного груза J может произойти в случае, когда в результате взрыва управляемого снаряда заклинило дверцы бомболюка. Повреждение K может произойти при нарушении правильной работы бомбового прицела (или радиолокатора), при изменении аэродинамических характеристик бомбы в результате повреждения, при выходе из строя взрывателя или предохранительного устройства бомбы.

Повреждение L (детонация всей бомбовой нагрузки) может привести к полному уничтожению самолета в случае, когда на борту его находятся мощные взрывчатые вещества или атомные бомбы. Но в случае, когда полезный груз представляет собой бактериологическое оружие, разрушение самолета будет незначительным. Повреждение M (взрыв части бомбовой нагрузки)

является более желательным, если только разрушение самолета не вызовет опасности поражения наших оборонительных сооружений.

Поскольку для нанесения различных видов повреждений могут потребоваться различные боевые части, необходимо определить относительную желательность различных видов повреждений с тем, чтобы выбрать оптимальный тип боевой части для управляемого снаряда, выполняющего определенную задачу. Это можно сделать путем использования системы мер поражения и оценки вероятностей достижения конкретных видов поражения при каждом виде повреждения цели. Величины, характеризующие повреждения цели, могут быть получены путем перемножения вероятностей получения конкретных видов поражения при данном виде повреждения на меру поражения цели. Необходимо исследовать возможности получения четырех основных видов поражения (A, B, C и D), после чего легко будет перейти к комбинированным видам поражения (AC, AD, BC и BD).

Прежде чем приступить к расчетам, необходимо принять во внимание следующее обстоятельство. Вероятности поражений, связанные с каждым видом повреждения цели, зависят от того, в какой момент вражеской атаки управляемый снаряд поразил цель. Снаряд, поразивший самолет после того, как тот успешно произвел бомбометание, не может привести к отражению вражеской атаки, в то время как попадание снаряда в самолет до начала сбрасывания бомб может это сделать. Попадание снаряда в самолет на значительном расстоянии от точки сбрасывания бомбы приводит к полному отражению атаки противника. Такое же точно повреждение может вызвать только частичное отражение атаки противника, если вражеский самолет в момент взрыва управляемого снаряда находится почти в точке сбрасывания бомбы. В таблице 4.1 даются **примерные оценки** вероятностей получения различных видов поражения (A, B, C и D) при конкретных поражениях воздушной цели (E, F, G, H, J, K, L, M) с помощью управляемых снарядов. При этом использована вторая система мер поражения (т. е. мера AC равна 256). В таблице употребляется ряд новых терминов. Термин «до атаки» означает, что самолет находится над территорией противника, но еще на значительном расстоянии от точки сбрасывания основной части бомбовой нагрузки. Термин «во время атаки» означает, что самолет находится в точке сбрасывания или вблизи от нее. Наконец, термин «после атаки» означает, что самолет уже сбросил свой груз бомб на намеченный объект и возвращается на базу. Предполагается, что самолет способен вернуться на базу, т. е. у него хватит для этого горючего.

На рис. 4.4 показан графический способ определения вероятности получения поражений A и B при повреждениях E, F, G и H

в момент «до атаки». Аналогичные диаграммы могут быть построены и для других видов поражения, других видов повреждения цели и других моментов атаки.

Необходимо сделать несколько замечаний по поводу таблицы 4.1. На указанные там вероятности повлияло множество не поддающихся учету соображений, отражающих личный опыт автора. Другие исследователи могли бы указать несколько иные величины. Таблица дается с целью проиллюстрировать рассматриваемый метод, а не для того, чтобы привести абсолютно верные данные. Читатель может заметить, что суммы вероятностей получения поражений *A* и *B* или *C* и *D* равны единице. Это не случайно, так как *A* и *B* являются противоположными событиями для одного типа поражения, а *C* и *D* — противоположными событиями для другого типа поражения. Иными словами, сумма вероятностей полного и частичного отражения атаки равна единице; сумма вероятностей полного и частичного уничтожения цели также равна единице.

В таблице 4.2 приведены числовые меры эффективности повреждения цели, соответствующие различным видам поражения. Расчет производится следующим образом. Для определения, например, количественной меры эффективности повреждения *E*, приводящего к поражению вида *A*, вероятность поражения *A* при повреждении *E* (0,8) умножается на меру поражения *A* (64) и в результате получается величина 51,2.

Таким же образом, для определения числовой меры эффективности повреждения *E*, приводящего к комбинированному поражению вида *AC*, необходимо меру эффективности повреждения *E*, приводящего к поражению вида *A*, т. е. 51,2, умножить

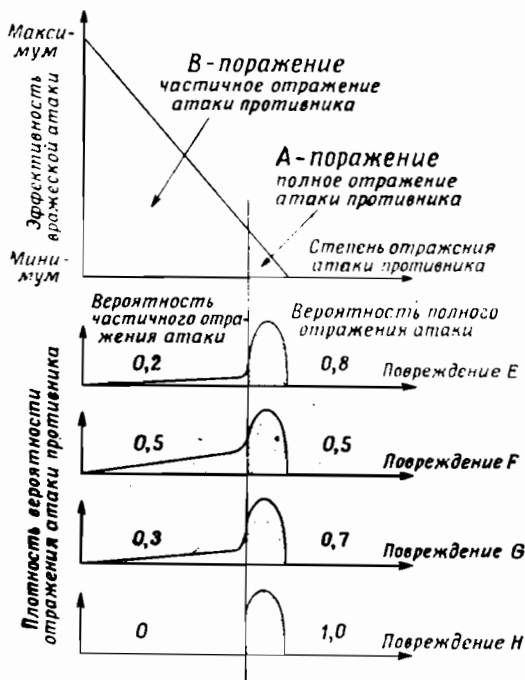


Рис. 4.4. Оценка вероятности поражения цели при различных видах повреждения („до атаки“).

**Вероятности поражений при различных видах
повреждения цели**

Символ поражения	Мера поражения	Вид повреждения	Вероятности		
			до атаки	во время атаки	после атаки
А Полное отражение атаки	64	Е	0,8	0,7	
		Е	0,5	0,5	
		Е	0,7	0,1	
		Е	1,0	0,9	
		Е	1,0	1,0	
		Е	0,5	0,5	
		Е	1,0	0,5	
В Частичное отражение атаки	8	Е	0,2	0,3	
		Е	0,5	0,5	
		Е	0,3	0,9	
		Е	0,0	0,1	
		Е	0,0	0,0	
		Е	0,5	0,5	
		Е	0,0	0,5	
С Полное уничтожение	4	Е	1,0	1,0	1,0
		Е	0,7	0,8	0,7
		Е	0,5	0,7	0,5
		Е	1,0	1,0	1,0
		Е	—	—	—
		Е	—	—	—
		Е	1,0	1,0	—
Д Частичное уничтожение	2	Е	0,0	0,0	0,0
		Е	0,3	0,2	0,3
		Е	0,5	0,3	0,5
		Е	0,0	0,0	0,0
		Е	—	—	—
		Е	—	—	—
		Е	0,0	0,0	—
Обозначения			Обозначения		
Е — полная потеря управляемости.			Е — сбрасывание бомб предотвращено.		
Е — частичная потеря управляемости.			Е — бомбометание произошло неэффективно.		
Е — уменьшение дальности полета.			Е — весь бомбовый груз взорвался в самолете.		
Е — полное разрушение.			Е — часть бомбового груза взорвалась в самолете.		

**Числовые меры эффективности повреждения
для различных видов поражения цели**

Вид поражения	Вид повреждения	Меры эффективности повреждения		
		до атаки	во время атаки	после атаки
<i>A</i>	<i>E</i>	51,2	44,8	
	<i>F</i>	32,0	32,0	
	<i>G</i>	44,8	6,4	
	<i>H</i>	64,0	57,6	
	<i>J</i>	64,0	64,0	
	<i>K</i>	32,0	32,0	
	<i>L</i>	64,0	32,0	
	<i>M</i>	51,2	57,6	
<i>B</i>	<i>E</i>	1,6	2,4	
	<i>F</i>	4,0	4,0	
	<i>G</i>	2,4	7,2	
	<i>H</i>	0,0	0,8	
	<i>J</i>	0,0	0,0	
	<i>K</i>	4,0	4,0	
	<i>L</i>	0,0	4,0	
	<i>M</i>	1,6	0,8	
<i>C</i>	<i>E</i>	4,0	4,0	4,0
	<i>F</i>	2,8	3,2	2,8
	<i>G</i>	2,0	2,8	2,0
	<i>H</i>	4,0	4,0	4,0
	<i>J</i>	—	—	—
	<i>K</i>	—	—	—
	<i>L</i>	4,0	4,0	—
	<i>M</i>	3,2	3,2	—
<i>D</i>	<i>E</i>	0,0	0,0	0,0
	<i>F</i>	0,6	0,4	0,6
	<i>G</i>	1,0	0,6	1,0
	<i>H</i>	0,0	0,0	0,0
	<i>J</i>	—	—	—
	<i>K</i>	—	—	—
	<i>L</i>	0,0	0,0	—
	<i>M</i>	0,4	0,4	—

Вид поражения	Вид повреждения	Меры эффективности повреждения		
		до атаки	во время атаки	после атаки
<i>AC</i>	<i>E</i>	204,8	179,2	
	<i>F</i>	89,6	102,4	
	<i>G</i>	89,6	17,9	
	<i>H</i>	256,0	230,4	
	<i>J</i>	—	—	
	<i>K</i>	—	—	
	<i>L</i>	256,0	128,0	
	<i>M</i>	163,8	184,3	
<i>AD</i>	<i>E</i>	0,0	0,0	
	<i>F</i>	19,2	12,8	
	<i>G</i>	44,8	3,8	
	<i>H</i>	0,0	0,0	
	<i>J</i>	—	—	
	<i>K</i>	—	—	
	<i>L</i>	0,0	0,0	
	<i>M</i>	204,8	230,4	.
<i>BC</i>	<i>E</i>	6,4	9,6	
	<i>F</i>	11,2	12,8	
	<i>G</i>	4,8	20,2	
	<i>H</i>	0,0	3,2	
	<i>J</i>	—	—	
	<i>K</i>	—	—	
	<i>L</i>	0,0	16,0	
	<i>M</i>	5,1	2,6	
<i>BD</i>	<i>E</i>	0,0	0,0	
	<i>F</i>	2,4	1,6	
	<i>G</i>	2,4	4,32	
	<i>H</i>	0,0	0,0	
	<i>J</i>	—	—	
	<i>K</i>	—	—	
	<i>L</i>	0,0	0,0	
	<i>M</i>	0,6	0,3	

на меру эффективности повреждения E , обеспечивающего поражение вида C , т. е. на 4. В итоге получаем 204,8.

Пользуясь таблицей 4.2, можно теперь установить, какой вид повреждения воздушной цели является наиболее желательным. Для этого нужно просто сложить величины, относящиеся к каждому конкретному виду повреждения. В таблице 4.3 различные виды повреждения расположены в порядке желательности (в зависимости от момента атаки и независимо от него).

Таблица 4.3

Оценка различных видов повреждения

До атаки		Во время атаки		После атаки		Суммарная величина	
вид повреждения	мера	вид повреждения	мера	вид повреждения	мера	вид повреждения	мера
<i>M</i>	430,7	<i>M</i>	479,6	<i>E</i>	4,0	<i>M</i>	910,3
<i>L</i>	324,0	<i>H</i>	296,0	<i>H</i>	4,0	<i>N</i>	624,0
<i>H</i>	324,0	<i>E</i>	240,0	<i>P</i>	3,4	<i>E</i>	512,0
<i>E</i>	268,0	<i>L</i>	184,0	<i>G</i>	3,0	<i>L</i>	508,0
<i>G</i>	191,8	<i>P</i>	169,2			<i>P</i>	334,4
<i>P</i>	161,8	<i>J</i>	64,0			<i>G</i>	258,0
<i>J</i>	64,0	<i>G</i>	63,2			<i>J</i>	128,0
<i>K</i>	36,0	<i>K</i>	36,0			<i>K</i>	72,0

Из таблицы 4.3 видно, что наиболее желательным видом повреждения самолета при попадании управляемого снаряда является частичный взрыв бомбовой нагрузки (M). Следствием такого повреждения обычно является полное уничтожение самолета и полное отражение вражеской атаки до момента достижения самолетом точки сбрасывания бомбы. Если же самолет уже находится в такой точке, то следствием частичного взрыва боевого заряда на большой высоте будет полное уничтожение самолета. Следующим по эффективности видом повреждения является полное разрушение самолета (H). Единственным недостатком этого вида повреждения по сравнению с предыдущим является то, что груз бомб может взорваться при падении разрушенного самолета на землю. Такой результат является менее желательным, что и отражают числовые меры эффективности повреждений, помещенные в таблице 4.3. Если полезный груз самолета представляет собой атомную бомбу, которая может причинить огромные разрушения при взрыве, то повреждение вида M является, несомненно, более предпочтительным.

Следующий по эффективности вид поражения — полная потеря управляемости (E). Следствием такого рода повреждения

самолета обычно будет полное его уничтожение. Поэтому возможности двух видов повреждения H и E по обеспечению отражения атаки противника кажутся одинаковыми. Это интуитивное предположение подтверждается тем, что числовые меры обоих видов повреждения почти одинаковы. Примерно такую же числовую меру имеет повреждение вида L — детонация всего груза бомб на самолете. Это также приводит к полному уничтожению самолета в результате взрыва во время полета. Хотя, согласно таблице 4.3, повреждение вида M оценивается более высокой мерой, интуитивно хочется считать повреждение вида L наиболее желательным.

Такие виды повреждения, как F (частичная потеря управляемости) и G (уменьшение дальности полета), имеют почти одинаковые меры желательности. Такой результат не является неожиданным, поскольку оба эти вида повреждения обеспечивают примерно одинаковую степень уничтожения самолета. Что же касается степени отражения вражеской атаки, то в этом отношении повреждение вида F является более эффективным.

Числовые меры желательности последних двух видов повреждения J (предотвращение сбрасывания бомб) и K (неэффективное бомбометание) имеют наименьшие значения. Такое положение объясняется тем, что ни один из этих видов повреждения не приводит к уничтожению самолета.

Из анализа полученных данных видно, что различные виды повреждения самого самолета являются более желательными, чем повреждение боевого груза. Такой результат следует объяснить некоторым несовершенством методики исследования. Дело в том, что случай взрыва боевого груза после окончания вражеской атаки не был рассмотрен. Между тем такой случай может иметь место, когда в результате попадания снаряда будет поврежден бомбосбрасыватель. Если мы пожелаем отразить такую возможность в наших расчетах, то вся их методика должна быть пересмотрена. Однако, поскольку целью всего исследования была лишь иллюстрация метода, мы не будем этим заниматься.

На этом заканчивается рассмотрение методики анализа различных видов поражений и повреждений цели. Следует отметить, что в настоящее время еще не существует единой методики, используемой всеми исследователями, работающими в области проектирования боевых частей. Это и неудивительно, поскольку методы исследования операций стали применяться сравнительно недавно.

4.8. Уязвимость целей

Главу о целях нельзя закончить, не рассмотрев понятия уязвимости и методов ее оценки. *Уязвимость — это степень чув-*

ствительности цели к повреждению. Современная техника исследования позволяет лишь оценить вероятность того, что при определенных условиях встречи снаряда с конкретной целью и при известном повреждении цели будет обеспечена данная степень поражения.

Это утверждение проще всего пояснить конкретным примером. Представим себе, что управляемый снаряд, снабженный осколочной боевой частью с известными характеристиками разлета осколков, подорван на некотором расстоянии от цели (бомбардировщика типа В-47) и определенное количество осколков, обладающих известной скоростью, пробило топливные баки. Предположим, что вероятности воспламенения топлива в баках на различных высотах определялись с помощью специальных экспериментов. Тогда, зная высоту полета, количество топлива в баках в рассматриваемый момент атаки, эффективность противопожарной системы в схожем по типу самолете противника и т. п., можно найти вероятность воспламенения топлива в баках при данных условиях. Далее, необходимо проконсультироваться у специалиста по пожарам такого рода на самолетах (не обязательно именно В-47) и по вопросу о том, какова вероятность пожара при повреждениях определенного вида. Предположим, что специалист сможет удовлетворительно ответить на эти вопросы (автор считает, что действительно квалифицированными экспертами могут быть только члены экипажей самолетов, погибших при взрыве топливных баков), и искомая вероятность будет определена. Затем следует получить консультацию у другого специалиста по вопросу: какова вероятность того, что при данных условиях самолет получит повреждение определенного вида? В результате можно, наконец, получить вероятность поражения цели при рассматриваемых условиях встречи снаряда с целью и в предположении, что может произойти только пожар от воспламенения горючего в баках. При проведении расчетов вводится в рассмотрение понятие уязвимой области цели. Если повреждение топливных баков вызывает данный тип поражения, то *уязвимость* самолета В-47 при рассматриваемых условиях характеризуется поражаемой площадью топливных баков, а вероятность поражения определяется плотностью разлета осколков, если они могут поразить эту площадь в любом месте.

Определение полной уязвимости конкретного типа самолета при попадании в него данного управляемого снаряда, снабженного определенной боевой частью, представляет чрезвычайно сложную задачу даже при условии постоянной высоты полета, постоянного курса снаряда по отношению к цели и постоянной скорости встречи. Такого рода исследования обычно проводятся с помощью больших электронных вычислительных машин типа

IBM¹, работающих от перфокарт, или крупных вычислительных устройств.

Данные, полученные даже в результате ограниченного исследования, занимают сотни страниц. *Проделав такой анализ, конструктор боевой части получит всего лишь описание действий данной системы оружия при весьма ограниченных условиях. Проблема обобщения результатов анализа с целью определения оптимальных значений важнейших параметров до сих пор не решена, так как методика исследования еще недостаточно совершенна.*

Даже если бы методика исследования операций в этой области была достаточно хорошо разработана, определение фактических данных для анализа представляло бы сложную проблему. Для иллюстрации того, какие колоссальные размеры могут иметь экспериментальные работы, рассмотрим еще раз проблему воспламенения топлива в баках. Для решения этой проблемы необходимо знать: вид топлива, конструкцию баков, систему подачи топлива из баков, количество топлива в баках, давность изготовления баков, конструкцию самолета и расположение в нем баков, высоту полета, относительную влажность, характер разлета осколков, скорость и направление их полета и т. п.

Совершенно очевидно, что экспериментатор не будет поджигать баки во время полета самолета, ибо при этом трудно получить требуемые данные. Поэтому придется ограничиться постановкой опытов на земле и в барокамере. Более того, количество необходимых для экспериментов топливных баков, боевых частей, самолетов и т. п. будет чрезвычайно ограничено вследствие дефицитности и высокой стоимости всего этого имущества. Поэтому конечным результатом будет получение лишь отрывочных данных, имеющих сомнительную ценность. Однако не следует отчаиваться и откладывать разработку комплекса управляемого снаряда до того момента, когда затронутая проблема будет полностью решена. Самым правильным путем является продолжение работ по проектированию снарядов и параллельно работ по решению проблемы, полагаясь в основном на опыт и взгляды соответствующих специалистов. Сами же специалисты, однако, сознают, что по мере дальнейшего развития науки и техники их значение как экспертов постепенно будет уменьшаться.

¹ International Business Machines — крупнейшая в США фирма по производству электронных вычислительных машин. — *Прим. перев.*

ГЛАВА 5

БОЕВЫЕ ЗАРЯДЫ

5.1. Введение

В главе 1 было дано определение боевой части и боевого заряда. Боевой заряд представляет собой полезный груз, переносимый снарядом и служащим для поражения цели. Было показано, что собственная кинетическая энергия даже сверхзвукового снаряда настолько мала, что делает стрельбу снарядами без боевых частей нецелесообразной. Только добавление боевого заряда увеличивает разрушительную мощь снаряда и превращает его в эффективное военное оружие. Это увеличение может быть и незначительным (в случае снаряда небольшого калибра с малым отношением веса боевого заряда к полному весу снаряда), и очень большим (в случае снаряда крупного калибра с атомной боевой частью). Кинетическая энергия снаряда, летящего со скоростью 3000 фут/сек , равна примерно $140\,000 \text{ фут} \cdot \text{фунт/фунт}$. Энергия, заключенная в одном фунте взрывчатого вещества обычного типа, составляет величину порядка $1\,400\,000 \text{ фут} \cdot \text{фунт}$. Таким образом, для обычных взрывчатых веществ и высоких скоростей полета снарядов при весе боевого заряда около 0,1 полного веса снаряда кинетическая энергия снаряда равна потенциальной энергии взрывчатого вещества. Далее, было отмечено, что энергию боевого заряда легче сосредоточить на цели, чем кинетическую энергию снаряда. Вследствие этих и ряда других причин управляемые снаряды, используемые в качестве боевого средства, всегда имеют боевой заряд того или иного типа.

5.2. Общие соображения о боевых зарядах

Действие боевых зарядов всех типов и форм (за небольшим исключением) состоит в распространении энергии и материальных тел в пространстве в результате взрыва. Этот процесс может заключаться или в детонации взрывчатых веществ, или в выбросе основным снарядом нескольких снарядов меньшего калибра (нескольких боевых частей), которые позднее самостоятельно взрываются. Специальные типы снарядов могут, например, нести торпеды в качестве боевой части; эти торпеды представ-

ляют собой подводные управляемые снаряды, снабженные своими собственными боевыми зарядами. Первый этап действия боевой части такого снаряда заключается в метании торпеды; последний этап состоит в детонации боевого заряда торпеды.

Важным понятием является *иницирование*, т. е. сообщение начального взрывного импульса боевому заряду. Из сказанного выше ясно, что может быть более одного инициирования. Такое инициирование, которое вызывает действие боевой части основного (первичного) снаряда, назовем *первичным*; инициирование, вызывающее действие боевого заряда элементов, непосредственно поражающих цель, будем называть *конечным*; наконец, все промежуточные виды инициирования будем называть *вторичными*.

Очень важным является тот факт, что разрушающее действие боевого заряда убывает с увеличением расстояния от точки взрыва. Это уменьшение разрушающего действия называется *ослаблением*. Ослабление в конце концов приводит к тому, что на определенном расстоянии взрыв оказывается неопасным для намеченной цели. Это расстояние зависит от характеристик боевого заряда и цели, а также от их взаимного расположения. Поэтому ослабление действия боевого заряда ограничивает расстояние от точки взрыва, на котором может быть достигнуто эффективное поражение цели. Если установить произвольный критерий для определения допустимых границ ослабления, то тем самым будут определены в пространстве пределы эффективности боевого заряда.

Необходимо рассмотреть также характер *распространения* взрыва. Характеристики распространения энергии или материальных тел в пространстве после взрыва боевого заряда, т. е. скорость, направление, продолжительность и т. п., должны тщательно изучаться. Распространение и ослабление взаимно связаны: первое обуславливает характер последнего. Распространение взрыва должно быть принято во внимание при решении задач стрельбы и управления огнем, поскольку оно определяет характер воздействия на цель боевой части. Описание распространения должно тщательно обрисовывать условия, при которых оно происходит; распространение энергии взрыва в пространстве в статических условиях отличается от характера ее распространения при движении боевой части со сверхзвуковой скоростью. Ввиду того что боевая часть, имеющая более одного инициирования в цикле действия, может иметь различные характеристики распространения и ослабления для каждого этапа цикла, при этом следует различать первичные, вторичные и конечные характеристики или формы распространения и ослабления взрыва.

Для определения характеристик боевого заряда важно удачно выбрать систему координат. Хотя распространение энергии взрыва в пространстве определяется конкретными условиями,

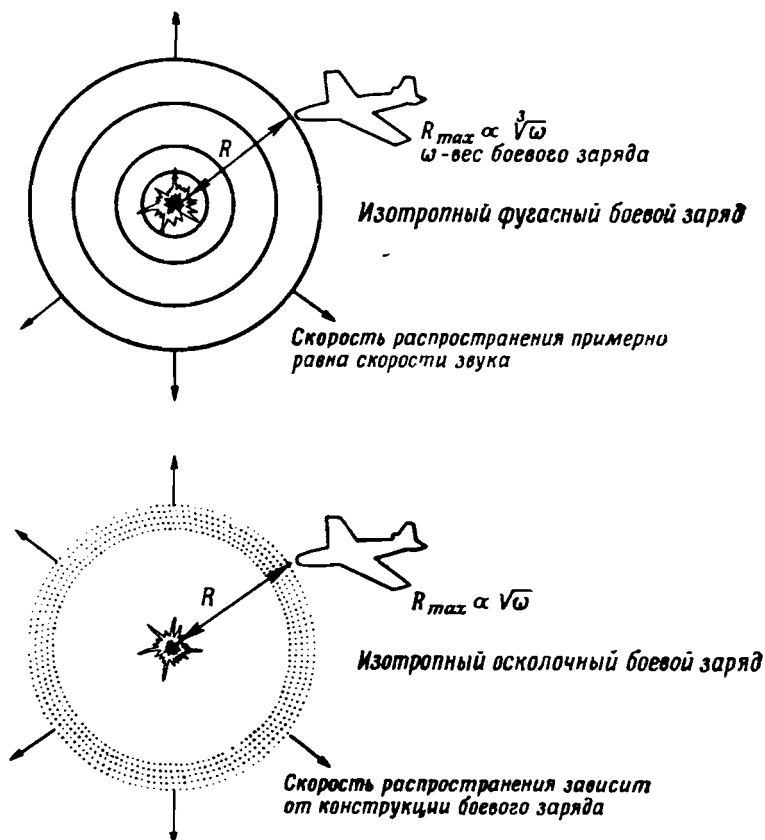
описание этого распространения зависит от выбранной системы координат. Обычно конструкторы боевой части используют систему координат, имеющую начало на снаряде и движущуюся вместе с ним. Иногда более удобной оказывается система координат, жестко связанная с целью или с поверхностью земли.

5.3. Типичные характеристики распространения и ослабления

Рассмотрим взаимосвязь между распространением и ослаблением энергии взрыва какого-то воображаемого боевого заряда. Будем полагать, что энергия взрыва распространяется из некоторой точки (центра боевого заряда) прямолинейно и одинаково во всех направлениях, причем отношение скорости перемещения фронта взрывной волны к его расстоянию от центра остается постоянным в любой точке пространства. В любой момент времени фронт взрывной волны представляет собой поверхность сферы. Боевые заряды с такой характеристикой распространения энергии взрыва будем называть *изотропными*. Изотропный боевой заряд причиняет во всех направлениях одинаковые разрушения на одинаковых расстояниях от центра взрыва. Рассмотрим теперь, какой характер ослабления взрыва имеют фугасные и осколочные боевые части с изотропным боевым зарядом. *Фугасная боевая часть* предназначена для разрушения целей посредством воздействия на них очень высокого давления. Энергия взрыва такого боевого заряда превращается в энергию ударной волны, распространяющейся в пространстве. Если не учитывать эффект охлаждения продуктов взрыва и другие побочные явления, сопровождающие взрыв, и если считать, что фронт ударной волны представляет собой поверхность сферы, то окажется, что величина давления обратно пропорциональна кубу расстояния от центра взрыва. Скорость распространения ударной волны равна примерно скорости звука. Учитывая, что для разрушения цели необходимо иметь некоторое минимальное избыточное давление, и предполагая, что первоначальная величина давления при взрыве боевого заряда пропорциональна его весу (для данного взрывчатого вещества), можно прийти к выводу, что максимальная дальность разрушающего действия фугасного изотропного заряда пропорциональна корню кубическому из его веса.

Рассмотрим теперь боевой заряд, энергия которого целиком расходуется на сообщение кинетической энергии большому числу осколков. При взрыве изотропного боевого заряда с осколочными элементами образуется как бы сферическая оболочка постоянной толщины, состоящая из мелких осколков, равномерно распределенных по всей поверхности сферы. Поскольку поверхность сферы возрастает пропорционально квадрату радиуса,

плотность осколков будет изменяться обратно пропорционально квадрату расстояния от центра взрыва. Если предположить, что все остальные параметры боевого заряда, кроме его веса,



Р и с. 5.1. Важнейшие характеристики изотропных боевых зарядов.

постоянны, то можно сказать, что максимальная дальность поражающего действия боевого заряда данного типа пропорциональна корню квадратному из его веса.

Рассмотрим другой тип боевого заряда с осколочными элементами, при взрыве которого получающееся кольцо из осколков как бы вытягивается в одном направлении (рис. 5.2). Такой боевой заряд называется *анизотропным*. Плотность осколков в этом случае изменяется обратно пропорционально радиусу в первой степени, поэтому максимальная дальность поражающего действия боевого заряда этого типа пропорциональна его весу.

Таким образом, ослабление энергии взрыва нашей идеальной боевой части может происходить пропорционально кубу, квадрату и первой степени расстояния от центра взрыва. Однако вследствие охлаждения продуктов взрыва давление на фронте ударной волны будет уменьшаться еще сильнее. Сопротивление воздуха также будет очень сильно уменьшать скорость движения осколков, и поэтому эффективность действия осколочной боевой части будет снижаться более быстро, чем в идеальном случае. Наконец, в непосредственной близости от боевой части реальные законы распространения и ослабления энергии взрыва будут существенно отличаться от идеальных, поскольку боевой заряд не является точечным, а имеет определенные размеры. Так же как для радиоантенн, законы распространения энергии должны рассматриваться отдельно для ближней и для дальней зон. Полученные выше закономерности приближенно справедливы для дальней зоны. А теперь рассмотрим более подробно анизотропные боевые заряды.

5.4. Характеристики анизотропных боевых зарядов

Понятие изотропного боевого заряда было введено для того, чтобы затем перейти к анизотропному боевому заряду и подчеркнуть преимущества последнего. Изотропный боевой заряд имеет ненаправленное действие, рассчитанное на одинаковое поражение во всех направлениях. Предположим теперь, что создан такой боевой заряд, который обеспечивает сосредоточение энергии в одном или нескольких направлениях. Тогда разрушающее действие взрыва будет различным для различных направлений (на равных расстояниях). Таким образом, при одинаковом весе анизотропный боевой заряд обеспечивает *большее* разрушающее действие, чем изотропный, в одном или нескольких направлениях и *меньшее* — в остальных направлениях. Если траектория полета снаряда и момент взрыва боевого заряда выбраны так, чтобы цель оказалась на направлении максимального разрушающего действия, анизотропный боевой заряд будет более эффективным, чем изотропный такого же веса. Изотропный боевой заряд используется в снарядах в тех случаях, когда нет почти никакой информации о цели, кроме момента прохождения снарядом ближайшей к цели точки. Поскольку нахождение цели в любом направлении равновероятно, требуется изотропный боевой заряд. Наоборот, для использования анизотропного боевого заряда (направленного действия) требуется взрывательное устройство, которое было бы способно определить положение цели относительно снаряда. При этом должны учитываться относительная скорость цели и характеристики боевого заряда, а подрыв последнего должен быть произведен в тот момент, когда цель находится

на направлении наиболее эффективного действия боевого заряда.

Для того чтобы выявить преимущества анизотропных боевых зарядов перед изотропными при одинаковом весе взрывчатого вещества, введем понятие *усиление действия* боевого заряда. Пусть имеется конкретный боевой заряд изотропного типа. Фронт ударной волны или разлета осколков представляет собой сферу, очерченную определенным радиусом из центра боевого заряда.

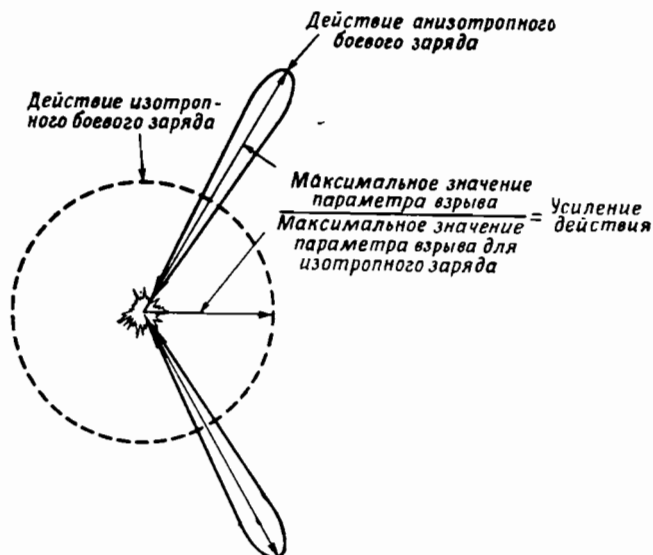


Рис. 5.2. Важнейшие характеристики анизотропных боевых зарядов.

Равномерное распределение энергии взрыва можно заменить направленным так, что максимальная дальность разрушающего действия по одинаковым целям будет обеспечиваться только в определенных направлениях (рис. 5.2). Отношение максимального значения параметра взрыва (давление на фронте ударной волны или плотность осколков) в случае применения анизотропного боевого заряда к его значению в случае применения изотропного боевого заряда назовем *усилением действия* боевого заряда.

Усиление действия является прекрасной качественной характеристикой боевого заряда, но не может полностью выразить требования, предъявляемые к взрывателям боевых частей с анизотропным зарядом. Для этого необходимо знать *характеристику направленности* боевого заряда. Характеристикой направленности боевого заряда называется пространственное распределение параметров взрыва в определенной системе координат и в конкретных

условиях. В качестве параметров можно выбрать распределение энергии взрыва, радиус поражающего действия, плотность осколков или любые другие характеристики. Можно рассматривать распределение параметров для неподвижной боевой части, или движущейся в воздухе со сверхзвуковой скоростью, или движущейся с большой скоростью в безвоздушном пространстве. Характеристика направленности боевой части помогает определить зону, в которой должна находиться цель в момент подрыва боевого заряда. Зона действия взрывателя также определяется характеристикой направленности боевого заряда.

В § 1.7 был введен термин «зона поражения снаряда». Поскольку у большинства снарядов поражение обеспечивается действием боевого заряда, можно вместо упомянутого термина ввести другой: «зона поражения боевого заряда». В предыдущем параграфе было описано распределение максимальных радиусов-векторов поражающего действия вокруг боевого заряда. Поэтому можно сказать, что зона поражения боевого заряда есть область, ограниченная поверхностью, огибающей все радиусы-векторы поражающего действия для различных направлений распространения взрыва.

5.5. Теоремы поражения

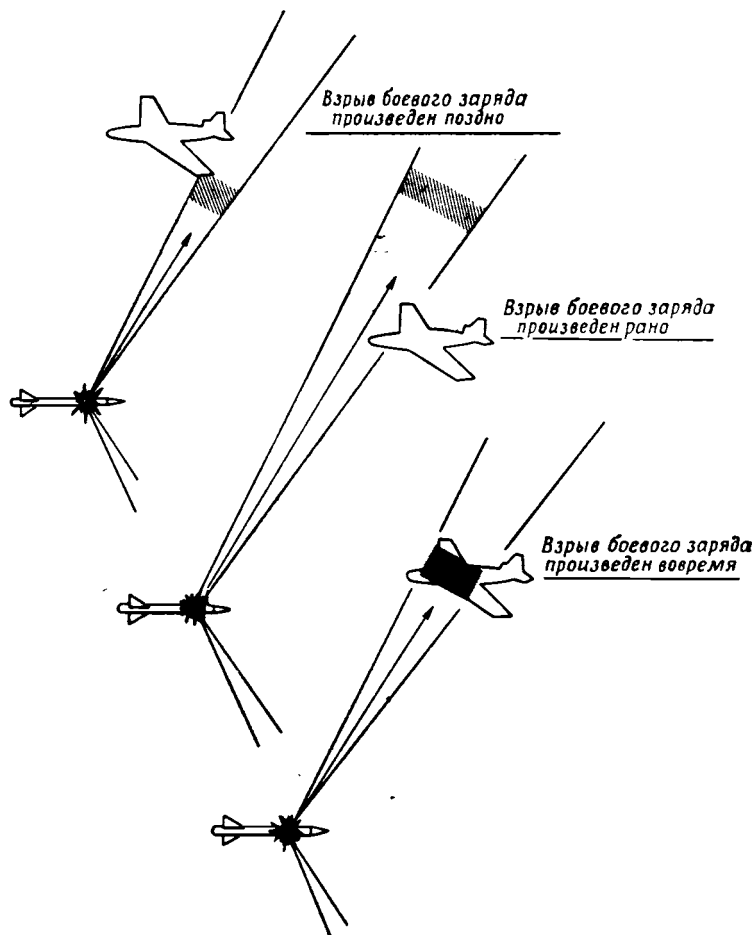
Теорема 1. *Пребывание цели в течение некоторого промежутка времени в зоне поражения боевого заряда является необходимым, но не достаточным условием повреждения цели.* Необходимость выполнения указанного условия достаточно очевидна; если цель не будет находиться в зоне поражения боевого заряда, то воздействие энергии взрыва или осколков боевой части на цель не произойдет ни при каких обстоятельствах. Но даже если цель находилась в зоне поражения боевого заряда, повреждения цели может не произойти. Дело в том, что зона поражения в действительности не существует до тех пор, пока не произошел взрыв боевого заряда. Кроме того, если боевой заряд взорван слишком рано или слишком поздно, цель может пролететь через зону поражения боевого заряда невредимой.

Теорема 2. *Необходимым и достаточным условием поражения цели является пребывание цели в зоне поражения боевого заряда в тот момент, когда поражающие элементы могут причинить повреждение цели. Максимальный эффект действия боевой части будет иметь место в том случае, когда цель находится в точке пересечения своей траектории с максимальным радиусом-вектором поражающего действия боевого заряда.*

Последняя теорема, по существу, определяет требования к оптимальному взрывательному устройству.

Простейшее следствие из приведенных выше теорем может быть получено для условия, когда скорость распространения

энергии взрыва настолько велика по сравнению со скоростями полета снаряда и цели (например, световое и радиоактивное излучения при взрыве атомного боевого заряда), что может считаться практически равной бесконечности. В этом случае теорема 2



Р и с. 5.3. Иллюстрации к теоремам поражения.

может быть сформулирована следующим образом: *необходимым и достаточным условием поражения цели является прохождение траектории цели через зону поражения боевого заряда и подрыв последнего в тот момент, когда цель находится внутри зоны поражения.* Наибольшее повреждение цели получается при подрыве боевого заряда в момент, когда цель находится на направлении максимального разрушающего действия. Если ско-

рость распространения энергии взрыва не так велика, чтобы обеспечить практически мгновенное поражение во всей зоне, то в этом случае подрыв боевого заряда должен произойти несколько раньше, чем цель попадет в зону поражения. Совершенно очевидно, что это «время упреждения» зависит от расстояния между снарядом и целью в момент взрыва.

5.6. Боевые заряды для поражения воздушных целей

В предыдущей главе были определены термины «поражение» и «повреждение», относившиеся к различным типам целей. Воздушные цели, даже пилотируемые, представляют собой высокоподвижные аппараты, способные летать со сверхзвуковыми скоростями. В борьбе с такими целями желаемыми результатами являются как отражение вражеской атаки, так и полное уничтожение цели.

Вообще говоря, можно попытаться вывести из строя экипаж самолета, разрушить фюзеляж и крылья, повредить моторы, органы управления, автопилот или уничтожить боевой груз. Во многих случаях повреждение планера самолета (непосредственно или в результате взрыва боевого груза) приводит к полному уничтожению цели и, если это произошло своевременно, к полному отражению атаки противника. Повреждение моторов и связанной с ними системы питания топливом обязательно приводит к сокращению дальности полета самолета и увеличивает вероятность последующего уничтожения цели и отражения вражеской атаки. Повреждение системы управления и связи может иметь ряд последствий, в том числе и отражение атаки, если поврежден бомбосбрасыватель. Повреждение системы управления огнем, бомбовых прицелов и вывод из строя обслуживающих эти приборы членов экипажа не позволит самолету эффективно использовать боевой груз. Повреждения боевого груза, особенно если он взрывоопасен и может детонировать при взрыве управляемого снаряда, приведет к полному уничтожению цели.

Как уже было установлено в предыдущей главе, разрушение цели при взрыве боевого груза не является наиболее желательным видом повреждения цели. Такой боевой груз, как водородная бомба, лучше не стараться взорвать. Если невозможно уничтожить цель, не вызвав взрыва боевого груза, то необходимо принять меры к тому, чтобы этот взрыв произошел в малонаселенном районе. Здесь нет необходимости подробно рассматривать множество факторов, подлежащих учету при проектировании и использовании боевых частей. Однако с целью познакомить читателя с теми проблемами, которые приходится разрешать конструкцию боевых частей, управляемых снарядов, мы все же остановимся на некоторых вопросах.

5.7. Методы инициирования взрыва боевого заряда

Подрыв боевых зарядов осуществляется с помощью взрывателей. Существуют два основных типа взрывателей: *контактные* и *неконтактные*. *Контактные* взрыватели вызывают взрыв боевого заряда при ударе о преграду (цель). *Неконтактные* взрыватели вызывают взрыв боевого заряда при прохождении снаряда вблизи цели, когда последняя оказывается в зоне действия взрывателя. Имеются особые виды неконтактных взрывателей, действие которых основано на измерении параметров, определяющих обстановку вокруг цели. Примером такого вида взрывателей является барометрический взрыватель снаряда, предназначенного для поражения наземных или надводных целей. Барометрический взрыватель измеряет высоту полета снаряда и инициирует взрыв боевого заряда на определенной высоте. Если точность наведения снаряда на цель удовлетворительная, разрыв снаряда произойдет вблизи цели, если же снаряд отклонится от цели, то все равно разрыв произойдет на той же высоте.

5.8. Фугасные боевые заряды для поражения воздушных целей

Назначение фугасных боевых зарядов состоит главным образом в превращении химической энергии, заключенной во взрывчатом веществе, в энергию ударной волны, распространяющейся во все стороны от точки взрыва. Ослабление ударной волны происходит таким образом, что избыточное давление уменьшается пропорционально кубу расстояния от точки взрыва. Фронт ударной волны перемещается в пространстве примерно со скоростью звука ($M = 1$). Однако чисто фугасных боевых зарядов не бывает, поскольку взрывчатое вещество всегда заключено в какую-либо оболочку. Таким образом, в любой фугасной боевой части с обычным взрывчатым веществом некоторая часть энергии взрыва расходуется на образование осколков. Что же касается атомных боевых зарядов, то у них энергия, идущая на разрушение оболочки, обычно пренебрежимо мала по сравнению с громадной энергией атомного взрыва.

В статических условиях фугасный боевой заряд обычно является изотропным. При движении снаряда со сверхзвуковой скоростью действие боевого заряда становится направленным, если рассматривать его в системе координат, связанной со снарядом. Последнее обстоятельство легко понять, если учесть, что фронт ударной волны распространяется приблизительно со скоростью звука, в то время как снаряд может лететь со сверхзвуковой скоростью. Из-за ограниченности скорости распространения ударной волны становится очевидным, что сверхзвуковая цель может при определенных углах встречи со снарядом избежать поражения.

Результатами действия ударной волны фугасной боевой части может быть раздавливание снаружи или разрыв изнутри элементов конструкции цели. Раздавливание происходит благодаря тому, что внешнее окружающее конструкцию давление оказывается большим, чем давление изнутри. Разрыв же является следствием того, что внутри конструкции создается давление, превосходящее наружное. Разрушение летящими обломками и т. п. считается побочным явлением и обычно не учитывается при оценке разрушающей способности фугасного боевого заряда.

Разрыв цели изнутри получается в том случае, когда боевой заряд проникает внутрь конструкции цели и затем взрывается. Это может быть осуществлено двумя способами. Управляемый снаряд, несущий одну-единственную фугасную боевую часть, может сам проникнуть внутрь цели; в этом случае система управления должна обеспечить прямое попадание снаряда в назначенную часть цели, а взрыватель должен инициировать взрыв боевого заряда в соответствующий момент после проникновения снаряда внутрь цели. При этом боевой заряд и взрыватель после пробивания той или иной преграды должны остаться исправными и способными произвести взрыв в нужный момент. Хотя зона поражения снаряда превышает его собственные размеры, эффективный разрыв цели изнутри может произойти только в результате прямого попадания и проникновения снаряда внутрь цели.

Другой способ заключается в том, что используется *боевой заряд с готовыми фугасными элементами*. Этот кассетный боевой заряд состоит из большого числа так называемых субснарядов, каждая из которых представляет собой снаряд, снабженный боевым зарядом. Первичное инициирование заключается в выпуске готовых элементов (субснарядов) вблизи цели при срабатывании неконтактного взрывателя. В рассматриваемом случае прямое попадание управляемого снаряда в цель не является необходимым. По-новому следует подходить и к вопросам распространения и ослабления взрыва боевого заряда. Для боевой части с готовыми фугасными элементами вместо распространения ударной волны необходимо рассматривать разлет отдельных элементов. Чтобы определить ослабление действия взрыва, необходимо проанализировать зоны поражения субснарядов и вероятности их попадания в цель в каждом отдельном случае. При анализе поражающего действия фугасного боевого заряда этого типа достаточно только определить вероятности попадания, поскольку предполагается, что в результате попадания произойдет полное уничтожение цели. За исключением случаев, когда скорость разлета готовых фугасных элементов очень велика, этот тип боевого заряда чрезвычайно ограничивает возможные взаимные положения снаряда и цели, при которых обеспечивается поражение последней.

«Раздавливающее» воздействие взрыва может быть обеспечено двумя способами: подрывом фугасного боевого заряда, заключенного внутри управляемого снаряда, или выпуском готовых фугасных элементов вблизи цели. В первом случае источником энергии ударной волны может быть химическая (молекулярная) или ядерная энергия. В атомных боевых частях обычно используются неконтактные взрыватели. Многие конструкторы предпочитают фугасные боевые заряды потому, что их воздействие

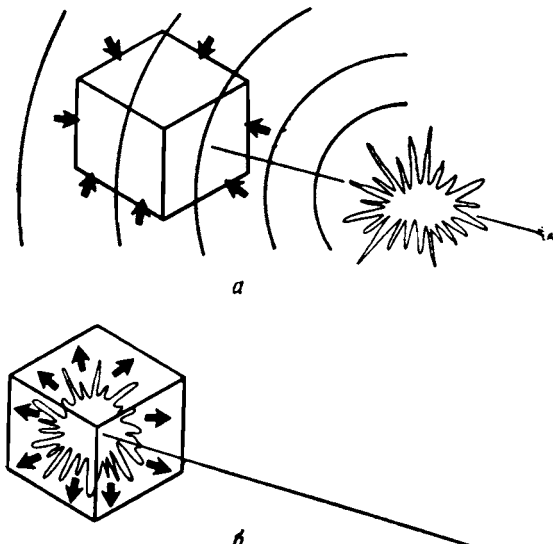


Рис. 5.4. Действие фугасных боевых зарядов.

a — раздавливание конструкции снаружи; *b* — разрыв конструкции изнутри.

по воздушным целям обычно приводит к полному разрушению последних. Недостатками фугасных боевых зарядов являются: малая скорость распространения ударной волны, приблизительно равная скорости звука, быстрый спад давления на фронте ударной волны (пропорционально кубу расстояния) и невозможность значительного увеличения параметров взрыва. Ослабление давления очень сильно ограничивает дальность поражающего действия фугасного боевого заряда и требует для данной дальности большого веса взрывчатого вещества по сравнению с зарядами других типов. Это положение можно проиллюстрировать, рассмотрев преимущества атомных фугасных зарядов перед фугасными зарядами обычных взрывчатых веществ. Предположим, что 1 т тротила производит разрушения на расстоянии до 100 футов от снаряда; тогда, поскольку радиус разрушающего действия фугасного заряда пропорционален корню кубическому из его веса,

атомный боевой заряд с тротиловым эквивалентом в 1000 т будет эффективным на расстоянии 1000 футов, а заряд с тротиловым эквивалентом в 1 000 000 т — на расстоянии 10 000 футов. Увеличение радиуса действия получается разочаровывающе малым в сравнении с огромным увеличением энергии, выделяющейся при атомном взрыве. Это также показывает, что при использовании взрывчатых веществ эффективное увеличение поражающего действия, достигнутое ценой увеличения веса заряда, является слишком дорогим и невыгодным. Поэтому фугасные боевые части всех типов целесообразно использовать лишь в тех случаях, когда система управления обеспечивает высокую точность стрельбы.

5.9. Осколочные боевые заряды для поражения воздушных целей

Осколочные боеприпасы известны очень давно. При разрыве заряда взрывчатого вещества, заключенного в прочную оболочку, всегда получаются осколки. *Осколочным* называется боевой заряд, специально предназначенный для получения большого числа осколков определенной формы, имеющих требуемые характеристики разлета. Фугасное действие, сопровождающее образование осколков, не имеет здесь существенного значения и обычно не рассматривается при оценке эффективности осколочного боевого заряда.

Преимуществом осколочных боевых зарядов является возможность изменения размеров, формы и распределения осколков, изменения скоростей разлета осколков от дозвуковых до сверхзвуковых, а также возможность обеспечения значительного усиления параметров взрыва. Ослабление энергии взрыва осколочных боевых частей происходит примерно пропорционально расстоянию или квадрату расстояния; соответственно эффективность действия боевого заряда изменяется пропорционально весу заряда или корню квадратному из веса заряда. Поэтому значительное увеличение дальности действия становится возможным при ограниченных весах боевых зарядов. Эффективная дальность действия осколочных боевых частей обычно больше, чем у чисто фугасных боевых зарядов того же веса. Однако фугасным действием осколочных боевых зарядов пренебрегать нельзя, поскольку в них на фугасное действие расходуется большая часть энергии взрыва, чем на осколочное действие в фугасных боевых зарядах.

Недостаток осколочного боевого заряда заключается в том, что причиняемые им повреждения не столь значительны, как у фугасных зарядов, особенно на максимальных расстояниях от места взрыва. Однако при выборе боевого заряда следует ориентироваться не на результаты полигонных испытаний, а на опыт боевого применения.

Существует множество разновидностей осколочных боевых зарядов. Однако для борьбы с воздушными целями используются обычно только боевые заряды, у которых первичное инициирование является одновременно и конечным инициированием. В отличие от осколочных боевых зарядов, предназначенных для поражения наземных целей, такие боевые заряды, как правило, не имеют готовых элементов.

Осколки могут причинить повреждение цели различными путями. Они могут действовать так же, как пуля, пробивая и перерезая детали конструкции. Если плотность осколков достаточно высока, элементы конструкции могут быть перебиты или же повреждены настолько, что впоследствии аэродинамические нагрузки либо ударная волна довершат разрушение. Если осколок, имеющий высокую скорость полета, пробивает цель насквозь, то могут иметь место только перечисленные выше виды повреждений. При несквозных попаданиях осколки могут вызывать дополнительные повреждения, так как они передают задержавшим их элементам конструкции большую часть своей кинетической энергии в очень короткий промежуток времени. В результате может произойти воспламенение горючего, детонация взрывчатого вещества в бомбовом отсеке или полное разрушение элемента конструкции. Таким образом, осколки могут поразить цель несколькими способами: вызвать пожар, повредить систему управления самолетом, ранить или убить членов экипажа, вывести из строя двигатели и т. п. Следовательно, осколочные боевые части обладают довольно большими возможностями поражения воздушных целей (хотя и не всегда обеспечивают их полное уничтожение) и поэтому могут широко использоваться конструкторами боевых частей.

Осколки боевых зарядов, предназначенных для поражения воздушных целей, обычно имеют одинаковую форму. Они проектируются с таким расчетом, чтобы быть симметричными относительно продольной оси или оси вращения снаряда. Статическая характеристика разлета осколков в плоскости, перпендикулярной оси снаряда, обычно является изотропной, а в плоскости, проходящей через ось вращения или ось симметрии снаряда и боевого заряда, — анизотропной. Осколки обычно разлетаются во все стороны, кроме тех направлений, которые преграждены самим снарядом.

Конкретная характеристика разлета осколков боевого заряда данной конструкции может быть до известной степени изменена путем выбора точки инициирования боевого заряда. Точка инициирования обычно располагается на оси симметрии для того, чтобы обеспечить симметричную характеристику в плоскости, перпендикулярной оси снаряда. Боевой заряд обычно состоит из взрывчатого вещества, окруженного оболочкой, образующей при

взрыве осколки. Поскольку инициирующий заряд (детонатор) располагается внутри боевого заряда, часть или целиком все предохранительное устройство может также располагаться внутри боевого заряда, обычно по оси симметрии. Для того чтобы получить определенную характеристику разлета осколков, осколочный боевой заряд может быть разделен на несколько отдельных частей, которые подрываются одновременно.

5.10. Кумулятивные боевые заряды для поражения воздушных целей

Снаряды, предназначенные для борьбы с воздушными целями, могут снабжаться боевыми зарядами кумулятивного действия. Оно основано на использовании эффекта Манро, заключающегося в собирании энергии взрыва в узкий направленный пучок. Если в заряд взрывчатого вещества помещена металлическая воронка, то при взрыве образуется струя расплавленного металла, движущаяся с огромной сверхзвуковой скоростью. Расширение струи с расстоянием происходит очень медленно, поэтому действие кумулятивных зарядов характеризуется высокой направленностью. Ослабление взрыва происходит в основном из-за сопротивления воздуха и в результате сгорания раскаленных частиц в атмосфере. Воздействие кумулятивной струи на самолет вызывает сильные разрушения и пожар. Недостатком кумулятивных боевых зарядов является малая ширина кумулятивной струи, связанная с большим усилением действия. Один кумулятивный заряд напоминает пушку и поэтому должен тщательно наводиться на цель. Для того чтобы несколько сгладить этот недостаток, можно расположить в боевой части несколько кумулятивных зарядов, направленных в разные стороны.

5.11. Боевые заряды зажигательного действия для поражения воздушных целей

Эти боевые заряды, как и следует из их названия, предназначены для воспламенения целей. В качестве зажигательных зарядов могут использоваться и атомные заряды. В этом случае цель загорается от светового излучения атомного взрыва или непосредственно от огненного шара. Действие светового излучения имеет, конечно, большую дальность. Обычные зажигательные заряды имеют готовые элементы, содержащие зажигательный состав и снабженные взрывателями. Взрывательное устройство может быть рассчитано на проникновение зажигательных элементов внутрь цели, подобно некоторым типам фугасных боевых зарядов, или на их соприкосновение с поверхностью цели. Такие зажигательные боевые заряды требуют контакта с целью, однако это не

является обязательным для атомных зарядов. Характеристики распространения готовых элементов зажигательных зарядов схожи с соответствующими параметрами боевых зарядов с готовыми фугасными элементами. Ограниченная дальность действия зажигательных боевых зарядов является их недостатком, особенно в сравнении с другими, более совершенными типами боевых зарядов.

5.12. Химические боевые заряды для поражения воздушных целей

Химические боевые заряды представляют собой тип боевых зарядов, предназначенных для отравления экипажа или вывода из строя двигателей при проникновении химического реагента внутрь самолета. Вывод из строя двигателей может произойти в результате взрыва, прекращения горения в камерах сгорания или попадания на рабочие поверхности химического вещества, препятствующего их нормальной работе (ср. попадание сахара в автомобильные бензобаки). Для того чтобы поразить экипаж, отравляющее вещество должно быть быстродействующим. Однако его использование по целям, летящим на больших высотах, может оказаться неэффективным, если члены экипажа одеты в скафандры с кислородными масками. Все типы авиационных двигателей, кроме жидкостных и пороховых реактивных двигателей, могут быть выведены из строя потому, что они нуждаются в большом количестве воздуха, содержащего кислород, и берут его из атмосферы. Следует отметить, что рассматриваемый тип боевых зарядов не может быть использован при любых условиях. В некоторых случаях (например, при сверхзвуковых скоростях цели) применение отравляющих боевых зарядов представляет сложную тактическую проблему, решение которой требует в каждом конкретном случае особого подхода.

5.13. Боевые радиоактивные заряды для поражения воздушных целей

Боевые радиоактивные заряды являются особым видом зарядов, предназначенных для поражения экипажей самолетов проникающей радиацией и боевыми радиоактивными веществами. Для того чтобы сразу вывести из строя экипаж, необходимы огромные дозы радиации. Поэтому в большинстве случаев экипаж теряет способность выполнять свою задачу только спустя некоторое время и немедленного отражения вражеской атаки не происходит. Если будет найдено, что радиация оказывает разрушающее действие на различные материалы (в настоящее время это уже установлено), то представится возможность нарушения нор-

мальной работы электронного оборудования, изменения молекулярной структуры топлива и химического состава взрывчатого вещества в бомбах и т. п. Будучи наряду с ударной волной и световым излучением поражающим фактором атомного взрыва, проникающая радиация оказывается весьма эффективной, поскольку ее действие на человеческий организм происходит бесшумно и незаметно и дает большой психологический эффект.

Другим способом является применение газообразных радиоактивных веществ, проникающих внутрь самолета через воздухозаборники и вентиляционные устройства. Этот вид боевых частей является малоэффективным, так как он может привести только к постепенному выводу самолета из строя, но не к немедленному отражению атаки противника.

5.14. Общие замечания о боевых зарядах, используемых для поражения наземных целей

Вопросы тактического применения боевых зарядов, предназначенных для уничтожения воздушных целей, решить значительно легче, чем вопросы использования боевых зарядов для поражения наземных целей. Задачей применения зенитных снарядов является уничтожение определенного класса целей, движущихся в атмосфере или за ее пределами с большими скоростями. Примерно одинаковая форма, конструкция и размеры всех воздушных целей позволяют отнести их к одному совершенно специфическому классу целей.

Огромное многообразие наземных и надводных целей включает подвижные и неподвижные объекты, живую силу и технику, заводы и водохранилища и т. п. Поэтому для данного снаряда здесь нельзя обойтись одним типом боевого заряда. Тип боевой части определяется той задачей, которую должен выполнить управляемый снаряд. Цели могут быть большими или иметь очень малые размеры, т. е. малые с точки зрения системы управления, например для межконтинентальных снарядов с огромной дальностью полета. Если цели подвижны, как, например, корабли, танки и другие боевые машины, войска, артиллерия и т. п., можно стремиться как к уничтожению этих целей, так и к срыву намерений противника. Многие наземные цели имеют стратегическое значение. Их разрушение не оказывает немедленного действия на ход войны, но, однако, может иметь серьезные последствия. Уничтожение таких целей имеет первостепенную важность; большое значение также имеет то обстоятельство, будет ли цель выведена из строя временно или навсегда. США имеют большой опыт по восстановлению экономики стран, побежденных ими в результате войн. Однако полное уничтожение промышленных объектов противника становится сомнительным способом ведения борьбы, если

придется затратить свои собственные средства на их восстановление после войны. Следовательно, нужно отдать предпочтение тем способам борьбы, которые лишают противника возможности использовать свои важные промышленные объекты в ходе войны, но позволяють сравнительно легко восстановить их после окончания войны.

5.15. Фугасные боевые заряды, предназначенные для поражения наземных целей

Широко известным и наиболее действенным средством поражения наземных целей являются ядерные боевые заряды. Газеты широко рекламируют выпускаемые в настоящее время управляемые снаряды, которые могут снабжаться ядерными боевыми зарядами («Матадор», «Капрал» и др.). Наша печать и литература полны описаний разрушительной мощи атомных и водородных бомб. Поражающими факторами атомного взрыва являются: световое излучение, ударная волна, проникающая радиация и радиоактивное заражение местности и воздуха. Ударная волна атомного взрыва может причинить повреждения целям в обширном районе, эти повреждения наносятся теми же способами, какие были описаны в § 5.8 настоящей части. Более полно ядерные боевые заряды будут рассмотрены в § 5.25.

Боевые заряды с обычными взрывчатыми веществами также могут использоваться в фугасных боевых частях; но мощность тротильовых зарядов в тысячи и даже миллионы раз меньше мощности ядерных зарядов одинакового веса. Стоимость снарядов класса «земля—земля» или «воздух—земля» очень высока, и использование боевых зарядов обычных взрывчатых веществ экономически нецелесообразно, за исключением случаев стрельбы по важным малоразмерным целям снарядами с очень точно работающей системой управления. Неизбежные ошибки наведения и высокая стоимость межконтинентального снаряда требуют применения мощных боевых зарядов с большой зоной поражения.

Фугасный боевой заряд (даже атомный) имеет изотропную характеристику при подрыве в свободном пространстве. Значительная часть энергии взрыва атомного заряда уходит в верхние слои атмосферы; так происходит не только при воздушном взрыве, но также и при наземном и даже подземном или подводном взрывах. При воздушном взрыве фугасного боевого заряда имеют место два явления, которые усиливают воздействие взрыва на наземные цели (с воздушными целями этого не происходит). Во-первых, при взаимодействии падающей ударной волны с отраженной от земли образуется более мощная волна, которая делает взрыв более эффективным, чем в свободном пространстве.

Во-вторых, при восстановлении тех атмосферных условий, которые были до взрыва, происходит распространение области избыточного давления (ветер), что оказывает дополнительное воздействие на расположенные в районе взрыва цели.

Возможен еще один способ применения фугасных боевых зарядов — речь идет о подземном или подводном взрыве. Большинство бомб, применявшихся во время второй мировой войны, можно было использовать для поражения не только наземных, но и подземных и подводных целей. Оболочки таких бомб делаются достаточно прочными для того, чтобы выдержать нагрузку при ударе о преграду и при проникновении в землю или бетон, а контактный взрыватель замедленного действия обеспечивает инициирование боевого заряда в глубине цели. Ударная волна, распространяющаяся в толще земли или воды, оказывает на фундаменты сооружений более сильное разрушающее действие, чем при воздушном взрыве, особенно если речь идет о массивных каменных постройках. Этот способ можно применять и для атомных боевых зарядов.

Хотя в основном атомные боевые заряды предназначены для разрушения зданий, они могут использоваться также для поражения живой силы, кораблей, танков и многих других объектов. Фугасные боевые заряды могут также применяться против растений и животных, но в этой области с ними могут конкурировать другие типы боевых зарядов. Таким образом, фугасные боевые части представляют собой оружие, предназначенное в первую очередь для уничтожения живой силы и сооружений. Потребное избыточное давление и радиус разрушающего действия зависят от прочности цели и от степени экранирования ее складками местности и окружающими предметами.

5.16. Осколочные боевые заряды для поражения наземных целей

Возможность создания анизотропного боевого заряда с желаемой характеристикой направленности делает осколочные заряды одним из наиболее распространенных типов боевых зарядов, предназначенных для борьбы с наземными целями. Осколочные боевые заряды применяются в основном для уничтожения живой силы; возможность поражения ими других наземных целей зависит от кинетической энергии осколков и уязвимости целей. Например, осколочные боевые заряды могут использоваться для повреждения стоящих на земле самолетов. Действие осколков по воздушным целям было рассмотрено выше, и больше этого вопроса мы касаться не будем.

Требуемая характеристика разлета осколков зависит от формы траектории и от степени укрытия живой силы. Пехота в глубоких окопах может быть поражена только осколками, летящими

вертикально или почти вертикально вниз; если же живая сила расположена в широких окопах или вне укрытий, то поражение могут нанести и осколки, летящие под меньшими углами к поверхности земли. Осколки, летящие вверх, не приносят никакой пользы, поэтому боевая часть должна быть сконструирована таким образом, чтобы в этом направлении летело минимальное число осколков.

Уничтожение живой силы в глубоких окопах представляет сложную проблему для конструктора боевых частей. Для того чтобы нанести поражение, осколки должны разлетаться относительно узким направленным пучком. Для получения значительной площади поражения необходимо подрыв боевого заряда производить на относительно больших высотах, однако при этом скорость осколков уменьшится из-за сопротивления воздуха. Если подорвать боевую часть на небольшой высоте, то скорость полета осколков не будет снижаться, но зато уменьшится площадь поражения. Решением проблемы может быть использование касетных боевых зарядов. Выпускаемые основным снарядом субснаряды взрываются в воздухе, создавая относительно узкие пучки осколков. Площадь поражения у касетного боевого заряда значительно больше, чем у простого боевого заряда того же веса.

Вопрос об оптимальных размерах осколков, предназначенных для поражения живой силы, имеет очень важное значение и должен тщательно изучаться. На этот счет существует много различных мнений. Следует отметить, что аналогичное расхождение во мнениях можно наблюдать и в вопросе об оптимальном калибре стрелкового оружия.

5.17. Кумулятивные боевые заряды для поражения наземных целей

Как было уже отмечено выше, кумулятивные боевые заряды представляют собой особые средства разрушения целей. Они используются для уничтожения долговременных огневых точек и других прочных фортификационных сооружений. Для достижения максимального эффекта кумулятивные заряды должны подрываться на определенном наивыгоднейшем расстоянии от цели и с таким расчетом, чтобы кумулятивная струя составляла желаемый угол с поверхностью цели. Снаряды с кумулятивными боевыми зарядами, предназначенные для поражения наземных целей, имеют очень небольшие области поражения и поэтому должны быть снабжены весьма точной системой управления. Сложную проблему представляет создание взрывателя, поскольку его задачей является определение оптимального расстояния между снарядом и целью, на котором должен произойти разрыв сна-

ряда. Кумулятивные боевые заряды характеризуются очень сильным направленным действием и применяются только в особых случаях.

5.18. Бактериологические боевые заряды для поражения наземных целей

Бактериологическое оружие относится к числу видов оружия, употребление которых порицается мировым общественным мнением. Однако бактериологические боевые заряды очень удобны для применения и при определенных обстоятельствах могут сыграть важную роль. Бактериологическое оружие направлено в первую очередь против живых организмов, хотя можно мыслить использование бактерий и как средства для разрушения материалов. Появление грибков и плесени на электронных и механических приборах выводит их из строя, так что пренебрегать воздействием бактериологического оружия на материалы не следует. Однако главной целью применения этого оружия остается вывод живой силы из строя непосредственным путем или в результате заражения пищи, воды, животных или насекомых — переносчиков инфекционных болезней. Бактериологическое оружие является стратегическим оружием, поскольку его действие обычно сказывается не сразу, а через некоторый период времени. Бактериологические заряды дешевы, но требуют соблюдения особых условий обращения и хранения, поскольку бактерии являются живыми организмами. Бактериальные средства опасны и могут поразить применяющие их войска, если до их применения не были разработаны эффективные методы контроля.

Преимуществом бактериологических боевых зарядов (так же как и атомных) является то, что при сравнительно небольших размерах и весе они могут поражать обширные районы и поэтому представляют собой эффективный полезный груз для управляемых снарядов, которые способны переносить только сравнительно легкий груз. Бактериологические заряды можно использовать в снарядах с кассетной боевой частью. Выпуск субснарядов с бактериологическими зарядами должен производиться так, чтобы обеспечить заражение большой площади без зон перекрытия. Кроме того, бактериальные средства могут распыляться из снарядов при полете их над районом цели. Недостатки бактериологических зарядов частично уже были указаны; к ним относятся трудность контроля применения, недостаточная надежность поражения и довольно продолжительный отрезок времени между применением и действием оружия. Бактериологическое оружие является очень сильным психологическим средством из-за страха людей перед болезнями. Преимущество этого оружия состоит в том, что оно поражает объекты, не разрушая их, и при опре-

деленном способе использования позволяет атакующему через некоторое время после бактериологического нападения вести боевые действия в пораженном районе.

5.19. Химические боевые заряды для поражения наземных целей

Боевые химические вещества применяются примерно так же, как бактериологические заряды, и против аналогичных целей. Преимуществом химических зарядов являются более надежные методы контроля применения, и, следовательно, меньшая опасность поражения своих войск, а также немедленное действие после разрыва снаряда. Химические боевые заряды тоже являются эффективным полезным грузом для управляемых снарядов и характеризуются сильным поражающим действием. Основные методы проектирования, применения и производства химических боевых зарядов — такие же, как и бактериологических боевых зарядов. Боевые отравляющие вещества могут быть в газообразном, жидком или порошкообразном состоянии. Их общие свойства уже освещались в печати, где говорилось об «отравляющих веществах нервно-паралитического действия» и других ОВ. Химические боевые заряды могут обеспечить частичное или полное уничтожение цели в зависимости от рода отравляющего вещества.

5.20. Боевые радиоактивные заряды для поражения наземных целей

Боевые радиоактивные заряды используются примерно так же, как бактериологические и химические боевые заряды. Радиоактивные вещества могут быть специально выработаны, могут быть получены как отходы другого процесса и, наконец, могут образоваться как побочный продукт в результате атомного взрыва (выпадение частиц радиоактивного облака). Последний случай нельзя рассматривать как преднамеренное применение радиологического оружия, если, конечно, боевой заряд не используется специально для радиоактивного заражения (например, подводный ядерный взрыв). Если радиоактивные вещества используются таким же образом, как химические вещества и бактериальные средства, то необходимо подобрать определенный период полураспада, обеспечивающий желаемую продолжительность заражения местности. При проектировании радиоактивных зарядов решаются в основном те же проблемы, что и для других типов боевых зарядов. Особое внимание уделяется безопасности обращения. Радиоактивные вещества должны быть защищены так, чтобы не поражать обслуживающий персонал и оборудование.

5.21. Зажигательные боевые заряды для поражения наземных целей

Эти боевые заряды предназначены для поджигания целей. С помощью зажигательных зарядов можно воспламенить цель и вызвать пожар. Цель может быть также уничтожена и непосредственным путем, сразу, если, например, она попадет в огненный шар ядерного взрыва. Кроме того, при атомном взрыве под действием светового излучения цели загораются на расстоянии, значительно превосходящем диаметр огненного шара. Обычные зажигательные заряды состоят из большого числа готовых зажигательных элементов, разлетающихся в разные стороны по определенному закону, обеспечивающему наибольшую площадь поражения. Эффективность действия таких зажигательных зарядов на людей и материалы была продемонстрирована в прошлую войну при налетах на Токио. Зона поражения у зажигательных боевых зарядов меньше, чем у бактериологических или химических одного и того же веса. Поэтому их нельзя считать выгодными для управляемых снарядов. Световое излучение — один из поражающих факторов атомного взрыва — существенно увеличивает зону поражения. При применении атомных боевых зарядов может возникнуть так называемая «огненная буря» — сильнейший пожар, способный полностью уничтожить цель.

5.22. «Психологические» боевые заряды

Значение боевых зарядов, рассчитанных на чисто психологическое, моральное действие, не следует недооценивать. Сюда относятся боевые части, содержащие агитационную литературу, имитационные бомбы или другие «устрашающие» предметы, способные вызвать панику среди населения и войск противника или побудить его отказаться от задуманного маневра. Используя специальные средства, можно создать на экранах вражеских локаторов картину массированного налета самолетов и, таким образом, заставить противника совершить множество ненужных действий. В этой области для конструктора открыто широкое поле деятельности.

5.23. Боевые заряды, предназначенные для целеуказания

Это специальный тип боевых зарядов, не имеющих взрывчатого вещества. Вместо него имеется оборудование, которое предназначено для наведения на цель последующих снарядов. Снаряд с таким боевым зарядом должен обладать исключительно точной системой управления для того, чтобы попасть в намеченную точку; зато последующие снаряды могут иметь простейшую

систему управления и большой полезный груз, поскольку они наводятся по сигналам с первого снаряда. Этот тип боевых зарядов без разрушающего элемента также может сыграть важную роль.

5.24. Боевые заряды для поражения подземных и подводных целей

Это обычно фугасные боевые заряды, способные проникнуть под землю или под воду и произвести там взрыв. Такой боевой заряд может представлять собой торпеду, несущую свой собственный боевой заряд, или же состоять из прочной стальной оболочки, снаряженной взрывчатым веществом. Атомные боевые заряды также могут использоваться для поражения этих целей. Взрыватель обычно применяется контактный, замедленного действия для обеспечения проникновения снаряда в преграду на нужную глубину. Проникновение обеспечивается также большой скоростью встречи управляемого снаряда с преградой.

5.25. Ядерные боевые заряды

Знание свойств ядерных боевых зарядов является обязательным для изучающего управляемые снаряды, поскольку становится очевидным, что именно управляемые снаряды станут основным средством доставки этих зарядов.

Для изучения элементарных основ ядерной физики читатель отсылается к соответствующей литературе. В настоящей главе будет дано только описание процесса атомного взрыва и его поражающего действия.

Чрезвычайно высокая эффективность атомных зарядов объясняется выделением огромного количества энергии при ядерных превращениях. Можно различать два основных вида ядерных превращений — *деление* и *синтез* (соединение). В результате захвата свободного нейтрона ядро атома урана или плутония делится на два примерно одинаковых по массе новых ядра, называемых «осколками». При синтезе двух легких ядер, таких, как ядра трития, в условиях колоссального давления и необычайно высоких температур происходит образование более тяжелого ядра. Оба эти ядерных превращения происходят с выделением энергии. В атомной бомбе используется процесс деления ядер тяжелых атомов; в водородной бомбе используется процесс синтеза. В обоих случаях количество высвобождаемой энергии может быть подсчитано по знаменитой формуле Эйнштейна:

$$E = mc^2, \quad (5.1)$$

где m — убыль (дефект) массы;
 c — скорость света.

Можно показать, что 1 кг урана или плутония выделяет при распаде такое же количество энергии, как 20 000 т тротила (это эквивалентно $2 \cdot 10^{13}$ кал — $8,4 \cdot 10^{20}$ эрг — $2,3 \cdot 10^7$ квт-ч). Атомная бомба такой мощности называется *номинальной*. Примером может служить атомная бомба, сброшенная на Хиросиму.

Для рассмотрения процесса деления ядер обратимся к рис. 5.5. Предположим, что первичный нейтрон, случайно появившийся под действием космических лучей, попал в ядро атома урана 235

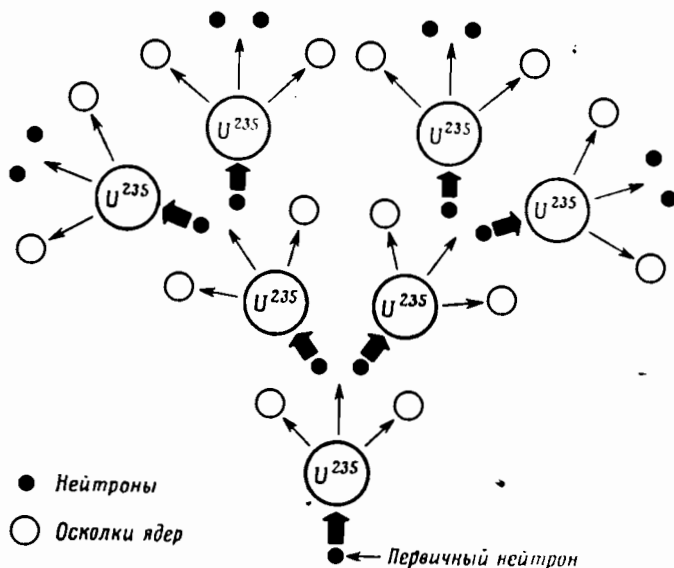


Рис. 5.5. Развитие цепной ядерной реакции.

и был захвачен им. В результате происходит распад ядра урана на два осколка. Кроме того, взамен поглощенного испускаются два новых нейтрона и выделяется большое количество энергии в различных формах излучения. Если вновь образовавшиеся нейтроны в свою очередь вызовут деление ядер, этот процесс может привести к лавинообразному нарастанию количества нейтронов и делящихся ядер. В этом случае говорят, что происходит *цепная реакция*. Практически не все нейтроны могут вызвать деление ядер. Часть из них не имеет необходимой для этого скорости, а часть улетает за пределы куска урана. Самоподдерживающаяся цепная реакция происходит в том случае, когда по крайней мере один нейтрон, появившийся в результате распада ядра, вызывает деление другого ядра. Для достижения этого результата достаточно увеличить массу урана, поскольку число атомов урана пропорционально кубу радиуса массы урана, в то

время как поверхность, через которую нейтроны могут вылетать наружу, пропорциональна только квадрату этого радиуса. Минимальное количество урана, при котором обеспечивается самоподдерживающаяся цепная реакция, носит название *критической массы*¹. Критические размеры атомного заряда могут быть уменьшены путем окружения его *отражателем нейтронов*.

Устройство механизма для подрыва атомного заряда сохраняется в строжайшей тайне, и изучающему основы проектирования управляемых снарядов в отличие от конструктора боевой части знать его не обязательно. Однако некоторые сведения, содержащиеся в открытой литературе, стоит здесь привести.



Р и с. 5.6. Распределение энергии воздушного атомного взрыва.

Критическую массу можно получить, если быстро соединить две массы ядерного горючего, каждая из которых меньше критической. Это можно сделать с помощью устройства, напоминающего по своему действию пушку. Ядерное горючее помещается в оболочку из плотного и тугоплавкого состава, которая препятствует разлету горючего, прежде чем значительная часть ее прореагирует, и, таким образом, повышает *коэффициент использования* ядерного горючего.

Другой способ заключается в том, чтобы быстро сжать части заряда путем взрыва обычного взрывчатого вещества, который создает высокие температуру и давление и будет способствовать началу цепной реакции.

Взрыв водородной бомбы (реакцию синтеза) можно вызвать с помощью огромных давлений и температур, получающихся при атомном взрыве. Недавние испытания термоядерного оружия, проведенные как в Соединенных Штатах, так и в Советском Союзе, показали, что тротильный эквивалент водородной бомбы измеряется несколькими миллионами тонн.

Рассмотрим теперь действие атомного взрыва. При воздушном взрыве атомной бомбы около 85% всей энергии взрыва выде-

¹ Это не совсем точно. Под критической массой принято понимать наименьшее количество делящегося вещества, при котором возможна цепная реакция взрывного характера (т. е. когда коэффициент размножения нейтронов — среднее значение отношения числа вторичных нейтронов, производящих деление, к числу первичных — будет больше единицы). — *Прим. ред.*

ляется в виде кинетической энергии. Большая часть ее проявляется в форме ударной волны, а остальная часть — светового излучения (рис. 5.6). Небольшое количество энергии взрыва приходится на долю проникающей радиации и радиоактивных излучений продуктов деления.

0,5 сек.

*Взрыв атомной бомбы с тротильным эквивалентом
20 000 т на высоте 2000 футов*

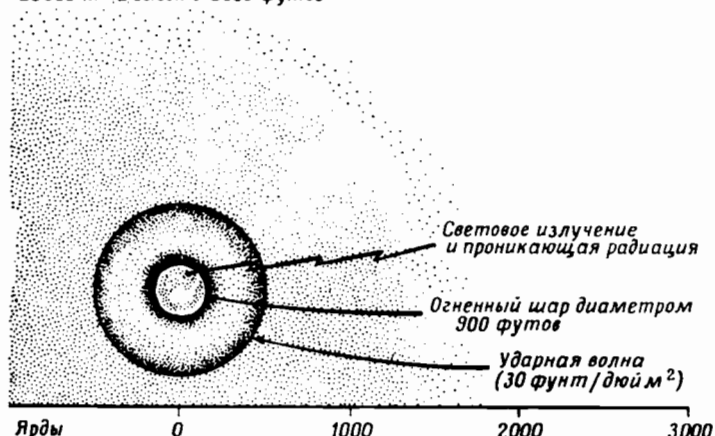


Рис. 5.7. Воздушный атомный взрыв (через 0,5 сек. после начала).

Почти мгновенно после начала воздушного взрыва атомной бомбы образуется огненный шар. Благодаря исключительно высокой температуре этот шар является источником светового излучения, способного вызвать ожоги на коже на расстоянии 2 миль (3,2 км) в ясную погоду. Процесс взрыва и радиоактивного распада образующихся осколков ядер сопровождается испусканием нейтронов из огненного шара. Это излучение может вызвать поражение людей, находящихся вне укрытий, на расстоянии свыше 1 мили (1,6 км).

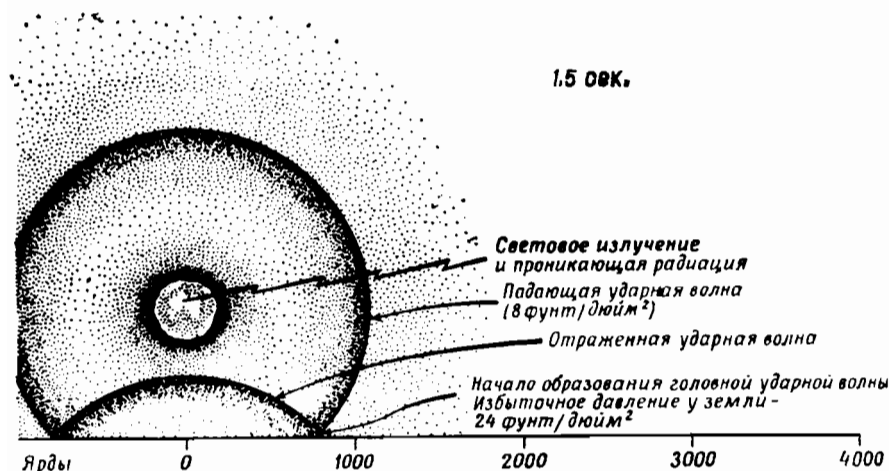
Почти сразу же после начала взрыва от огненного шара начинает распространяться ударная волна. Через 0,5 сек. после начала воздушного взрыва номинальной атомной бомбы (с тротильным эквивалентом 20 000 т) огненный шар почти достигает своего максимального размера — 300 ярдов в диаметре. Ударная волна к этому времени успевает уже пройти примерно 250 ярдов от огненного шара, как показано на рисунке. Перепад давления на фронте ударной волны, т. е. избыточное над атмосферным ($14,7 \text{ фунт/дюйм}^2$) давление, составляет примерно 30 фунт/дюйм^2 . При взрыве на высоте 2000 футов через 0,5 сек. после взрыва ударная волна еще не достигает земли.

Вообще говоря, максимальное разрушение наземных целей обеспечивается при воздушном взрыве ядерного заряда. Оптимальная высота взрыва «номинального» атомного заряда составляет около 2000 футов (немногим более 600 м). На рис. 5.7—5.11 изображены последовательные стадии воздушного атомного взрыва¹.

В некоторых случаях может оказаться необходимым произвести подрыв атомного заряда под водой или под землей. При таких условиях действие взрыва оказывается несколько иным,

¹ Рисунки заимствованы из книги Radiological Defense, prepared for the Armed Forces Special Weapons Project, vol. II.

чем при воздушном взрыве. Особенностью подводного (подземного) взрыва является образование мощной ударной волны, распространяющейся в воде или грунте, а также выпадение радиоактивных осадков на обширной площади. Различные стадии подводного атомного взрыва изображены на рис. 5.12—5.16.



Р и с. 5.8. Воздушный атомный взрыв (через 1,5 сек. после начала).

Через 0,7 сек. после начала взрыва ударная волна касается поверхности земли и продолжает распространяться со скоростью примерно 20 миль/мин. Когда падающая ударная волна достигает земли, образуется отраженная ударная волна. В определенной точке, положение которой зависит от высоты взрыва и мощности бомбы, падающая и отраженная ударные волны сталкиваются и образуют головную ударную волну, или *волну Маха*. При взрыве атомной бомбы среднего калибра на высоте 2000 футов встреча падающей и отраженной волн происходит приблизительно через 1,5 сек. после начала взрыва. Фронт ударной волны находится в этот момент на расстоянии около 1000 ярдов от центра взрыва или примерно 750 ярдов от эпицентра, как показано на рисунке. Избыточное давление на фронте падающей ударной волны составляет 8 фунт/дюйм², а на фронте головной ударной волны у поверхности земли — 24 фунт/дюйм². Таким образом, в результате взаимодействия падающей и отраженной волн давление возрастает в 3 раза. Следовательно, эффект Маха значительно усиливает разрушающее действие взрыва.

Многие очевидные преимущества ядерных боевых зарядов сводятся на нет недостатками, связанными с ограниченностью их применения. Очевидно, что в связи с большим радиусом поражения такого заряда появляется проблема обеспечения безопасности личного состава, использующего атомное оружие. Сбрасывание мощных атомных бомб с самолета, летящего на малой высоте, при обычной технике бомбометания представляет весьма трудную задачу. То же самое относится в некоторой степени и к высотным бомбардировщикам. Иногда ограничения в использовании ядерных зарядов связаны с политическими и тактическими соображениями. Эти и другие ограничения не позволяют отказаться от обычных взрывчатых веществ и полностью перейти на ядерные боеприпасы.

5.26. Вопросы организации производства систем применительно к боевым зарядам

Поскольку вопросы организации производства систем управляемых снарядов излагаются в пятой книге настоящей серии, а боевых частей — в главе 8 данного раздела, здесь нет особой

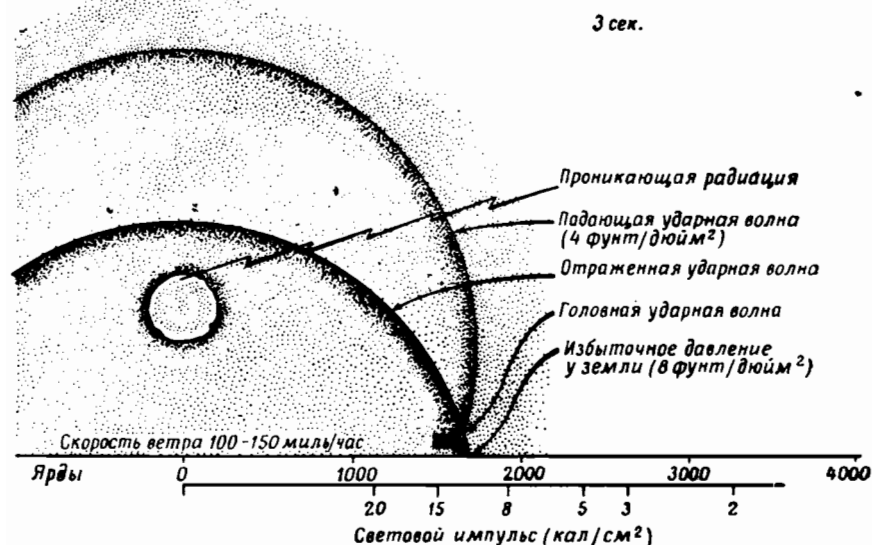


Рис. 5.9. Воздушный атомный взрыв (через 3 сек. после начала).

С течением времени фронт головной ударной волны увеличивается по высоте и все дальше распространяется вдоль поверхности земли, так что к концу 3-й секунды после начала взрыва он находится на расстоянии более 1600 ярдов от эпицентра взрыва. Избыточное давление на фронте головной ударной волны у поверхности земли составляет около 8 фунт/дюйм², а на фронте падающей ударной волны — только 4 фунт/дюйм². Скорость ветра равна 100—150 миль/час, и воздушная волна обладает значительной разрушительной силой.

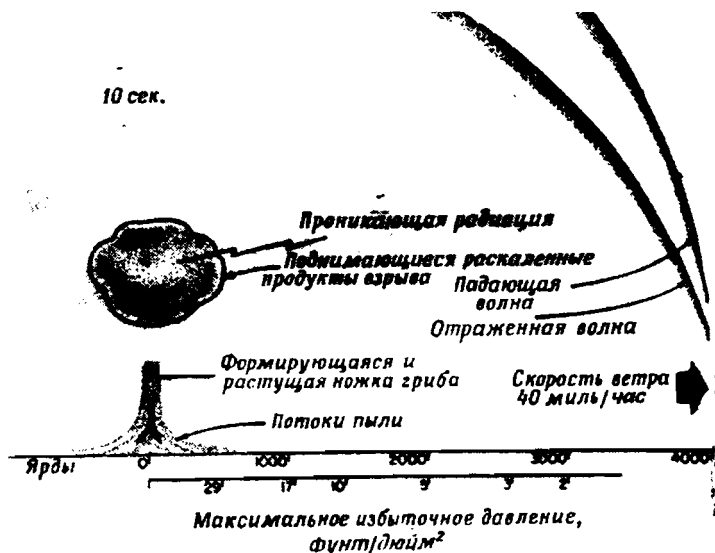
Светящаяся область огненного шара через 3 сек. после взрыва все еще имеет высокую температуру, но поверхность его уже охладилась до такой степени, что световое излучение становится незначительным. Проникающая радиация из огненного шара продолжает, однако, достигать земли.

На шкале, помещенной под рисунком, показаны световые импульсы для различных расстояний от эпицентра взрыва (в умеренно ясный день).

необходимости подробно останавливаться на организации производства систем применительно к боевым зарядам. Однако некоторые специфические проблемы, связанные с боевыми зарядами, следует затронуть.

С боевыми частями вообще и с боевыми зарядами в частности связана проблема безопасности эксплуатации оружия. Большая разрушающая сила, заключенная в боевом заряде, особенно в мощном, требует, чтобы преждевременный разрыв был в высшей степени маловероятным событием. Поэтому при проектировании и производстве боевых зарядов обеспечению безопасности

уделяется исключительное внимание. Весь процесс изготовления и эксплуатации боевых зарядов должен быть тщательно исследован для установления условий, при которых может произойти непредвиденный взрыв. Кроме того, следует постоянно заботиться о высоком качестве изготовления и осторожном обращении



Р и с. 5.10.3 Воздушный атомный взрыв (через 10 сек. после начала).

Через 10 сек. фронт ударной волны находится на расстоянии почти 2,5 мили от эпицентра взрыва. Хотя скорость ветра составляет около 40 миль/час, избыточное давление на фронте головной ударной волны равно лишь 1 фунт/дюйм². Следовательно, разрушающего действия ударной волны достаточно только для повреждения штукатурки и разрушения остекления. Огненный шар перестает светиться. Однако температура его еще высока, и газообразные продукты взрыва бомбы поднимаются вверх со скоростью около 220 фут/сек. Поднимающаяся газовая полость вовлекает в движение нижние слои воздуха, действуя подобно вытяжной трубе. В результате возникает воздушный поток у поверхности земли, который поднимает массы пыли и мусора, образующие ножку грибовидного пылевого облака. Под рисунком помещена шкала, показывающая максимальные значения избыточного давления на поверхности земли, создающегося по мере распространения ударной волны

с каждым изделием — это неременное условие успешного действия боевого заряда. Конструктор боевой части должен быть достаточно опытен для того, чтобы правильно представлять себе действия обслуживающего персонала. Более того, он должен предусмотреть все возможные случаи умышленного или случайного нарушения правил обращения с боеприпасами со стороны обслуживающего персонала с тем, чтобы максимально обезопасить боевой заряд. Диверсия, конечно, может свести на нет все

меры безопасности, однако необходимо устранить возможность осуществления таких диверсий.

Конструктор должен учитывать не только возможные неправильные действия обслуживающего персонала, но также и совокупность всех вредных влияний со стороны окружающей среды.

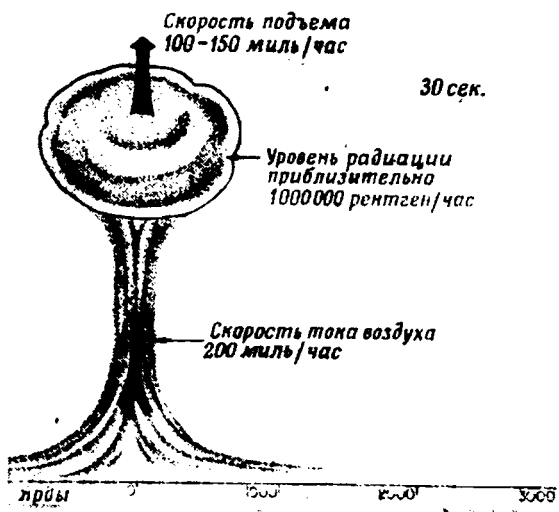


Рис. 5.11. Воздушный атомный взрыв (через 30 сек. после начала).

Газообразные продукты взрыва атомной бомбы продолжают подниматься вверх со скоростью 100—150 миль/час. Одновременно они расширяются и охлаждаются. В результате происходит конденсация газообразных продуктов деления и образуется радиоактивное облако. Однако ввиду большого расстояния от поверхности земли и уменьшения степени излучения лишь небольшая доза радиоактивного излучения достигает теперь земли. Фактически к 30-й секунде после начала взрыва около 95% радиоактивного излучения, способного достичь земли, уже выделялось. Радиоактивное облако гает в себе серьезную опасность, поскольку мощность дозы радиации составляет около миллиона рентгенов в час.

Токи воздуха продолжают поднимать пыль, образующую ножку грибовидного облака. В течение примерно 10 мин. это облако может подняться на высоту от 5 до 8 миль и затем расширяться, образовав характерную шляпку гриба. В конце концов радиоактивные частицы в облаке будут рассеяны ветром и не причинят никому вреда. Однако в особых метеорологических условиях опасность радиоактивного заражения местности может быть весьма значительной.

Наиболее сложной проблемой является защита от аэродинамического нагрева, возникающего при движении снаряда с большими скоростями. Так, при увеличении сверхзвуковой скорости и времени полета возрастает вероятность воспламенения боевого заряда. Как уже отмечалось выше, некоторые боевые заряды могут

испускать радиоактивные излучения, которые нарушают нормальную работу других агрегатов снаряда. В таких случаях к конструктору снаряда предъявляются серьезные требования,

2,0 сек.

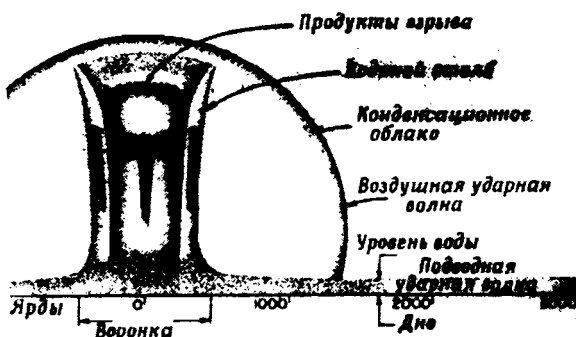


Рис. 5.12. Подводный атомный взрыв (через 2 сек. после начала).

При подводном взрыве номинальной атомной бомбы практически все световое излучение и проникающая радиация поглощаются водой. Если подрыв произведен на умеренной глубине, через толщу воды на поверхность прорывается пузырь горячих газов. В результате этого образуется столб воды и водяной пыли, достигающий через 2 сек. после взрыва высоты 5000 футов. В центральной части водяного столба движутся газообразные продукты ядерного взрыва.

При взрыве образуется ударная волна, распространяющаяся в сторону так же, как и в случае воздушного взрыва. Однако ударная волна в воде движется более быстро, чем в воздухе, так что к концу 2-й секунды ее фронт находится на расстоянии более 2 миль от эпицентра взрыва. Расширяющиеся над поверхностью воды горячие газы создают воздушную ударную волну, энергия которой в четыре раза меньше, чем при воздушном взрыве.

Через несколько долей секунды за фронтом ударной волны образуется куполообразное облако, состоящее из конденсированных водяных капель (облако Вильсона). С военной точки зрения это явление никакого интереса не представляет.

особенно если условие легкости конструкции не позволяет применить надежную защиту.

Больше всего хлопот возникает при конструировании кассетных боевых частей. При этом необходимо решить такие сложные проблемы, как выпуск готовых элементов (субснарядов) из снаряда, летящего со сверхзвуковой скоростью, обеспечение разлета субснарядов по желаемым траекториям, с требуемыми скоро-

стями и в то же время без разрушения их в полете. В процессе проектирования конструкция боевой части должна непрерывно увязываться с конструкцией всего снаряда. В результате обмена

12 сек.

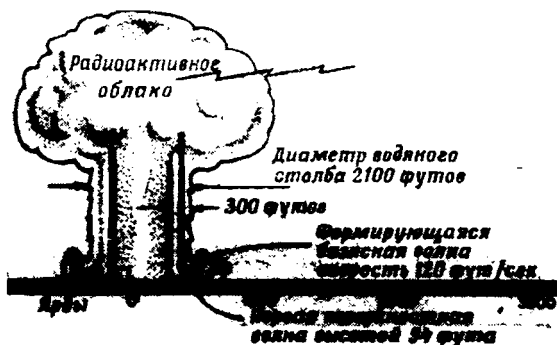


Рис. 5.13. Подводный атомный взрыв (через 12 сек. после начала).

Через 12 сек. после начала взрыва диаметр водяного столба достигает около 2100 футов, а толщина его стенок, состоящих из воды и водяной пыли, — примерно 300 футов. Продукты атомного взрыва, поднявшись выше водяного столба, образуют облако, напоминающее по форме кочан цветной капусты и частично закрывающее собою водяной столб. Облако состоит из радиоактивных частиц и поэтому является источником радиоактивного излучения. Однако из-за большой высоты над уровнем моря облако не опасно для экипажей кораблей, уцелевших после прохождения ударной волны.

Через 10–12 сек. после начала подводного взрыва атомной бомбы в атолле Бикини массы воды, выпадающие из водяного столба, достигли поверхности лагуны и образовали так называемую *базисную волну* — кольцо радиоактивной водяной пыли у основания водяного столба. Базисная волна распространяется во все стороны со скоростью 120 фут/сек вдоль поверхности воды.

При подводном взрыве атомной бомбы образуются большие волны на поверхности воды. Через 12 сек. после детонации первая из них находится на расстоянии 300–400 футов от эпицентра взрыва и имеет высоту 94 фута.

информацией часто оказывается, что факторы, которые являются определяющими для боевой части, несовместимы с аэродинамикой снаряда и параметрами системы управления. Очень часто для того, чтобы придать боевой части требуемую аэродинамическую форму, конструктор вынужден выбирать такую конфигурацию боевого заряда, которая считается невыгодной или неудобной. Управляемые снаряды явились для боевых зарядов

новой областью использования и ускорили прогресс в их создании, который необходим, чтобы удовлетворить требования этого нового вида применения. Если мы хотим, чтобы боевой заряд

20 сек.

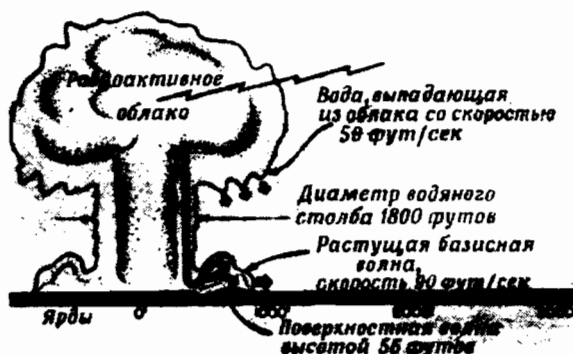


Рис. 5.14. Подводный атомный взрыв (через 20 сек. после начала).

Во время взрыва атомной бомбы в атолле Бикини было замечено, что по мере выпадения воды и водяной пыли из столба базисная волна увеличивается в размерах. Огромный вал из мельчайших радиоактивных капель воды вздымается кверху и распространяется во все стороны вдоль поверхности моря. Через 20 сек. после начала взрыва высота базисной волны составляет около 800 футов, а фронт ее находится на расстоянии 700 ярдов от эпицентра взрыва. В дальнейшем базисная волна продолжает распространяться в стороны со скоростью приблизительно 50 фут/сек.

Примерно в это время большие массы воды и водяной пыли начинают выпадать из радиоактивного облака. Начальная скорость этих масс составляет около 50 фут/сек. В результате выпадения воды из водяного столба его диаметр уменьшается до 1800 футов.

К концу 20-й секунды первая поверхностная волна находится на расстоянии 500—600 ярдов от эпицентра взрыва и имеет высоту около 55 футов.

был использован эффективно, проект боевой части должен быть хорошо увязан с конструкцией всего снаряда.

5.27. Влияние конструкции боевого заряда на безопасность снаряда в обращении

В § 1.4. настоящей части было упомянуто о том, что предохранительное устройство расположено между взрывателем и боевым зарядом и предназначено для предохранения обслуживающего персонала и оборудования от опасности преждевременного

взрыва. Это не означает, однако, что безопасность боевой части обеспечивается только предохранительным устройством; конструкция боевого заряда также должна гарантировать безопасность при обращении с ним. При включенном предохранительном

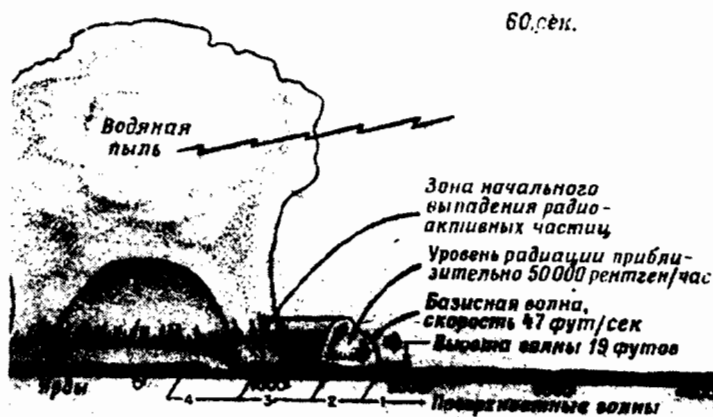


Рис. 5.15. Подводный атомный взрыв (через 60 сек. после взрыва).

Через 60 сек. после начала атомного взрыва, произведенного в атолле Бикини, вода, выпадавшая из радиоактивного облака, достигла поверхности лагуны, как показано на рисунке. Таким образом, между облаком и поверхностью моря постоянно находится во взвешенном состоянии множество водяных капель.

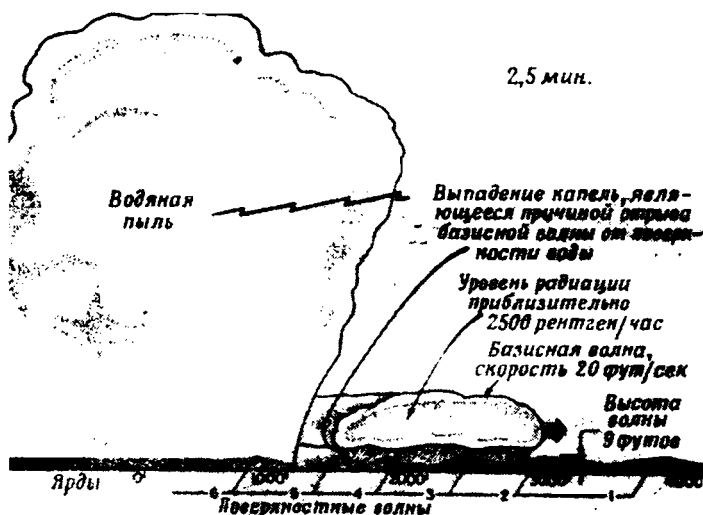
К этому моменту базисная волна отделяется от водяного столба и ее кольцеобразная форма становится очевидной. Высота базисной волны составляет около 1000 футов, а ее фронт, движущийся со скоростью примерно 47 фут/сек, находится на расстоянии приблизительно 1600 ярдов от эпицентра взрыва. Радиоактивность базисной волны характеризуется уровнем радиации в 50 000 рентген/час.

По поверхности моря распространяется несколько волн. Первая из них имеет высоту 19 футов и находится на расстоянии 1600—1700 ярдов от эпицентра взрыва.

устройстве боевая часть находится в «безопасном положении». В этом случае детонационная цепь между взрывателем и боевым зарядом разомкнута и вероятность случайного взрыва чрезвычайно мала. Но эта вероятность мала только при условии, что боевой заряд правильно сконструирован.

Для обеспечения эффективности действия и безопасности в обращении боевую часть снаряжают взрывчатым веществом, которое обладает, с одной стороны, достаточной мощностью, а с другой — низкой чувствительностью к механическим воздействиям. Низкая чувствительность взрывчатого вещества означает, что детонацию боевого заряда очень трудно искусственно

вызвать, что вероятность самопроизвольной детонации очень мала, что при нормальном обращении со снарядом взрыв не произойдет и что только детонация другого, более мощного взрывчатого вещества может вызвать взрыв боевого заряда.



Р и с. 5.16. Подводный атомный взрыв (через 2,5 сек. после начала).

Через 2,5 мин. после начала подводного атомного взрыва в атолле Бикини фронт базисной волны находился на расстоянии около 2700 ярдов от эпицентра взрыва. Ширина базисной волны в этот момент составляет около 1800 футов. Наибольшей ширины базисная волна достигает к концу 4-й минуты, когда фронт ее находится на удалении 3000 ярдов от эпицентра взрыва, т. е. имеет диаметр почти 3,5 мили. Благодаря естественному распаду продуктов деления, конденсации воды и рассеиванию тумана в воздухе уровень радиации снижается через 2,5 мин. после начала взрыва до 2500 *рентген/час*. Примерно в это же время базисная волна отрывается от поверхности моря. Это явление объясняется рядом причин, таких, как увеличение высоты базисной волны, рассеивание водяной пыли в воздухе и выпадение крупных капель в море.

Капли воды, выпадающие из водяного столба и радиоактивного облака, образуют сплошную толщу тумана до самой поверхности воды. В конце концов эти частицы воды поглощаются базисной волной, которая расширяется во все стороны и затем разгоняется ветром — так же, как обычные облака.

Поэтому взрыв боевого заряда обычно инициируется при помощи взрыва детонатора — небольшого заряда взрывчатого вещества, которое также имеет малую чувствительность. Этот детонатор обычно изолирован от остальной детонационной цепи предохранительного устройства, когда оно находится во включенном («безопасном») положении. Таким образом, безопасность боевой части обеспечивается применением низкочувствительных взрывчатых веществ как для самого боевого заряда, так и для детонаторов.

5.28. Лабораторные и полигонные испытания

Когда речь идет об испытаниях боевых частей управляемых снарядов, необходимо иметь в виду, что огромная энергия, освобождающаяся при взрыве боевых зарядов, не позволяет проводить эксперименты в помещениях. Лаборатории для испытания боевых частей создаются главным образом на полигонах. Для получения необходимых данных используется сложное и дорогостоящее оборудование, включая большие вычислительные машины. При определении характеристик боевой части может возникнуть необходимость произвести разрушение большого числа самолетов, зданий и т. п. Попытки определить характер действия атомных бомб на сооружения уже были описаны в печати.

Едиственные данные о широком применении атомного оружия были получены во время атомных бомбардировок Японии. Однако они принесли мало пользы, так как японские сооружения сильно отличаются от целей, с которыми придется иметь дело в будущей войне, а, кроме того, во время этих взрывов отсутствовали какие-либо приборы для определения зоны действия ударной волны и других поражающих факторов атомного взрыва. Зоны поражения можно определить при испытании бомбы эквивалентной мощности; но степень воздействия атомного взрыва на сооружения при этом не будет выяснена. Постройка же городов специально для разрушения атомными бомбами требует слишком больших расходов. Поэтому в настоящее время фактические данные в этой области по сути дела отсутствуют. В несколько меньшей степени это относится и ко всем остальным видам боевых зарядов.

Таким образом, сведений о действии различных видов боевых зарядов далеко не достаточно. Имеющаяся скудная информация используется в качестве основы для определения характеристик действия боевых частей расчетным путем. Эти расчеты связаны с большими затратами и могут быть успешно выполнены только с помощью вычислительных машин. Фактически большие цифровые вычислительные машины типа «Эниак» впервые были изготовлены для Лаборатории баллистики Абердинского испытательного полигона по заданию Артиллерийско-технического корпуса армии США. Это свидетельствует о том, насколько проектирование боевой части нуждается в вычислительной технике для проведения сложных вычислений.

Несмотря на все эти затруднения, боевые части проектируются и создаются. Для определения некоторых характеристик боевого заряда, например характеристики направленности его действия, можно использовать подрывы зарядов в бронях или в кругу мишеней или же сбрасывать заряды с самолетов, т. е. проводить испытания боевых частей без самих снарядов.

Заключительные испытания проводятся уже со снарядами, снабженными боевыми частями. Для зенитных снарядов заключительные испытания состоят в стрельбе по самолетам-мишеням, управляемым по радио. При проведении таких испытаний используются сложные измерительные приборы, но, несмотря на это, определение степени повреждения мишени сопряжено с ошибками. Вызывает беспокойство и тот факт, что самолет-мишень обладает большей уязвимостью, чем реальные цели. Больше того, поскольку новейшие типы самолетов не используются в качестве мишеней, результаты испытаний не дадут полного представления об эффективности применения управляемых снарядов против современных воздушных целей. Наконец, если к этому добавить, что для получения надежных данных необходимо провести большое количество дорогостоящих экспериментов, то станет очевидной вся сложность организации и проведения испытаний боевых частей управляемых снарядов.

Испытания боевых частей, предназначенных для поражения наземных целей, также требуют использования управляемых снарядов для воспроизведения реальных условий их применения. Стоимость проведения этих испытаний очень высока, но зато легче обеспечить выполнение необходимых измерительных работ и определение степени повреждения целей. Однако в этом случае трудно разрешимой становится проблема выбора района испытаний, особенно для дальнобойных снарядов. Район падения снарядов должен быть достаточно удален от населенных центров, и вся траектория полета снарядов должна проходить над безлюдной местностью. Совершенно очевидно, что проведение испытаний снарядов класса «земля — земля», снабженных атомными боевыми зарядами, на континентальной части США представляет весьма сложную проблему, так как при этом требуемая степень безопасности населения практически не достижима. Выходом из положения является стрельба по безлюдным островам, расположенным в океане. Но таких островов вблизи Соединенных Штатов очень мало. Австралия располагает безлюдным районом близ Вумера, где и проводятся обычно испытания управляемых снарядов. Однако проведение большого числа испытаний в другой части земного шара сопряжено с трудностями обеспечения и снабжения необходимым оборудованием.

Испытание снарядов представляет сложную проблему и поэтому маловероятно, что удастся в мирное время всесторонне оценить эффективность их действия. Даже во время войны трудно получить необходимые данные, так как невозможно обеспечить измерение требуемых характеристик и регистрацию результатов применения оружия. Более того, даже если удастся во время войны произвести нужные измерения и обработать их, то в результате будет получена лишь оценка использования оружия

против конкретных целей. *Конструктор не получит ответа на вопрос о том, каким должно быть оружие для следующей войны.* В этом состоит трудность создания оружия. Конструктор должен знать, для поражения каких целей предназначено оружие и как достигнуть того, чтобы оно было пригодно для выполнения своих задач. Образно выражаясь, производство оружия является увлекательной и в то же время очень серьезной игрой, ставки в которой достигают огромных размеров и последствия которой могут иметь катастрофический характер. Судьба страны в значительной мере зависит от умения хорошо играть в эту игру, и целью выпуска настоящего тома является подготовка тех, кто может стать ее участниками.

ВЗРЫВАТЕЛИ И ТРЕБОВАНИЯ К НИМ

6.1. Введение

В настоящей главе будут рассмотрены требования, предъявляемые к взрывателям, а также принципы их устройства и действия. Не следует думать, что назначение взрывателя состоит только в том, чтобы вызывать взрыв боевого заряда при ударе о преграду. Такое представление о взрывателях является слишком примитивным: даже контактные взрыватели могут решать сложные задачи по определению момента подрыва боевого заряда. Взрыватели имеют различные принципы действия, причем каждый из них обладает в конкретных условиях применения определенными достоинствами и недостатками.

В § 1.3 данного раздела говорилось, что взрыватель представляет собой элемент боевой части, который определяет оптимальный момент времени для детонации и инициирует взрыв боевого заряда. В действительности это не совсем так, поскольку наивыгоднейший момент для подрыва боевого заряда определяет конструктор боевой части. Оптимальный момент взрыва зависит от характеристик боевого заряда и взаимного положения цели и снаряда. Если в основу действия взрывателя положен принцип определения взаимного положения снаряда и цели, то конструктор может создать взрывательное устройство, вырабатывающее необходимые данные и производящее подрыв боевого заряда в нужный момент времени. Подробнее эти вопросы будут рассмотрены ниже, отдельно для случаев воздушной, наземной и подземной цели.

Различают два класса взрывателей: *контактные* и *неконтактные*. Контактные взрыватели срабатывают при непосредственном соприкосновении (контакте) с преградой. Неконтактные взрыватели реагируют на какую-либо характеристику цели или окружающей среды.

В каждый из этих классов входят несколько различных типов взрывателей, используемых для стрельбы по различным целям. Подробнее эти вопросы будут изложены в последующих параграфах.

6.2. Основная проблема управления взрывом, или проблема стрельбы

Назначение взрывателя в самых общих чертах состоит в подрыве боевого заряда таким образом, чтобы взрыв обеспечивал

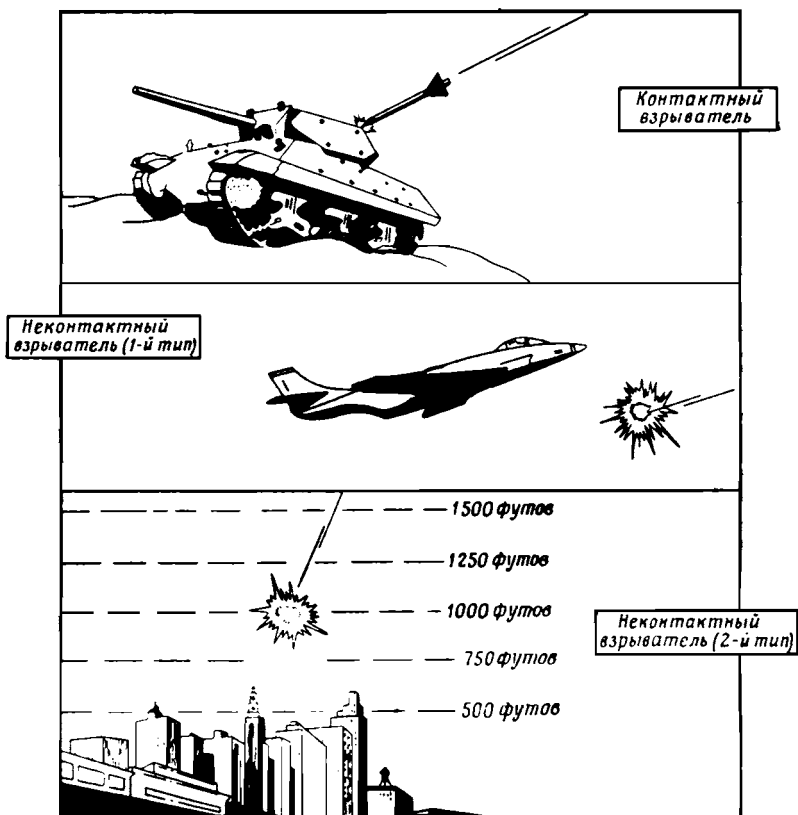
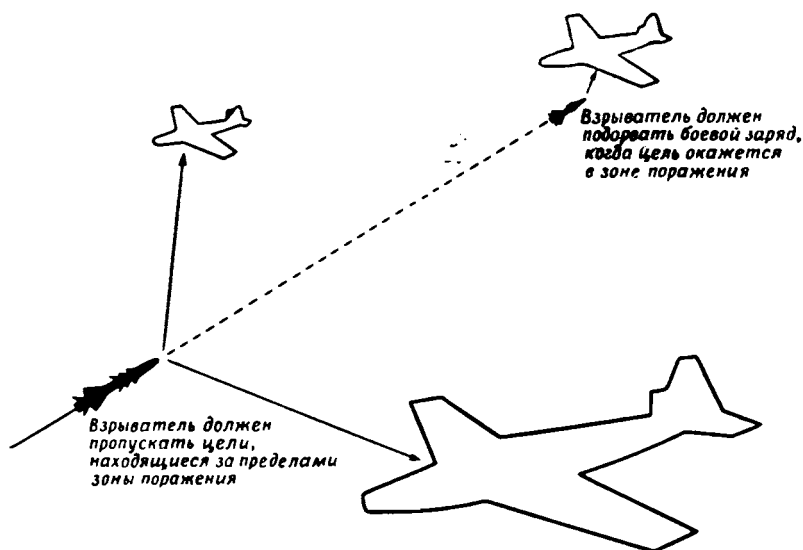


Рис. 6.1. Классы взрывателей.

поражение цели. Если на траектории полета снаряда имеется несколько точек, откуда можно поразить цель, то взрыватель должен выбрать ту точку, разрыв в которой причинит цели максимальное повреждение. В тех случаях, когда разрыв боевого заряда происходит непосредственно внутри цели, взрыватель не оказывает никакого влияния на характер распространения энергии взрыва. Однако во всех остальных случаях подрыв боевых зарядов происходит в результате срабатывания неконтактных взрывателей. Характеристика распространения энергии взрыва зависит

ог конструкции боевого заряда и взаимного положения цели и снаряда. Поэтому степень повреждения цели определяется моментом подрыва боевой части, который в свою очередь зависит от относительного положения траекторий снаряда и цели в пространстве. Задачей взрывателя является решение основной проблемы стрельбы при конкретном положении снаряда относительно цели. Для этого необходимо определить взаимное положение цели



Р и с. 6.2. Одни из вопросов управления взрывом.

и снаряда и затем вызвать детонацию боевого заряда с таким расчетом, чтобы максимально возможное количество поражающих элементов было направлено на разрушение наиболее уязвимых частей цели. Иначе говоря, подрыв боевого заряда должен быть произведен в такой момент, чтобы обеспечить наиболее эффективное поражение цели.

Степень выполнения этих условий является достаточным критерием эффективности стрельбы по одиночным целям относительно небольших размеров. Но случай стрельбы по групповым целям требует дополнительного рассмотрения. Предположим, что снаряд класса «земля — воздух» или «воздух — земля» должен поразить конкретную цель в группе одинаковых целей, и допустим, что эта цель является наиболее удаленной. Приближаясь к этой цели, снаряд будет пролетать мимо других целей в группе и для каждой из них на траектории полета снаряда будет существовать наиболее выгодная точка подрыва боевой части. Степень

повреждения цели зависит от расстояния между точкой подрыва и целью, поэтому разрыв снаряда в наивыгоднейшей для данной цели точке, но на слишком большом расстоянии, не позволяющем эффективно использовать энергию взрыва, является нежелательным. Однако последнее утверждение справедливо лишь в том случае, если впоследствии *другая цель окажется на более близком расстоянии от траектории снаряда* (см. рис. 6.2). Таким образом, взрыватель должен обладать способностью «пропускать» цели, находящиеся за пределами эффективного действия боевого заряда. К взрывателю может быть предъявлено требование: «чувствовать» только ту цель, которая выбрана системой управления. Но такое требование является излишним, поскольку при стрельбе по групповой цели будет использоваться несколько снарядов, и совершенно достаточно, чтобы каждый снаряд уничтожил по крайней мере одну цель, а не обязательно какую-то заранее выбранную.

6.3. Выбор систем координат

Выбор системы координат имеет важное значение для решения задач стрельбы и конструирования взрывателей. В настоящее время управляемые снаряды предназначены для поражения целей, находящихся на поверхности земли или на сравнительно небольшом расстоянии от нее. Поэтому движение снаряда и цели можно рассматривать в системе координат, связанной с землей и имеющей начало в наиболее удобном пункте. Кроме того, может быть использована система координат, имеющая начало на снаряде и движущаяся вместе с ним. В этом случае наблюдатель как бы тоже находится на снаряде и видит землю и цель как объекты, перемещающиеся относительно него. Наконец, третья возможная система координат связана с целью. Наблюдатель как бы находится на цели и видит, как к нему приближается снаряд. Какая из этих трех систем координат является наиболее предпочтительной?

С точки зрения конструктора боевой части земная система координат является не особенно удобной, за исключением случаев, когда цель расположена на поверхности земли. При использовании земной системы координат возникает ряд трудностей, особенно при описании характеристик боевой части. Конечно, если цель расположена на земле, система координат, связанная с целью, будет также земной системой.

Снарядная система координат является наиболее распространенной. Она очень удобна для описания характеристик действия боевой части. Некоторые неудобства этой системы связаны с тем, что она движется вместе со снарядом в окружающей среде, т. е. в атмосфере. Образно выражаясь, в мире, описываемом этой

координатной системой, всегда дует сильный встречный ветер. Этот ветер, т. е. набегающий поток воздуха, изменяет характеристики боевой части по сравнению с теми, которые были определены в статистических условиях на земле. При использовании снарядной системы координат для решения задач стрельбы возникает ряд трудностей, связанных с тем, что и снаряд и цель представляют собой движущиеся объекты. Конструктору боевой части приходится при этом сталкиваться с тем положением, что высота полета цели в снарядной системе координат отличается от истинной (при использовании земной системы координат этого не происходит). Кроме того, всякий, использующий снарядную систему координат, встречается с такими непривычными явлениями, как движение самолета боком или хвостом вперед или движение наземных целей со сверхзвуковыми скоростями. Дело в том, что наблюдатель как бы сидит на снаряде и перемещается вместе с ним. И к этому нужно привыкнуть. Если же снаряд вращается и система координат вращается вместе с ним, наблюдатель увидит вращающиеся и движущиеся по спирали цели.

Система координат, связанная с целью, неудобна для описания действия боевой части и взрывателя, но иногда полезна для определения условий поражения различных частей цели при взрыве боевого заряда. Так же как и в случае снарядной системы координат, картина, представляющаяся наблюдателю, может показаться необычной. Однако, по-видимому, значительно легче вообразить себя сидящим на цели, обстреливаемой снарядами. Поэтому с точки зрения привычных представлений человека системы координат, связанные с землей и целью, являются более привычными. Система координат, связанная со снарядом, в этом смысле менее удобна, так как человеку пока еще трудно представить себя в мире, движущемся со сверхзвуковой скоростью. Тем не менее в дальнейшем будет использована в основном снарядная система координат, поскольку она наиболее подходит для боевых частей.

6.4. Основная идея управления взрывом

Как уже было упомянуто выше, основной задачей конструктора взрывателей является создание такого взрывателя, который обеспечивал бы повреждение уязвимых частей цели при взрыве боевого заряда. Основные требования, которые должны при этом быть выполнены, проще всего сформулировать на основе использования системы координат, связанной с целью. Предположим, что мы находимся на одной из наиболее уязвимых частей цели и наблюдаем за приближающимся снарядом. До момента взрыва боевого заряда система управления старается удерживать снаряд на траектории, проходящей через рассчитанную точку встречи снаряда с целью. Как это выглядит в системе координат, связан-

ной с целью? Какой покажется траектория снаряда наблюдателю, находящемуся на цели?

Если цель неподвижна относительно земли, то ответ простой: снаряд будет лететь прямо на нас, если система управления работает безошибочно и отсутствует боковой ветер. Если же снаряд направлен прямо на наблюдателя, то он пролетит мимо цели. Это легко понять. Снаряд имеет некоторую скорость по отношению к цели. Скорость является векторной величиной и имеет определенное направление. Если вектор скорости не меняет направления и при своем продолжении не пересекает цель, *то снаряд пролетит мимо нее*. Если вектор скорости пересекает цель, *то снаряд попадет в нее*. При неподвижной цели и отсутствии бокового ветра продольная ось снаряда направлена вдоль вектора скорости. Поскольку в этом случае попадание снаряда в цель определяется только одним вектором скорости, то, если он направлен на цель, мы будем видеть снаряд летящим прямо на нас.

Предположим теперь, что наблюдатель расположен на самолете, имеющем некоторую скорость относительно земли и подвергающемся атаке управляемого снаряда, также летящего с определенной скоростью относительно земли. Если снаряд направлен в упрежденную точку встречи с целью, а самолет не совершает никаких маневров для уклонения от встречи со снарядом, наблюдатель будет видеть снаряд приближающимся прямо к нему, без изменения направления полета. При этом необязательно, чтобы продольная ось снаряда была направлена на наблюдателя. Направление оси снаряда определяется его движением относительно земли. Если курс снаряда перпендикулярен курсу самолета, то наблюдателю будет казаться, что снаряд летит боком. А с земли будет видно, что цель и снаряд сближаются друг с другом под прямым углом.

Если скорости снаряда и цели постоянны и продолжение вектора относительной скорости снаряда (векторной суммы скоростей снаряда и цели) проходит через цель, то снаряд попадет в цель. При таких условиях вектор, продолжение которого соединяет цель со снарядом, имеет постоянное, фиксированное направление по отношению к цели. Точно такое же положение имеет место и для снаряда. Если переставить местами слова «снаряд» и «цель», то приведенное выше правило будет справедливо и в системе координат, связанной со снарядом. Действительно, основное правило самонаведения гласит, что снаряд выбирает такой курс, что линия визирования снаряд — цель в снарядной системе координат остается неизменной.

Теперь обратимся к боевой части. Будет ли поражена цель, если за несколько мгновений до встречи снаряда с целью произойдет детонация боевого заряда? Задача остается прежней, за исключением того, что наблюдатель должен теперь следить

скорее за разлетом поражающих элементов боевого заряда, чем за самим снарядом. Если продолжение векторов скорости разлета поражающих элементов боевого заряда пересекает цель, то она будет поражена. Это звучит очень просто, но при детальном рассмотрении выявляется большое число дополнительных моментов.

Прежде всего, если поражающие элементы распространяются в нескольких направлениях с одинаковой скоростью относительно снаряда, то лишь часть их может оказать воздействие на цель. Если снаряд летит в упрежденную точку встречи с целью и распространение поражающих элементов происходит с некоторой конечной скоростью по отношению к снаряду, то *поражающие элементы, распространяющиеся в том же направлении, что и сам снаряд (относительно земли), не попадут в цель. Исключениями являются случаи стрельбы в лоб и вдогон. Это очень просто объяснить.* Если снаряд летит в упрежденную точку, то вектор его относительной скорости пересекает цель. При добавлении новой скорости (вектора скорости распространения поражающих элементов) направление вектора относительной скорости снаряда изменяется; таким образом, условия встречи с целью нарушаются.

Отсюда можно вывести несколько основных правил использования боевого заряда и взрывателя. *Снаряд, летящий в упрежденную точку встречи с целью, должен подрываться при соприкосновении с целью с помощью контактного взрывателя, за исключением случая, когда применение неконтактного взрывателя необходимо для увеличения зоны поражения (при стрельбе по крупным целям).* Поэтому боевая часть должна быть спроектирована так, чтобы неконтактный взрыватель вызывал детонацию боевого заряда только в случае прохождения снаряда мимо цели. Подобный вывод может показаться несколько странным, но тем не менее это так. Основная причина использования боевых частей с неконтактными взрывателями для поражения малоразмерных целей состоит в том, чтобы поражать цели даже при отсутствии прямых попаданий снарядов. Из всего сказанного выше следует, что боевые части, рассчитанные только на прямое попадание в цель, в большинстве случаев действуют неэффективно.

Таким образом, выявляются основы взаимодействия между боевым зарядом и взрывателем. При взрыве изотропного боевого заряда всегда некоторое количество поражающих элементов летит в направлении цели. От взрывателя не требуется никаких действий по обеспечению попадания части этих, обладающих огромной скоростью элементов в цель. Он должен лишь произвести взрыв боевого заряда на таком расстоянии от цели, чтобы обеспечить желаемую степень повреждения цели, т. е. учесть ослабление поражающего действия с увеличением расстояния (речь идет о стрельбе по малоразмерным целям).

Рассмотрим теперь анизотропный боевой заряд. На траектории полета снаряда можно выделить ряд участков, где подрыв боевого заряда не обеспечивает поражения цели. В самом деле, если усиление действия заряда очень высокое, т. е. вся энергия взрыва направлена в одном направлении, то на траектории полета снаряда имеется только одна точка, где детонация боевого заряда приведет к поражению цели. К этому следует добавить, *что для боевой части с ярко выраженной направленностью точка на траектории снаряда, наиболее близкая к цели, и точка, в которой должен произойти взрыв боевого заряда, не обязательно совпадают.* Это означает, что подрыв боевого заряда в точке, ближайшей к цели, чаще всего приведет к промаху. Такой вывод может вызвать недоумение, но он отражает действительное положение дела. Может возникнуть вопрос, зачем же создаются анизотропные боевые заряды. Дело в том, что ослабление действия боевого заряда* в результате подрыва на большем расстоянии с избытком компенсируется увеличением плотности поражающих элементов благодаря направленности взрыва.

6.5. Проблема управления взрывом с помощью контактного взрывателя при стрельбе по воздушным целям

В главе 5 были рассмотрены два возможных случая действия боевого заряда с контактным взрывателем: взрыв при ударе о преграду (цель) и взрыв внутри цели. В последнем случае, конечно, требуется обеспечить некоторое замедление в срабатывании взрывателя после соприкосновения с преградой. Эта задача, хотя на первый взгляд она и кажется весьма простой, в действительности является одной из самых сложных проблем, с которыми имеет дело конструктор боевых частей.

Поверхность цели — это не просто плоскость, перпендикулярная к траектории снаряда; кроме того, она не обладает большой прочностью. Цель представляет собой сложную конструкцию определенной формы, состоящую из ряда внутренних силовых элементов, покрытых тонкой обшивкой. Кроме того, цель обычно перемещается и имеет составляющую скорости, перпендикулярную оси снаряда. Обшивка цели может быть настолько тонкой, что при ее пробивании практически не происходит снижения скорости снаряда и взрыватель не срабатывает, особенно если он должен выдерживать аэродинамические нагрузки при полете снаряда с большими скоростями. Некоторые элементы цели могут располагаться под такими углами к траектории снаряда, что при ударе о них произойдет рекошетирование боевой части.

Если взрыв боевого заряда должен произойти внутри цели, требуемое замедление в действии взрывателя, очевидно, будет функцией скорости снаряда в момент удара. Взрыватель

с постоянным замедлением будет, очевидно, работать с некоторыми ошибками. Конечно, если замедление определяется не временем, а расстоянием, то желаемый результат может быть достигнут путем расположения боевого заряда впереди контактного взрывателя. Тогда боевой заряд будет проникать внутрь цели раньше, чем срабатывает взрыватель. Если при этом взрыватель функционирует нормально, то замедление во времени обеспечивается автоматически.

6.6. Проблема управления взрывом с помощью контактного взрывателя при стрельбе по наземным и подземным целям

В этом случае никаких особенно сложных задач не возникает. Наземные и подземные цели обычно являются прочными, и при ударе снаряда возникают усилия, достаточные для срабатывания взрывателя. Если боевой заряд должен взрываться после проникновения внутрь цели, достаточно создать некоторое замедление в работе взрывателя. Основные проблемы здесь связаны с обеспечением нормальной работы взрывателя в условиях воздействия на него огромных нагрузок, возникающих при ударе о преграду. Перемещения целей можно пренебрегать, так как скорости движения наземных целей весьма малы в сравнении со скоростями полета снарядов.

6.7. Проблема управления взрывом с помощью неконтактных взрывателей при стрельбе по воздушным целям

Эта проблема настолько сложна, что ей будет посвящено несколько параграфов. В данном параграфе будет рассмотрена система координат, связанная со снарядом и имеющая два измерения. Она располагается на плоскости, проходящей через ось снаряда и уязвимый элемент цели. Предполагается, что рассматриваемая часть пространства, в которой происходит встреча снаряда с целью, имеет сравнительно небольшой объем, несколько превосходящий зону поражения боевого заряда. Все остальные области, находящиеся за пределами рассматриваемого объема, не имеют отношения к проблеме управления взрывом. В выделенном объеме траектории снаряда и цели могут считаться прямолинейными и, кроме того, скорости снаряда и цели принимаются постоянными. Это справедливо потому, что радиусы кривизны возможных траекторий снаряда и цели очень велики по сравнению с радиусом рассматриваемого объема. При таких условиях действительная траектория цели относительно снаряда является прямой линией, но она не обязательно лежит в координатной плоскости.

Рассмотрим две линии (рис. 6.3): ось снаряда, продолженную в обе стороны, и траекторию полета цели относительно снаряда. Система координат в этом случае является пространственной и имеет начало на невращающемся снаряде, движущемся относительно земли. Рассматриваемые две линии могут пересекаться или не пересекаться. В общем случае они не пересекаются. При пересечении линий имеет место «копланарный»

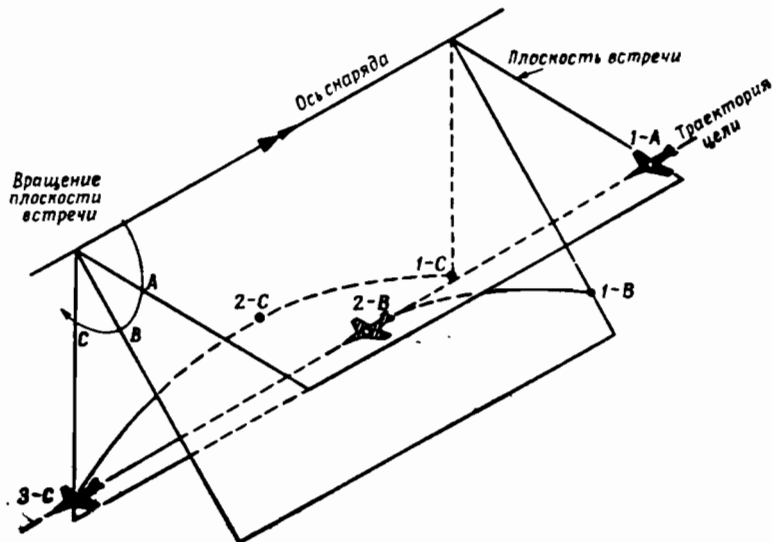
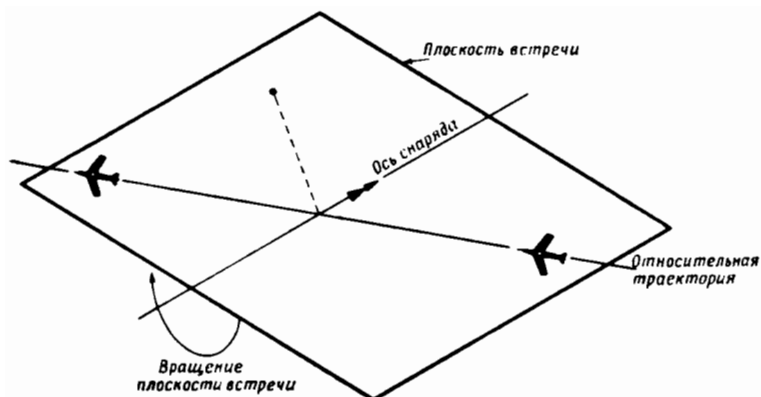
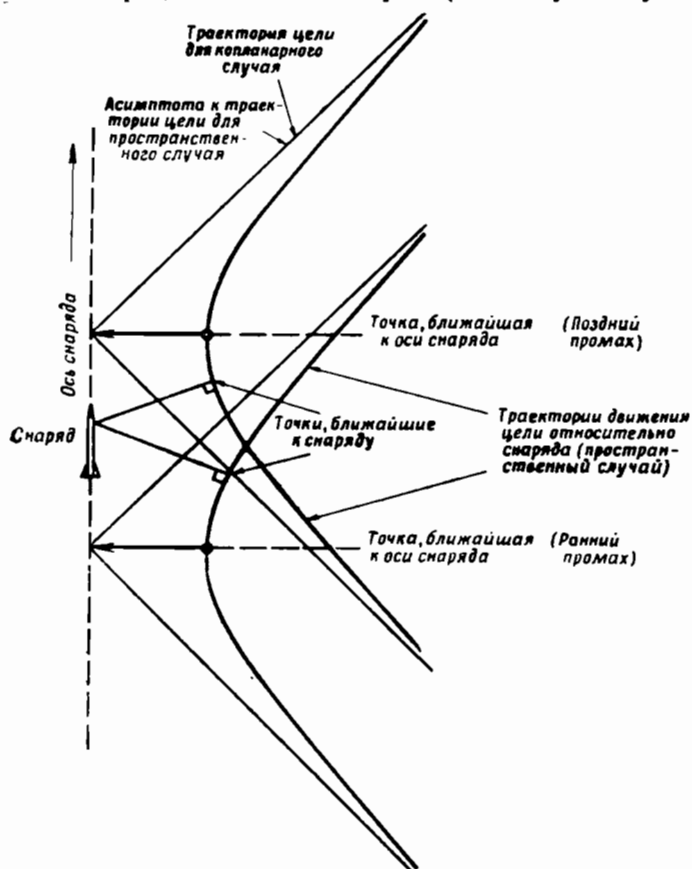


Рис. 6.3. Вращение плоскости встречи («пространственный случай»).

случай. Теперь рассмотрим изображение этих линий на плоскости, проходящей через ось снаряда и цель. Ось снаряда представляет прямую линию. Плоскость, называемая плоскостью встречи, обычно совершает вращение по мере приближения или удаления цели от снаряда. Геометрическое место точек цели на плоскости встречи обычно представляет собой гиперболу. В копланарном случае плоскость встречи не вращается до момента пересечения с целью оси снаряда, после чего плоскость встречи мгновенно поворачивается на угол 180° (если цель рассматривается как точка) и затем остается неподвижной (рис. 6.4). В копланарном случае траектория цели изображается двумя прямыми линиями на плоскости встречи, пересекающимися ось снаряда в одной и той же расчетной точке и образующими с осью одинаковые углы. В «пространственном» случае (т. е. когда траектории цели и снаряда не пересекаются) траектории цели изображаются семейством гипербол, асимптотами к которым являются траектории копланарного случая, как показано на



Р и с. 6.4. Вращение плоскости встечи („копланарный случай“).



Р и с. 6.5. Траектории движения цели относительно снаряда в плоскости встечи.

рис. 6.5. Если в точке пересечения траектории цели и продолжения оси снаряда находится сам снаряд, то в этом частном случае происходит прямое попадание.

До сих пор не было сделано никаких замечаний относительно того, как правильно определить характеристики действия снаряда в плоскости встречи, которая вращается вокруг оси снаряда. То обстоятельство, что снаряд имеет симметричную форму, не имеет никакого значения, поскольку снаряд является лишь средством транспортирования боевого заряда. В большинстве случаев боевой заряд также имеет характеристики, симметричные относительно оси снаряда, и поэтому при любом положении плоскости картина будет одинаковой. Если же характеристики боевого заряда несимметричны, то это должно быть принято во внимание. Только одна часть боевого заряда будет действовать эффективно — та, которая находится в плоскости встречи в момент столкновения снаряда с целью. Боевые заряды, имеющие ярко выраженную анизотропность за счет отсутствия симметрии относительно оси снаряда, требуют, чтобы снаряд совершал вращение и, таким образом, удерживал направление наибольшего разрушающего действия боевого заряда все время в плоскости встречи.

6.8. Система координат в плоскости встречи

Обычно используется полярная система координат с началом во взрывателе или боевом заряде снаряда. Углы измеряются от оси снаряда и называются полярными углами. Для направления полета снаряда полярный угол равен нулю. Поскольку плоскость встречи вращается вокруг оси снаряда и по сути дела является только полуплоскостью, полярные углы могут изменяться от 0 до 180°.

Интересно отметить, что кратчайшие расстояния от траектории цели до оси снаряда и до самого снаряда не одинаковы, как можно видеть из рис. 6.5. Заслуживают интереса также два понятия, сущность которых можно уяснить из того же рисунка, — это «ранний промах» и «поздний промах». При *раннем промахе* проекция ближайшей точки траектории цели на ось снаряда располагается позади, а при *позднем промахе* — впереди снаряда. Во время анализа оба этих случая должны рассматриваться отдельно. При раннем промахе снаряд оказывается в упрежденной точке раньше, чем цель; в случае позднего промаха цель пересекает продолжение оси снаряда раньше, чем в эту же точку попадает снаряд.

6.9. Копланарный случай

Можно показать, что все основные параметры, определяющие условия встречи снаряда с целью, охватываются при исследовании одного только копланарного случая. Поэтому в настоящей

главе исследование копланарного случая производится лишь для иллюстрации основных параметров. Этими параметрами являются (см. рис. 6.6): вектор скорости снаряда V_M , вектор скорости цели V_T , вектор относительной скорости цели V_R , вектор скорости пространства поражающих элементов боевого заряда (в плоскости встречи) V_f и полярные углы, составляемые этими векторами с осью снаряда. Поскольку V_M направлен вдоль оси снаряда (т. е. коллинеарен оси), для него полярный угол равен нулю.

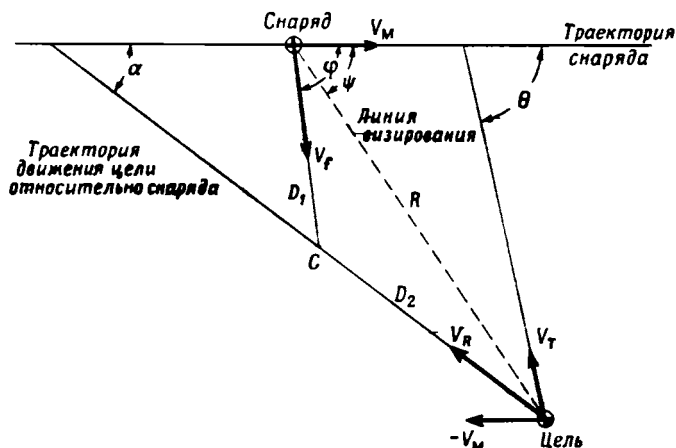


Рис. 6.6. Анализ случая раннего промаха.

Вектору V_T соответствует угол θ , вектору V_R — угол α и вектору V_f — угол φ . Проведем **линию визирования**, соединяющую снаряд с целью и имеющую длину R ; ей соответствует полярный угол ψ . Задача состоит в определении условий **встречи поражающих элементов боевого заряда с целью**. Вначале рассмотрим случай раннего промаха. Отсчет времени будем вести с того момента, когда цель находится под углом ψ к оси снаряда. Необходимо вычислить промежуток времени Δt , по истечении которого должен произойти взрыв боевого заряда, чтобы поражающие элементы попали в цель.

Для случая раннего промаха имеем:

$$R \sin \psi = D_1 \sin \varphi + D_2 \sin \alpha, \quad (6.1)$$

$$R \cos \psi = D_1 \cos \varphi + D_2 \cos \alpha, \quad (6.2)$$

откуда

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{D_1 \sin \varphi + D_2 \sin \alpha}{D_1 \cos \varphi + D_2 \cos \alpha}. \quad (6.3)$$

Если обозначить через t время полета цели до точки встречи C , то

$$D_1 = V_r(t - \Delta t), \quad (6.4)$$

$$D_2 = V_r t. \quad (6.5)$$

После подстановки получим:

$$\Delta t = \frac{t [V_r \sin \varphi + V_r \sin \alpha - \operatorname{tg} \psi (V_r \cos \varphi + V_r \cos \alpha)]}{V_r (\sin \varphi - \cos \varphi \operatorname{tg} \psi)}. \quad (6.6)$$

Из уравнения (6.6) видно, что требуемая величина замедления Δt является функцией t (времени полета цели от точки, находящейся под углом ψ к оси снаряда, до точки встречи). Полученное выражение неудобно для расчета, поскольку величина t обычно неизвестна. Как получить выражение, не зависящее от t ?

Обратившись снова к уравнению (6.6), видим, что условием независимости всего выражения от t является равенство нулю числителя. В самом деле, в этом случае замедление Δt также равно нулю, т. е. взрыв боевого заряда должен быть произведен в тот момент, когда цель наблюдается под углом ψ . Числитель будет равен нулю, если

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{V_r \sin \varphi + V_r \sin \alpha}{V_r \cos \varphi + V_r \cos \alpha}. \quad (6.7)$$

Из этого выражения можно определить ψ . Отметим, что в формулу (6.7) не входит дистанция промаха. Следовательно, если взрыв боевого заряда произведен в тот момент, когда цель видна под углом ψ , найденным по формуле (6.7), поражающие элементы попадут в цель при любой величине промаха. Следует вновь подчеркнуть, что все изложенное выше относится к копланарному случаю и справедливо при условии, что все параметры являются постоянными.

Для случая позднего промаха (рис. 6.7) имеем

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{D_1 \sin \varphi - D_2 \sin \alpha}{D_1 \cos \varphi + D_2 \cos \alpha}, \quad (6.8)$$

$$\Delta t = \frac{t [V_r \sin \varphi - V_r \sin \alpha - \operatorname{tg} \psi (V_r \cos \varphi + V_r \cos \alpha)]}{V_r (\sin \varphi - \cos \varphi \operatorname{tg} \psi)}. \quad (6.9)$$

Величина промаха не будет влиять на результаты, если взрыв будет произведен в тот момент, когда цель находится под углом ψ , вычисленным по формуле

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{V_r \sin \varphi - V_r \sin \alpha}{V_r \cos \varphi + V_r \cos \alpha}. \quad (6.10)$$

Единственно, чем отличаются друг от друга формулы для случаев раннего и позднего промахов, это знаком перед вторым слагаемым числителя. Угол α в обоих выражениях (6.7) и (6.10)

ограничен, конечно, положительными значениями. Если условиться, что для случая позднего промаха полярный угол α является отрицательным, то можно получить общую формулу для случаев раннего и позднего промахов.

Для того чтобы выразить V_r и α через скорости снаряда и цели, необходимо использовать иную систему координат. Рассмотрим плоскость, также проходящую через ось снаряда и цель, но имеющую систему координат, связанную с землей. В этой системе

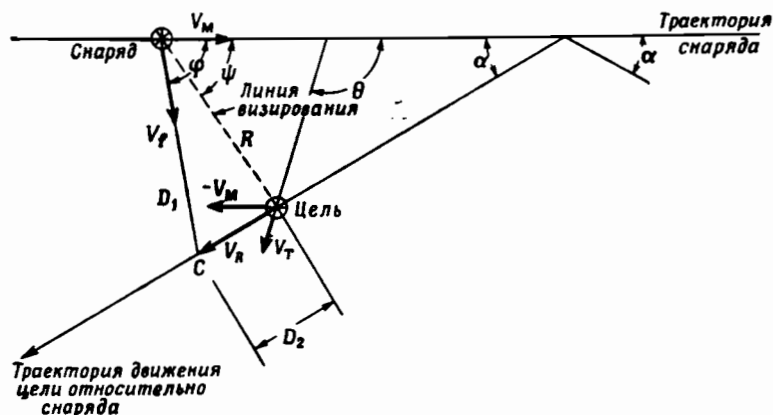


Рис. 6.7. Анализ случая позднего промаха.

координат вектор скорости снаряда направлен вдоль оси (при отсутствии колебаний снаряда относительно поперечных осей), а вектор скорости цели отклонен на угол θ от оси снаряда. Из рис. 6.8 видно, что

$$\bar{V}_r = -\bar{V}_m + \bar{V}_t, \quad (6.11)$$

$$V_r \cos \alpha = V_m + V_t \cos \theta, \quad (6.12)$$

$$V_r \sin \alpha = V_t \sin \theta. \quad (6.13)$$

Следует отметить, что для всего диапазона положительных значений α угол θ может изменяться только от 0 до 180° . Если угол θ больше 180° , то это означает, что цель приближается к снаряду с противоположной стороны. Если измерять угол θ в диапазоне от 0 до 360° , то угол α будет принимать положительные и отрицательные значения. Тогда можно будет вывести общую формулу для случаев раннего и позднего промаха. Используя выражения (6.7), (6.10) и (6.13), получим при $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ для раннего промаха

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{V_r \sin \varphi + V_t \sin \theta}{V_r \cos \varphi + V_m + V_t \cos \theta}; \quad (6.14)$$

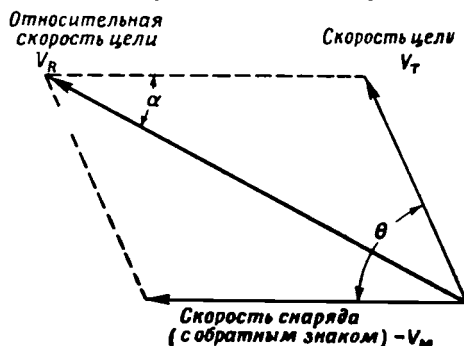
для позднего промаха

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{V_f \sin \varphi - V_t \sin \theta}{V_f \cos \varphi + V_m + V_t \cos \theta} \quad (6.15)$$

Для обоих случаев сразу можно записать

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{V_f \sin \varphi + V_t \sin \theta}{V_f \cos \varphi + V_m + V_t \cos \theta} \quad (6.16)$$

где $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ для случая раннего промаха;
 $180^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$ для случая позднего промаха.



Р и с. 6.8. Определение относительной скорости цели.

Каковы возможные значения $\operatorname{tg} \psi$? Очевидно, что угол ψ может изменяться в зависимости от соотношения между параметрами снаряда и цели. Рассмотрим случай, когда

$$V_f \sin \varphi > V_t \sin \theta, \quad (6.17)$$

$$V_m + V_f \cos \varphi > V_t \cos \theta. \quad (6.18)$$

Параметры V_f , V_m и φ являются для данного снаряда вполне определенными величинами. Неизвестными и неопределенными параметрами являются V_t и θ . Правда, скорость цели V_t может быть ориентировочно указана, так как данный комплекс управляемого снаряда обычно предназначен для уничтожения целей определенного класса. Если диапазон возможных углов встречи снаряда с целью ограничен, то величина θ также может быть приближенно оценена. Пусть основные параметры имеют следующие значения:

$$\varphi = \frac{\pi}{2}; \quad V_f = 4V_t; \quad V_m = 2V_t.$$

Тогда

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{4 + \sin \theta}{2 + \cos \theta}. \quad (6.19)$$

Во всем диапазоне возможных значений углов θ для случаев раннего и позднего промаха угол ψ изменяется от $50,5$ до $76,5^\circ$, т. е. всего на 26° . Другими словами, при данных условиях для всех направлений атаки (при изменении θ от 0 до 360°) требуемый угол разлета поражающих элементов боевого заряда изменится только в пределах 26° . Можно показать, что при изменении угла θ в диапазоне $150 \div 210^\circ$ угол ψ меняется лишь на 45° . Это соответствует случаю стрельбы вдогон. Итак, если скорости полета снаряда и распространения поражающих элементов значительно превосходят скорость цели, то изменение угла ψ происходит в весьма ограниченных пределах. Сделаем еще одно заключение. Поскольку было принято, что угол ψ имеет для данного снаряда фиксированное значение, то тем самым предполагалось, что усиление действия заряда равно бесконечности (см. § 5.4). На самом деле эта величина имеет конечное значение, и поэтому поражающие элементы различаются в некотором диапазоне углов ψ . Для изотропного боевого заряда усиление равно единице, а углы разлета поражающих элементов охватывают все возможные значения углов ψ . Если характеристика направленности боевого заряда такова, что диапазоны изменения углов θ и ψ совпадают, то взрыв боевой части при среднем значении угла ψ обеспечит поражение цели. Справедливость этого вывода можно доказать в предположении, что угол ψ постоянен. Определим угол ψ из выражения (6.16), приняв $V_r = 4$, $V_m = 2V_r$ и $\operatorname{tg} \psi = 2$ ($\psi = 63,5^\circ$).

В результате вычислений получим

$$\sin \varphi = \frac{-1 + 2\sqrt{80 - \gamma^2}}{20},$$

где $\gamma = \sin \theta - 2 \cos \theta - 4$.

При изменении θ от 0 до 360° угол ψ меняется от 70 до 90° . Таким образом, приведенное выше положение является справедливым. В действительности изменение ψ при постоянном θ происходит менее резко, чем изменение ψ при постоянном θ .

Хотя проведенный анализ в какой-то степени проливает свет на проблему использования неконтактных взрывателей при стрельбе по воздушным целям, он ни в коей мере не является полным. Дело не только в том, что мы рассматривали лишь копланарный случай, — мы не учли многие факторы. К числу их относятся: влияние внешней среды, окружающей снаряд, влияние колебаний снаряда, влияние изменений в скоростях снаряда, цели и разлета поражающих элементов. Подобные вопросы здесь не рассматриваются, так как для общего ознакомления с проблемой в этом нет надобности.

6.10. Проблема управления взрывом с помощью неконтактных взрывателей при стрельбе по наземным и подземным целям

Следует различать площадные и малоразмерные цели. В последнем случае, т. е. при стрельбе по всякого рода небольшим подвижным целям, проблема управления взрывом решается так же, как для случая воздушных целей. Разница состоит лишь в том, что скоростью движения цели в данном случае можно пренебречь. Тогда основное уравнение принимает вид

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{V_f \sin \varphi}{V_m + V_f \cos \varphi} \quad (6.20)$$

Угол ψ целиком зависит от значений параметров снаряда. Значения угла φ и скорости V_f не могут быть выбраны произвольными, так как они зависят от прогресса в области производства боевых зарядов. Отметим, что боевой заряд, для которого угол φ равен нулю, является непригодным для использования. Для такого боевого заряда угол ψ , очевидно, также равен нулю. В этом случае поражение цели произойдет лишь при условии прохождения снаряда через упрежденную точку, причем момент подрыва боевого заряда является неопределимым. Поэтому угол φ должен быть подобран так, чтобы обеспечить наиболее эффективное действие боевого заряда, а характеристики взрывателя должны быть согласованы с параметрами боевого заряда.

Если цель имеет большие размеры или если она ничем не выделяется на фоне окружающей среды, управление взрывом, основанное на характеристиках цели, становится невозможным. В первом случае нет необходимости выбирать какую-либо точку цели — задача состоит в разрушении как можно большей ее части. Во втором случае обнаружение цели становится невозможным. Поэтому в обоих случаях действие взрывателя должно быть основано на использовании свойств не самой цели, а окружающей цель среды. Условимся называть такой взрыватель *неконтактным взрывателем второго типа*.

При стрельбе по подводным целям используются такие же взрыватели, как у торпед. Уравнение, описывающее условия попадания снаряда в цель, имеет такой же вид, как для случая стрельбы по воздушным целям, и отличается лишь порядком величин скоростей. Пренебрегать скоростью цели нельзя, поскольку под водой скорости движения снаряда и поражающих элементов уменьшаются и становятся соизмеримыми со скоростью движения цели.

6.11. Проблема управления взрывом с помощью неконтактного взрывателя второго типа при стрельбе по воздушным целям

Поскольку ни один параметр среды, окружающей воздушную цель, не может быть заранее определен, неконтактные

взрыватели второго типа для этого случая непригодны. Для использования взрывателей такого типа необходимо, чтобы положение цели однозначно определялось бы характеристиками окружающей среды. Только в этом случае можно произвести взрыв боевого заряда в нужный момент. Неконтактные взрыватели второго типа применяются в основном для стрельбы по наземным (надводным) и подземным (подводным) целям.

6.12. Проблема управления взрывом с помощью неконтактных взрывателей второго типа при стрельбе по наземным целям

Неконтактные взрыватели второго типа применяются для стрельбы по наземным целям, имеющим большие размеры или ничем не выделяющимся на фоне окружающей местности. Предполагается, что система управления способна направить снаряд в такую точку, где взрыв боевого заряда может поразить часть цели или всю цель. Задача взрывателя состоит в определении того момента, когда зона поражения снаряда охватывает цель. Поскольку цель расположена на земле и взрыв боевого заряда должен быть произведен над целью, необходимо определить высоту взрыва, которая обеспечивает наиболее эффективное действие боевого заряда. Поэтому неконтактный взрыватель второго типа может представлять собой высотомер, вызывающий взрыв боевого заряда на заранее рассчитанной высоте.

6.13. Проблема управления взрывом с помощью неконтактных взрывателей второго типа при стрельбе по подводным целям

Это также особая проблема, имеющая важное значение для ведения подводной войны. Неконтактный взрыватель второго типа для стрельбы по подводным целям обычно представляет собой глубомер. Если бы можно было измерить другие характеристики окружающей среды, кроме давления, то можно было бы создать взрыватель, работающий на другом принципе.

6.14. Общие замечания относительно принципов действия взрывателей

Действие взрывателей может быть основано на использовании различных физических явлений и свойств. К ним относятся излучение электромагнитных волн всех длин, радиоактивность, акустика, магнитостатические и электростатические явления, распространение космических лучей, изменение барометрического давления и т. п.

Взрыватели могут также различаться по характеру использования того или иного физического явления. В случае контакт-

ного взрывателя его срабатывание происходит при непосредственном соприкосновении с преградой. В случае неконтактного взрывателя возможны четыре различных способа использования излучаемой энергии: 1) взрыватель облучает цель и принимает отраженные от цели сигналы; 2) цель облучается другим источником, например наземным локатором, а взрыватель только принимает отраженные от цели сигналы; 3) цель облучается источником, не находящимся под контролем человека, а взрыватель принимает отраженные от цели сигналы; 4) взрыватель воспринимает сигналы, посылаемые самой целью. Эти способы иногда называют соответственно активным, полупассивным, полупассивным и пассивным.

Если принцип действия взрывателя основан на использовании не излучаемой энергии, а статических зарядов, то классификация остается прежней. Например, взрыватель, использующий квазимагнитостатический принцип, может создавать свое собственное магнитное поле и реагировать на его взаимодействие с магнитным полем цели (взрыватель активного типа), может измерять характеристики взаимодействия магнитных полей цели и земли (взрыватель полупассивного типа) или, наконец, измерять характеристики магнитного поля, создаваемого целью (взрыватель пассивного типа).

6.15. Принципы действия контактных взрывателей

Контактные взрыватели срабатывают при ударе о цель. В результате может произойти перемещение масс внутри снаряда, соединение нескольких частей или, наоборот, разъединение каких-либо элементов с помощью подвижных преград. На этих простых принципах основано действие большого числа различных механизмов. Замедление снаряда при ударе о цель может вызвать перемещение масс относительно взрывателя. Результатом может быть иницирование капсюлей-детонаторов, замыкание контактов, поломка слабых предохранительных деталей, выработка напряжения при перемещении магнитов, воздействие химических веществ и т. д. Соединение каких-либо частей может быть использовано для замыкания контактов. Подвижные преграды могут препятствовать движению каких-либо деталей взрывателя и, таким образом, вызывать иницирование взрыва. Детальное описание устройства всех механизмов, которые могут быть использованы для этой цели, не входит в нашу задачу. Многое из того, о чем не было здесь сказано, читатель может представить с помощью собственного воображения.

Необходимо обратить внимание на следующее. Если скорость встречи с целью небольшая, то обеспечить нормальную работу взрывателя нетрудно; при больших же (сверхзвуковых)

скоростях это сделать сложнее. Если снаряд ударяется в лист алюминия, то силы, действующие на него при небольших скоростях, будут существенно отличаться от сил, действующих на него при высоких скоростях. Заслуживает внимания, например, поведение воздуха, находящегося между снарядом и преградой. При дозвуковых скоростях полета этот воздух вытесняется в стороны по мере приближения снаряда и практически не оказывает сопротивления его движению. При сверхзвуковых скоростях воздух не может двигаться быстрее, чем распространяется ударная волна, и в результате создается значительное сопротивление. При ударе снаряда произойдет чрезвычайно быстрое выделение тепла, вследствие чего лист может расплавиться и будет легко пробит. Наконец, непосредственного соприкосновения взрывателя с листом может не произойти. Ударная волна, движущаяся впереди взрывателя, может пробить лист и развернуть края пробоины в стороны. Поэтому результаты испытаний контактных взрывателей при небольших скоростях встречи с преградой нельзя распространять на случай сверхзвуковых скоростей.

6.16. Неконтактные взрыватели, работающие на принципе использования электромагнитных волн

Для работы взрывателя могут быть использованы все известные части электромагнитного спектра. Однако на практике выбор частот определяется такими соображениями, как распространение, затухание, передача, прием и отражение радиоволн, а также возможности создания радиопомех. Наиболее употребительными являются радиоволны и световые волны (от инфракрасных до ультрафиолетовых). Хотя диапазон длин волн достаточно широк, основные законы распространения электромагнитной энергии справедливы для всех частей спектра.

При создании таких взрывателей прежде всего возникают вопросы: как вырабатывается электромагнитная энергия, как она может передаваться, как она отражается от предметов и как ее можно принимать? Для активных и полупассивных радио-взрывателей необходимо получить ответы на все перечисленные выше вопросы. Для полупассивных и пассивных взрывателей нужно ответить только на часть из них. В соответствии с принятой методикой изложения материала вместо обзора обширной литературы, посвященной использованию электромагнитной энергии, будут рассмотрены вопросы, касающиеся непосредственного применения этой энергии во взрывателях.

В первую очередь необходимо рассмотреть особенности распространения радиоволн в атмосфере. Для большей части

спектра радиочастот в зоне действия неконтактных взрывателей не происходит никаких явлений, затрудняющих распространение радиоволн. Однако по мере укорочения длины волн эти явления возникают. Они становятся особенно заметными при длинах волн короче 1 фута (0,3 м) и объясняются наличием в воздухе водяного пара. Присутствие водяного пара в атмосфере может вызвать отражение радиоволн и уменьшение дальности их распространения — это явление используется при разведке грозowych туч с помощью радиолокаторов. Для более коротких волн поглощение энергии парами воды усиливается и при длине волны приблизительно 1,2 см достигает значительной степени. Наконец, распространение еще более коротких волн сопровождается резонансными явлениями, связанными с наличием в атмосфере различных частиц. Одни из этих явлений вызывают затруднения в работе радиотехнических устройств, другие оказываются полезными и могут быть использованы.

Поглощение и ослабление световых волн носит еще более ярко выраженный характер. Каждый знает, что водяные пары могут значительно ухудшить видимость, поэтому устройства, рассчитанные на применение при любой погоде, нельзя создавать на принципе использования видимых лучей. Более подробно эти вопросы изложены в первой книге настоящей серии, носящей название «Управление снарядами».

Дополнительной проблемой является учет влияния излучений из посторонних источников, которые могут нарушить нормальную работу активных и полуактивных взрывателей. Солнце может служить серьезной помехой для систем, использующих видимую часть электромагнитного спектра. Для того чтобы взрыватель не сработал от солнца (вместо цели), используются различные виды предохранительных устройств.

Другой важной проблемой, которую должен решить конструктор взрывателя, является направленное излучение электромагнитной энергии, а также расчет ее затухания в результате действия дополнительных факторов (кроме тех атмосферных явлений, о которых говорилось выше). Законы распространения электромагнитной энергии являются общими для всех частей спектра. Для конструирования взрывателей необходимо знать характеристики направленности передающих антенн, закон затухания энергии при ее распространении в пространстве, закон отражения энергии от цели и затухания ее при распространении после отражения, а также характеристики приемных антенн.

Электромагнитные волны распространяются со скоростью света в пустоте. Из источника, имеющего изотропную характеристику излучения, они распространяются одинаково во всех направлениях. Если полная мощность излучения равна P , то

удельная мощность на расстоянии D от источника будет в любом направлении равна

$$P = \frac{P_t}{4\pi D^2}. \quad (6.21)$$

Если характеристика излучения является анизотропной, то коэффициент усиления может быть подсчитан как отношение максимальной удельной мощности к удельной мощности для изотропного случая. Коэффициент усиления изотропного источника равен единице. Максимальная удельная мощность равна

$$P_m = \frac{G_t P_t}{4\pi D^2}, \quad (6.22)$$

где G_t — коэффициент усиления мощности передатчика.

Анизотропность распространения радиоволн обеспечивается с помощью направленных антенн с отражателями или несколькими вибраторами, расположенными около асимметричного излучателя. Если излучение происходит равномерно через всю эффективную поверхность антенны, то коэффициент усиления мощности G может быть определен по формуле

$$G_t = \frac{4\pi A_t}{\lambda^2}, \quad (6.23)$$

где A_t — эффективная площадь излучения антенны (площадь отверстия);

λ — длина волны.

Практически коэффициенты усиления антенн оказываются всегда меньшими, чем вычисленные по формуле (6.23). Например, согласно этой формуле, антенна с круглым отверстием площадью в 1 фут² имела бы коэффициент усиления, равный 4π (при длине волны в 1 фут).

С коэффициентом усиления связана ширина луча. Антенна, имеющая большой коэффициент усиления, должна излучать энергию узким пучком. В какой связи находятся ширина луча, длина волны и размеры антенны? Для круглого отверстия

$$B \cong 70 \frac{\lambda}{d} \text{ град.}, \quad (6.24)$$

где B — ширина луча (угол между двумя направлениями, для которых $G_t = \frac{1}{2} G_m$);

d — диаметр отверстия.

Из выражений (6.23) и (6.24) получим

$$G_t \cong \frac{50\,000}{B^2}. \quad (6.25)$$

Таким образом, излучатель с шириной луча в 1° будет иметь коэффициент усиления, равный 50 000. В данном случае диаметр излучателя равнялся бы 70 длинам волн.

Рассмотрим теперь приемные антенны. Если эффективная приемная площадь равна A_r , а принимаемая удельная мощность p_i , то полная мощность сигнала, принятого антенной, будет равна

$$P_r = A_r p_i. \quad (6.26)$$

Эффективная приемная площадь связана с коэффициентом усиления следующим соотношением:

$$A_r = \frac{G_t \lambda^2}{4\pi}. \quad (6.27)$$

Теперь можно вычислить отношение мощностей принимаемого и передаваемого сигналов. Если приемник и передатчик находятся на расстоянии D , то

$$\frac{P_r}{P_t} = \frac{G_t A_r}{4\pi D^2}. \quad (6.28)$$

Рассмотрим радиосистему активного типа, которая излучает энергию в пространство и принимает сигналы, отраженные от цели. Величина принятого сигнала зависит от способности цели отражать энергию. Определение отражательной способности цели представляет сложную задачу. В общем случае отражательная характеристика цели является анизотропной. Для упрощения задачи предположим, что цель представляет собой некий гипотетический объект, который отражает энергию одинаково во всех направлениях (изотропно). Допустим, что цель имеет отражающую поверхность σ , и произведение σ на плотность излучаемой энергии равно полной мощности, отраженной от цели. В действительности σ зависит от формы цели. Вычислим характеристику затухания энергии. Плотность энергии, падающей на цель, равна

$$\frac{P_t G_t}{4\pi D^2}. \quad (6.29)$$

Мощность, отражаемая целью, равна произведению этой плотности на поперечное сечение цели, т. е.

$$\frac{P_t G_t \sigma}{4\pi D^2}. \quad (6.30)$$

Удельная мощность на приемнике, находящемся рядом с передатчиком (в случае изотропной отражательной способности цели), равна

$$\frac{P_t G_t \sigma}{4\pi D^2 4\pi D^2}. \quad (6.31)$$

Принимаемая мощность поэтому равна

$$P_r = \frac{P_t G_t \sigma A_r}{(4\pi D^2)^2}. \quad (6.32)$$

Затухание характеризуется отношением

$$\frac{P_r}{P_t} = \frac{G_t \sigma A_r}{(4\pi D^2)^2}. \quad (6.33)$$

Для того чтобы оценить порядок этой величины, примем, что площади передающей и приемной антенн равны 1 фут², длина волны равна 1 футу, площадь поперечного сечения цели равна 10 фут², а расстояние до цели — 100 футов. В этом случае затухание приблизительно равно 10⁻⁸. Это сравнительно слабое затухание; мощные радиолокаторы способны работать при затухании порядка 10⁻¹⁸.

Рассмотренный случай, конечно, далеко не исчерпывает всего многообразия возможных вариантов. Можно представить себе такие цели, которые не охватываются целиком лучом передающей антенны (крупные наземные объекты) или же «освещаются» только частично (самолеты). Если целью является земля (например, для взрывателя, который должен сработать на определенном расстоянии от нее), и предполагается, что отражение радиоволн от земли имеет диффузионный характер, закон затухания может быть приближенно записан в таком виде:

$$\frac{P_r}{P_t} = \frac{\rho A_r}{\pi D^2}, \quad (6.34)$$

где ρ — характеристика отражательной способности земли. Следует обратить внимание на тот факт, что коэффициент усиления передающей антенны в формуле (6.34) не фигурирует. Это является следствием принятого предположения о том, что передающая антенна имеет очень острую направленность и поэтому вся передаваемая энергия достигает земли.

Формула (6.34) справедлива только в случае непрерывного излучения. При импульсном режиме излучения может оказаться, что продолжительность импульса слишком коротка для того, чтобы одновременно облучать всю поверхность земли в пределах ширины луча. В этом случае приближенно справедлива следующая зависимость

$$\frac{P_r}{P_t} = \frac{G_t \rho \tau c A_r}{8\pi^2 D^3}, \quad (6.35)$$

где

- ρ — характеристика отражательной способности земли;
- τ — продолжительность импульса;
- c — скорость света.

Заметим, что затухание обратно пропорционально кубу расстояния и прямо пропорционально продолжительности импульса. Коэффициент усиления передающей антенны в данном случае входит в формулу потому, что эффективная облучаемая площадь меньше площади, соответствующей ширине луча. Если эффективная облучаемая площадь соответствует ширине луча, то остается справедливой формула (6.34). Это может произойти в случае острой направленности, большой продолжительности импульса и малой высоты над поверхностью земли.

Приведенные выше соображения, касающиеся затухания, должны учитываться при конструировании взрывателей, использующих для своей работы электромагнитные волны. В любом случае принятый сигнал должен быть усилен. При этом возникает ряд проблем, связанных с интерференцией входного сигнала и сигналами других радиосистем и шумами, создающимися самой системой взрывателя. При определенном соотношении между длиной волны и размерами взрывательного устройства может оказаться, что благодаря затуханию величина принятого сигнала меньше уровня шумов, всегда создающихся в детекторе. В этом случае не поможет никакое усиление. Детально эти вопросы изложены в первой книге настоящей серии («Управление снарядами»).

6.17. Неконтактные взрыватели, работающие на принципе использования электростатического эффекта

Хотя на основе применения электромагнитных волн можно создавать взрыватели самых различных типов, действующие как на больших, так и на малых расстояниях от цели, в некоторых случаях соображения стоимости или защиты от радиопомех заставляют использовать взрыватели, работающие на других принципах. На небольших расстояниях может быть использован электростатический эффект. Если снаряд имеет электростатический заряд, изменяющий свою величину при приближении цели, то на основе этого явления может быть создан взрыватель активного типа. Если цель имеет заряд, который может быть обнаружен взрывателем, то последний будет относиться к пассивному типу. Наконец, можно сконструировать полупассивный взрыватель, который будет определять изменение электростатического поля земли, вызванное присутствием цели.

Создание электростатических взрывателей практически возможно. По мере возрастания трудностей в использовании электромагнитной энергии будет появляться все больше доводов в пользу электростатических систем. Однако водяные пары и дождь оказывают вредное влияние на работу этих систем, вызывая уменьшение заряда снаряда или цели.

6.18. Неконтактные взрыватели, работающие на принципе использования магнитостатического эффекта

Возможность использования магнитостатического эффекта для обнаружения цели достаточно хорошо известна. Этот принцип был использован немцами во время прошлой войны для создания подводных мин. Возмущение магнитного поля земли проходящими кораблями (полупассивный принцип) вызывало срабатывание неконтактного взрывателя, помещенного в mine. Можно использовать и чисто пассивный принцип, т. е. обнаруживать намагниченные тела. Возможно также создание активного взрывателя, создающего свое собственное магнитное поле и срабатывающего при возмущении этого поля посторонними телами. Взрыватели полуактивного типа не имеют широких перспектив, поскольку создание мощных магнитных полей сопряжено с большими трудностями.

Хотя магнитостатический эффект, очевидно, не зависит от состояния погоды, использование его на практике представляет довольно трудную задачу, особенно в случае применения взрывателя полупассивного типа, определяющего возмущение в магнитном поле земли. Могут быть приняты и контрмеры, свидетельством чего является успешное применение «дегауссизации» для борьбы с магнитными минами (система, работающая на этом принципе, ликвидирует возмущения, создаваемые целью, путем выработки равного магнитного поля противоположной полярности).

6.19. Акустические неконтактные взрыватели

Акустические взрыватели применялись для борьбы с подводными лодками; устройство их аналогично устройству радиовзрывателей зенитных снарядов. Однако высокие скорости движения управляемых снарядов и будущих целей вряд ли позволят использовать акустический принцип. Основная трудность создания таких взрывателей связана с тем, что скорость распространения звука меньше ожидаемых скоростей снарядов и целей. По этой причине нельзя использовать акустические взрыватели активного и полуактивного типов. Кроме того, при полете снаряда возникают такие явления, как ударные волны, вредное влияние которых на работу акустических взрывателей трудно устранить. Имеется возможность создания лишь пассивных акустических систем, реагирующих на звук или ударную волну (или на то и другое сразу), создаваемые целью.

6.20. Временные неконтактные взрыватели

Действие временного взрывателя тесно связано с работой системы управления, которая должна определить будущее поло-

жение цели и запустить «часы» с тем, чтобы произвести подрыв боевого заряда в нужный момент. Этот принцип в течение многих лет использовался ствольной артиллерией. Устройство, обнаруживающее цель и вычисляющее полет снаряда до цели, используется также и для включения часового механизма. Часовой механизм затем вызывает детонацию боевого заряда в тот момент, когда по предварительным подсчетам должно произойти максимальное сближение снаряда с целью. Этот метод может быть использован для любого комплекса управляемого снаряда, если заранее известно или вычислено системой управления время полета снаряда до цели.

6.21. Принципы действия прочих неконтактных взрывателей первого типа

Существуют и другие неконтактные взрыватели, использующие такие явления, как ядерные излучения, изменение в распределении космических лучей и даже аномалии в поле земного тяготения. Другими словами, любое явление, помогающее обнаружить присутствие цели на расстоянии, может быть использовано для создания неконтактного взрывателя. Возможность осуществления тех или иных принципов на практике зависит от множества факторов. Например, гравитационные силы едва ли смогут быть использованы в настоящее время для взрывателей активного типа; для этого нужно создавать гравитационные поля с помощью колеблющихся масс, а такая конструкция практически неприменима в управляемых снарядах. Дело в том, что применению этого принципа в снарядах препятствует сравнительно медленная реакция гравиметрических устройств. Так или иначе, применение перечисленных выше принципов требует тщательного предварительного изучения. Даже если будет доказана возможность их использования, электромагнитная энергия, по крайней мере в настоящее время, остается наиболее удобным средством управления взрывом боевых частей.

6.22. Неконтактные барометрические взрыватели

Первостепенное значение для управления взрывом снарядов, предназначенных для поражения наземных целей, имеет определение высоты над целью (или поверхностью земли). Для определения высоты над землей чаще всего измеряется давление воздуха. Если барометрическое давление над целью известно, высота над целью может быть измерена с достаточной точностью путем замера давления, соответствующего выбранной высоте. Кроме простоты устройства, достоинством подобной системы взрывателей является высокая помехоустойчивость.

Недостатки барометрических взрывателей связаны с тем, что для их работы необходимо знать атмосферное давление над целью. Если цель находится на большом расстоянии от пусковой установки и к тому же на территории противника, атмосферное давление над целью не может быть непосредственно измерено, а может только быть предугадано. Чем больше расстояние от стартовой позиции до цели, тем больше возможная ошибка. Однако благодаря достижениям метеорологов в настоящее время стало возможным предсказание давления в любых пунктах, удаленных на большие расстояния от стартовой позиции.

6.23. Принципы действия других неконтактных взрывателей второго типа

Высота над целью может быть определена также путем измерения электростатического и магнитного поля земли, распределения космических лучей или определения положения одного или нескольких слоев ионосферы. В сравнении с измерением высоты по барометрическому давлению эти способы обладают меньшей точностью. Причина состоит в том, что распределение перечисленных факторов не является столь закономерным, как падение давления с высотой. Однако по мере изучения тех или иных явлений могут появиться новые способы определения высоты.

ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА И ТРЕБОВАНИЯ К НИМ

7.1. Введение

В § 1.4 было отмечено, что предохранительное устройство является промежуточным компонентом боевой части, расположенным между боевым зарядом и взрывателем. Далее, в § 5.27 указывалось, что безопасность в обращении с боевой частью обеспечивается не только наличием предохранительного устройства. Боевой заряд должен обладать сравнительно небольшой чувствительностью, чтобы исключить возможность самопроизвольного взрыва в любых предусмотренных заранее условиях. Предохранительное устройство должно обеспечивать подрыв боевого заряда только в желаемый момент. Требование сравнительно небольшой чувствительности боевого заряда означает, что для его детонации необходим мощный начальный импульс.

7.2. Требования к предохранительному устройству

Предохранительное устройство предназначено для соединения взрывателя с боевым зарядом и для передачи последнему выработанного взрывателем импульса. Детонационная цепь между взрывателем и боевым зарядом является замкнутой только в том случае, если предохранительное устройство выключено; при включенном предохранительном устройстве детонационная цепь разомкнута. Следовательно, замыкание детонационной цепи предохранительного устройства будет означать готовность боевой части к действию. Являясь частью системы безопасности всего снаряда, предохранительное устройство должно удовлетворять определенным требованиям. Три вероятности должны быть очень малы, а именно: вероятность самопроизвольного срабатывания части детонационной цепи, соединенной с боевым зарядом; вероятность срабатывания части детонационной цепи, соединенной со взрывателем, с последующим взрывом боевого заряда (если предохранительное устройство включено) и вероятность случайного, непреднамеренного включения предохранительного устройства.

Перечисленные требования вытекают из условий безопасности боевой части. Кроме того, к предохранительному устройству предъявляются дополнительно следующие требования: оно должно выключаться, когда это необходимо, и обеспечивать надежную передачу сигнала для взрыва боевого заряда. При выполнении последних двух требований взрыв боевого заряда будет происходить нормально, т. е. после подачи соответствующего сигнала взрывателем.

7.3. Детонационная цепь

Сигнал, полученный взрывателем от цели, обычно является слишком маломощным для того, чтобы вызвать детонацию низкочувствительного взрывчатого вещества, используемого в боевых зарядах обычного типа. Для того чтобы сигнал имел достаточную мощность, его нужно усилить. Усиление может быть произведено с помощью электрического устройства или взрывчатых веществ, или путем использования и того, и другого. За исключением некоторых контактных взрывателей, которые могут срабатывать под действием механических сил или сил инерции, большинство взрывателей обычно вырабатывает электрические сигналы. Эти сигналы используются для инициирования взрыва, или, точнее, детонации, которая в свою очередь вызывает более мощный взрыв; усиление взрывов продолжается до тех пор, пока детонация последнего элемента не вызовет взрыва боевого заряда.

Было найдено, что наиболее удобным способом выработки электрического сигнала для инициирования взрыва в детонационной цепи является разряд конденсатора. Этот способ позволяет получить значительную энергию в течение весьма короткого промежутка времени. Срабатывание детонационной цепи и взрыв боевого заряда должны произойти чрезвычайно быстро. При относительной скорости в 3000 *фут/сек* снаряд перемещается относительно цели на 3 фута в течение 1 *мсек*. Если необходима точность срабатывания взрывателя порядка нескольких футов, то обнаружение цели взрывателем, взрыв детонаторов и самого боевого заряда должны произойти менее чем за 1 *мсек*. Следовательно, может потребоваться произвести выработку необходимой энергии для детонационной цепи в течение доли миллисекунды.

Элемент, которому передается электрический сигнал от конденсатора, т. е. начальное звено детонационной цепи, обычно называют электродетонатором (рис. 7.1). Электродетонатор представляет собой устройство с небольшим количеством высокочувствительного взрывчатого вещества и помещенным внутри него сопротивлением (мостиком накаливания). При прохожде-

нии тока через мостик накаливания происходит резкое повышение температуры, достаточное для инициирования взрыва электродетонатора. Для того чтобы температура повышалась быстро, несмотря на достаточно низкую теплоемкость и теплопроводность взрывчатого вещества, подача энергии должна производиться за очень короткий промежуток времени, так как в этом случае для взрыва детонатора требуется значительно меньше энергии, чем при подводе низкого напряжения в течение длительного времени. Кроме того, если напряжение слишком

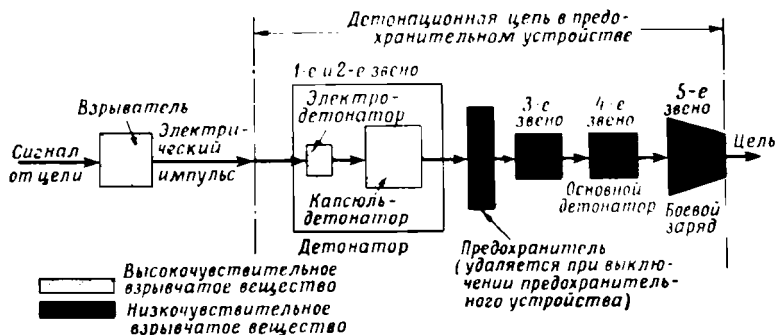


Рис. 7.1. Детонационная цепь в предохранительном устройстве.

мало, то детонатор не сработает вообще. Для сообщения электродетонатору достаточного количества энергии в течение нескольких микросекунд используется разряд конденсатора. Энергия E , получаемая электродетонатором, несколько меньше накопленной конденсатором,

$$E < \frac{1}{2} CV^2, \quad (7.1)$$

где

C — емкость конденсатора;

V — напряжение конденсатора.

Обычно берется избыток энергии для обеспечения надежной детонации.

Рядом с электродетонатором, т. е. первым звеном в детонационной цепи, располагается ее второе звено, представляющее собой некоторое количество взрывчатого вещества, большее, чем в электродетонаторе, но с несколько меньшей чувствительностью. Конструкция этого второго звена должна быть такова, чтобы оно надежно срабатывало после взрыва электродетонатора и выделяло бы еще большее количество энергии. Совокупность электродетонатора и второго звена называют просто детонатором. Если второе звено отделено от электродетонатора и представляет собой самостоятельный элемент детонационной цепи,

то его иногда называют капсюлем-детонатором. Следующее, третье звено детонационной цепи представляет собой еще большее количество взрывчатого вещества, на этот раз обладающего невысокой чувствительностью (такой же, как и боевой заряд). Оно служит для усиления взрывного импульса с целью инициирования взрыва четвертого звена детонационной цепи, так называемого основного детонатора. Основной детонатор представляет собой большое количество низкочувствительного взрывчатого вещества, при взрыве которого выделяется достаточно энергии для подрыва боевого заряда.

Когда предохранительное устройство находится во включенном положении, детонационная цепь прерывается с помощью предохранителя (рис. 7.1). Предохранитель помещается между высоко- и низкочувствительными элементами («звеньями») для предотвращения самопроизвольного срабатывания цепи при включенном («безопасном») положении.

7.4. Предохранитель

При включенном предохранительном устройстве детонационная цепь разорвана; выключение предохранительного устройства состоит в соединении разомкнутых частей цепи в единое целое. Соображения безопасности требуют, чтобы при разомкнутой детонационной цепи взрыв детонатора не передавался боевому заряду. Это обычно обеспечивается помещением в разрыве между двумя звеньями специальной преграды, называемой предохранителем. Обычно предохранитель изготавливается из металла. Для усиления безопасности обращения с боевой частью взрыватель отсоединяется от входа в детонационную цепь, если предохранительное устройство включено.

7.5. Выключение предохранителя

Рассмотрев детонационную цепь между взрывателем и боевым зарядом, перейдем теперь к изучению способов выключения предохранителя, т. е. соединения всех звеньев цепи. Как уже отмечалось выше, выключение предохранительного устройства состоит в удалении предохранителя из детонационной цепи. Кроме того, в функции предохранительного устройства входит определение момента выключения и выработка энергии, необходимой для перемещения предохранителя в нужный момент. Выключение предохранительного устройства должно произойти прежде, чем цель окажется в зоне эффективного действия снаряда, но лишь после того, как снаряд покинет зону, где его разрыв может оказаться опасным для производящих запуск. Совершенно очевидно, что предохранительное устройство не спо-

собно «мыслить»; оно может только выполнять те операции, которые предусмотрены конструктором. Оно может измерять определенные характеристики и параметры и, сравнивая их с величинами, введенными заранее в какие-либо запоминающие устройства, устанавливать момент выключения. Прежде чем изучить порядок выключения более обстоятельно, рассмотрим некоторые другие проблемы, связанные с предохранительным устройством.

7.6. Безопасность в обращении

Обсуждение проблемы безопасности боевых частей (см. § 5.27) велось в предположении, что боевая часть снабжена предохранительным устройством. В большинстве образцов снарядов требуется, чтобы монтаж предохранительного устройства производился в последнюю очередь перед подготовкой снаряда к полету. Однако перед установкой в боевую часть предохранительное устройство должно пройти через руки монтажников или сборщиков. Обычно монтаж детонационной цепи производится на заводе, изготавливающем предохранительные устройства, или в арсенале, немедленно после доставки готовых снарядов. Предохранительное устройство содержит изрядное количество взрывчатых веществ, часть из которых обладает высокой чувствительностью. Если предохранительное устройство выключено (т. е. находится в боевом положении), оно становится очень опасным в обращении; если же при этом производится монтаж предохранительного устройства в боевую часть, то опасность еще более возрастает.

Безопасность в обращении с предохранительным устройством обеспечивается в основном тем, что детонатор помещается в довольно толстую оболочку, способную выдержать действие взрыва при включенном предохранителе. В результате взрыва детонатора может произойти лишь слабое раздутие оболочки. Если предохранительное устройство выключено и имеются причины для взрыва капсюля-детонатора, срабатывание детонационной цепи и взрыв основного детонатора могут причинить много вреда.

Хотя предполагается, что предохранительное устройство не может самопроизвольно выключаться при монтаже, тем не менее оно обычно снабжается различными индикаторами, которые помогают сборщику определить, выключен предохранитель или нет. Это необходимо сделать прежде, чем помещать предохранительное устройство в снаряд. Конструкторы предохранительного устройства обычно стремятся сделать так, чтобы вероятность его самопроизвольного выключения была минимальной: как правило, она не должна превышать 0,0001, а в некоторых случаях — даже 0,000001.

7.7. Конструктивные методы обеспечения малой вероятности самопроизвольного выключения предохранительного устройства

Совершенно очевидно, что для проверки малой вероятности самопроизвольного выключения нельзя произвести испытания сотен тысяч или десятков миллионов предохранительных устройств. Дело не только в фантастической стоимости таких испытаний, но и во времени, которое потребуется для их осуществления. Как же убедиться в безопасности конструкции? Конструкция определенных элементов предохранительного устройства, например детонационной цепи и предохранителя, считается приемлемой частично на базе испытаний, а частично на основе заключения специалистов. Пригодность конструкции предохранительного устройства оценивается на основании многолетнего опыта использования миллионов артиллерийских снарядов, бомб и других видов боеприпасов и пиротехнических устройств. Правда, полученная оценка является не вполне надежной, поскольку условия использования управляемых снарядов несколько иные; тем не менее подобный метод считается правильным. Новичок в этом деле может заявить, что при таком методе невозможно осуществить принципиально новые идеи. Это, конечно, верно, но тем людям, которые применяют оружие, свойствен известный консерватизм. Всякие новшества в предохранительных устройствах внедряются с большими трудностями; как правило, предпочитают устройства, доказавшие свою «безопасность» на практике. Испытания предохранительных устройств проводятся в искусственно созданных и максимально неблагоприятных условиях. Для того чтобы выдержать такие испытания и придирчивую проверку со стороны экспертов, предохранительные устройства должны иметь большой коэффициент безопасности.

Использование устройств, проверенных долголетним опытом, возможно только для создания детонационной цепи; для конструирования же механизма выключения предохранителя этот метод не годится. Дело в том, что работа этого механизма зависит от ряда внешних факторов, а условия применения управляемых снарядов существенно отличаются от тех условий, которые существовали в практике использования старых образцов вооружения. Тем не менее механизмы выключения предохранителей должны обеспечивать достаточную безопасность в работе. Проблема обеспечения надежности решается путем «дублирования».

7.8. Дублирование в предохранительных устройствах

За последние несколько лет роль «дублирования» как средства повышения надежности значительно возросла. В настоящей серии книг этот термин употребляется для обозначения исполь-

зования независимых механизмов, выполняющих одну и ту же функцию и соединенных вместе таким образом, чтобы обеспечить большую вероятность совершения какой-либо операции, чем в случае использования какого-нибудь одного механизма.

Из элементарной теории вероятностей известно, что вероятность одновременного совершения нескольких независимых событий равна произведению вероятностей отдельных событий. Предположим, что имеется n независимых механизмов, каждый из которых предназначен для выключения предохранительного устройства в требуемый момент. Предположим, что вероятность преждевременного срабатывания любого из этих механизмов равна p ($m = 1, 2, 3, 4, \dots, n$); тогда вероятность того, что все механизмы преждевременно выключат предохранительное устройство, будет равна произведению отдельных вероятностей:

$$P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot \dots \cdot P_n. \quad (7.2)$$

Допустим, что изготовлены три независимых друг от друга механизма выключения предохранительного устройства и установлено, что вероятность *преждевременного выключения* предохранителя любым из механизмов меньше 0,01; тогда вероятность того, что все три механизма сразу преждевременно выключат предохранительное устройство, будет меньше 0,000001. Обеспечение вероятности порядка 0,01 вполне осуществимо и может быть проверено путем проведения приемлемого числа испытаний.

Однако система дублирования еще не решает всех проблем, связанных с надежностью работы предохранительного устройства. Для обеспечения требуемой степени безопасности механизмы выключения предохранительного устройства должны располагаться таким образом, чтобы соединение взрывателя с боевым зарядом произошло только после срабатывания всех этих механизмов. К несчастью, для каждого такого механизма существует определенная вероятность отказа. Таким образом, вероятность соединения взрывателя с боевым зарядом в необходимый момент есть вероятность того, что все механизмы выключения предохранителей сработают, и может быть подсчитана как произведение вероятностей срабатывания отдельных механизмов. Если используются три механизма и каждый из них имеет вероятность срабатывания в нужный момент равную 0,95, то полная вероятность выключения предохранительного устройства (когда это будет необходимо) составляет только 0,857. Для обеспечения полной вероятности выключения предохранительного устройства, равной 0,99, необходимо, чтобы каждый из трех механизмов имел вероятность срабатывания, приблизительно равную 0,997. В такой высокой степени надежности очень трудно убедиться. Рассмотрим одновременно проблемы безопас-

ности и надежности работы. Допустим, что каждый механизм имеет вероятность преждевременного срабатывания 0,01 и надежность (вероятность срабатывания в нужный момент) — 0,99. Для проверки обеих величин требуется одинаковое число испытаний. Вероятность преждевременного срабатывания трех механизмов одновременно будет равна 0,000001, а надежность — 0,97. Для повышения надежности без увеличения вероятностей срабатывания отдельных механизмов необходимо усложнять предохранительное устройство. Например, можно использовать две группы по три механизма и соединить их между собой таким образом, чтобы выключение предохранителя происходило при срабатывании хотя бы одной группы. Тогда вероятность преждевременного выключения предохранителя будет приблизительно равна 0,000002, а надежность повысится до 0,991. Таким образом, предохранительное устройство, состоящее из шести независимых друг от друга механизмов выключения предохранителя, имеющих вероятности нарушения безопасности и нарушения надежности работы порядка 0,01, может представлять собой систему, имеющую полную вероятность нарушения безопасности 0,000002 и надежность 99%. Подробный расчет этих характеристик может быть произведен по формулам, помещенным в главе 8 настоящего раздела.

Во всем этом есть, однако, один спорный момент. Как обеспечить *статистическую независимость действия нескольких механизмов в данных конкретных условиях*? Когда говорят, что два устройства являются статистически независимыми, это означает, что они не будут реагировать одинаковым образом на один и тот же импульс. Как применить это определение к рассматриваемой проблеме обеспечения безопасности и надежности действия управляемого снаряда? Может ли конструктор быть уверен в том, что, выражаясь языком теории вероятностей, какое-то особое событие в снаряде не вызовет одновременного выхода из строя всех механизмов? Если такой уверенности нет, то применение дублирования не имеет никакого смысла. Теорема о том, что вероятность одновременного совершения двух событий равна произведению вероятностей каждого из них, справедлива только при условии, что одна и та же причина не может одновременно вызвать совершение обоих событий. *Если все механизмы срабатывают при одних и тех же условиях, то нельзя с достоверностью утверждать, что они действуют независимо друг от друга.* Как же поступает конструктор? Он старается использовать механизмы, отличающиеся принципом действия, конструкцией и местоположением в снаряде. Таким путем можно обеспечить независимость действия различных механизмов, однако и здесь следует иметь в виду, что использование одинаковых механизмов, помещенных рядом, не дает требуемой ста-

тистической независимости их друг от друга. Попробуем теперь найти комбинации механизмов, основанных на различных принципах, которые обеспечат необходимую надежность и безопасность в работе.

7.9. Возможные схемы механизмов выключения предохранительного устройства

Предохранительное устройство может срабатывать в результате измерения каких-либо параметров и последующего выполнения заранее предусмотренных операций. Рассмотрим вначале условия полета снаряда и те параметры, которые могут измеряться предохранительным устройством. Предохранительное устройство подвергается воздействию инерционной нагрузки, а также воздействию колебаний, ускорения, изменяющегося давления и изменяющейся температуры окружающей среды и т. п. С помощью специальных датчиков может производиться измерение скоростного напора, температуры поверхности снаряда, наружного статического давления воздуха, интенсивности космических лучей и т. д. Для своевременного выключения предохранительного устройства необходимо измерять те параметры, которые позволяют определить положение снаряда по отношению к стартовой позиции и обслуживающему персоналу. Таким образом, необходимо рассмотреть описанные выше параметры с точки зрения возможности их измерения и определения с их помощью местоположения снаряда относительно пусковой установки.

Инерционные нагрузки, особенно кратковременные, не позволяют однозначно определить положение снаряда относительно пусковой установки и не могут быть использованы для определения момента выключения предохранительного устройства. Если уронить предохранительный механизм, то можно довольно легко создать нагрузку в 500 *g*. Весьма вероятно, что такие же нагрузки будут возникать во время полета снаряда, особенно если запуск осуществляется с помощью стартового ускорителя. Хотя конструкция приборов может предусматривать защиту от инерционных нагрузок (предельно допустимой величиной считается нагрузка в 500 *g*, действующая в течение 10 *мсек*), эти нагрузки не используются для определения момента выключения предохранительного устройства. (Напомним читателям, что ускорение в 1 *g* равно 32,2 *фут/сек²*; 500 *g* равны 16 100 *фут/сек²*, а в результате действия ускорения величиной 500 *g* в течение 10 *мсек* будет достигнута скорость в 161 *фут/сек* и пройдено расстояние в 0,8 фута. Другими словами, нагрузка, перемещающая устройство по инерции на 0,8 фута в течение 10 *мсек*, составляет 500 *g*.)

Колебания, которые обычно определяются амплитудой ускорения простого гармонического движения, могут быть использованы для указания на то, что снаряд находится в полете. Диапазон частот и уровень ускорений, создающихся в снаряде во время полета, однозначно определяют положение снаряда относительно стартовой позиции. Частоты колебаний во время полета могут доходить до ультразвуковых, а максимальные ускорения составляют сотни g . Тем не менее, несмотря на однозначность определения местоположения снаряда, колебания редко используются для приведения в действие механизма выключения предохранителя. Однако измерение колебаний может быть использовано как дополнительное средство для подтверждения того, что снаряд действительно находится в полете.

Ускорение само по себе не может однозначно определить положение снаряда. Во время полета на снаряд действуют большие ускорения, как продольное (осевое), так и поперечное. Но довольно большие ускорения могут создаваться, например, и при перевозке и перегрузке снаряда, а также при транспортировке снаряда самолетом-носителем. Гораздо большее значение, чем само ускорение, имеют его первый и двойной интегралы, т. е. скорость и пройденный путь. Скорость, достигнутая снарядом, однозначно указывает на его положение; ни при каких комбинациях различных условий обращения со снарядом на стартовой позиции не может быть создана такая же скорость, как во время полета. Путь, пройденный управляемым снарядом, если полет происходит в желаемом направлении, является основным параметром, определяющим момент выключения предохранительного устройства. Пройденное расстояние однозначно определяет положение снаряда в пространстве по отношению к цели и стартовой позиции. Таким образом, необходимо измерять одновременно и скорость, и пройденный путь. Измерять только пройденное расстояние было бы недостаточно, так как это расстояние могло бы пройдено при перемещении предохранительного устройства с небольшими скоростями до установки его в снаряд. Комбинация высокой скорости полета и пройденного пути представляет надежный критерий для определения момента выключения предохранительного устройства.

Другим параметром, который может быть использован, является давление окружающей среды. Хотя величина давления еще мало о чем говорит, изменение давления во время полета снаряда может служить хорошим указателем положения снаряда. Например, часть траектории полета баллистического снаряда лежит за пределами атмосферы. Следовательно, для определения момента выключения предохранительного устройства можно использовать (наряду с другими) то обстоятельство, что давление окружающей среды во время полета снаряда

должно изменяться от единицы до малых долей атмосферы и затем вновь до одной атмосферы.

Скоростной напор также может быть использован в качестве параметра, который в комбинации с другими может определить положение снаряда. На величину скоростного напора оказывает влияние скорость полета снаряда.

Температура на поверхности снаряда, летящего с очень большой скоростью, сама по себе не может указывать на то, что снаряд находится в полете. Высокая температура может возникнуть на поверхности снаряда и во время пожара на земле. Однако вместе с другими параметрами температура поверхности снаряда может использоваться для измерения скорости полета и пройденного пути.

Наружное статическое давление и интенсивность космических лучей могут использоваться в баллистических снарядах не только для функционирования взрывателей (как указывалось в предыдущей главе); но и для срабатывания механизма выключения предохранительного устройства. При этом важно соблюдать определенную последовательность в измерении параметров, так как, например, одно и то же давление может существовать в двух точках траектории снаряда, — на восходящей и на нисходящей ветвях траектории.

Предохранительные устройства могут также выполнять команды, полученные от системы управления или от взрывателя; командой может являться и отделение снаряда от пусковой установки. Может быть заранее предусмотрено, что предохранительное устройство измеряет определенный промежуток времени после начала полета или же выжидает момент выключения реактивного двигателя, а затем через некоторое время выключает предохранитель, если не нарушены какие-либо дополнительные условия. Более того, даже после выключения предохранителя и замыкания детонационной цепи система управления может до некоторого момента разъединять взрыватель с предохранительным устройством. Это дополнительное предохранение не имеет никакого отношения к безопасности обращения со снарядом до пуска; цель его состоит в том, чтобы защитить боевую часть от действия радиопомех или же предотвратить взрыв боевого заряда при промахе.

7.10. Первичные и вторичные предохранительные механизмы

В предыдущем параграфе было сказано о том, что возможно создание предохранительного устройства с двумя ступенями предохранения: первичное предохранение обеспечивает только безопасность в обращении со снарядом; вторичный предохранительный механизм может быть использован в качестве допол-

нительного устройства, не имеющего отношения к обеспечению безопасности.

Действие первичных предохранительных механизмов обычно основано: на измерении ускорения или интегрировании ускорения по времени; на интегрировании скорости для определения пройденного пути; на измерении промежутков времени; на фиксации заметных изменений в величине тяги; на определении момента отрыва снаряда от пусковой установки. Действие вторичных предохранительных механизмов может быть основано на измерении скоростного напора и статического давления воздуха, на использовании данных системы управления, на измерении температуры поверхности снаряда и т. п.

7.11. Основные принципы обеспечения безопасности

Степень безопасности обращения со снарядом зависит от принципа устройства первичного предохранительного механизма. Можно сконструировать первичный предохранительный механизм, использующий энергию, аккумулированную заранее, до пуска снаряда. Но такой механизм обычно считают ненадежным: при неудачном пуске снаряда может произойти выключение предохранительного устройства и к снаряду будет опасно подходить. Снаряд будет максимально безопасен в обращении лишь при том условии, что энергия, необходимая для выключения предохранительного устройства, будет возникать только во время полета снаряда; поэтому наилучшим считается такое устройство, которое использует ускорение, создающееся при работе реактивного двигателя. В этом случае преждевременное выключение предохранителя не может произойти в непосредственной близости от пусковой установки или в районе подготовки снаряда к пуску.

Далее, конструкция первичного предохранительного механизма должна быть такой, чтобы по возможности отсутствовало непосредственное соединение между измерительным элементом и исполнительным органом. Это позволяет конструктору полностью изолировать предохранительное устройство и тем самым предотвратить его преждевременное срабатывание из-за неправильного соединения или других причин. В этом отношении очень удобным параметром является ускорение. Для его измерения нет необходимости соединять с предохранительным устройством какие-либо датчики. Предохранительное устройство с заключенным внутри него акселерометром может определять параметры полета снаряда просто по инерционным силам, действующим на корпус предохранительного механизма. Устройство и принципы действия акселерометров заслуживают специального рассмотрения.

7.12. Основы использования ускорения в предохранительных устройствах

Вектор пути, пройденного снарядом от пусковой установки, может быть определен в результате двойного интегрирования ускорения в прямоугольной пространственной системе координат; точность этого определения зависит от уровня развития техники. Приборы такой системы должны, конечно, быть установлены на стабилизированной платформе; в принципе они будут сходны с приборами инерциальной системы наведения. Сравнивая вектор пути, пройденного снарядом, с заранее рассчитанной критической величиной, механизм производит выключение предохранителя в тот момент, когда снаряд находится уже на безопасном расстоянии от пусковой установки.

Однако такое устройство даже при меньшей точности работы, чем в системах управления полетом снаряда, является чрезвычайно сложным и, кроме того, не обеспечивает дублирования. Вообще говоря, подобные предохранительные устройства неприемлемы на практике, за исключением особых случаев. Обычно достаточно измерять и интегрировать осевую составляющую ускорения. С помощью осевого ускорения можно определить осевую скорость снаряда по отношению к пусковой установке, измерить расстояние, пройденное снарядом от пусковой установки и сжать пружины или завести часовой механизм с целью накопления энергии для последующего выключения предохранительного устройства.

7.13. Основные уравнения движения снаряда

Предположим, что пусковая установка движется и в момент пуска имеет составляющую скорости вдоль оси снаряда, равную v_0 . Предположим, что отсчет времени ведется от момента пуска и осевое ускорение измеряется также от этого момента. В момент времени t осевая составляющая скорости снаряда $v(t)$ будет

$$v(t) = v_0 + \int_0^t a(t) dt, \quad (7.3)$$

где $a(t)$ — ускорение в функции времени, т. е.

$$a(t) = \frac{dv(t)}{dt}. \quad (7.4)$$

Путь, пройденный снарядом, равен

$$s(t) = v_0 t + \int_0^t \int_0^t a(t) dt dt. \quad (7.5)$$

Тем временем, если пусковая установка не изменила своей первоначальной скорости, она прошла расстояние $v_0 t$ в направлении, определяемом первоначальным положением оси снаряда. Если снаряд после отрыва от пусковой установки движется прямолинейно, то его скорость по отношению к пусковой установке равна

$$v_i(t) = \int_0^t a(t) dt, \quad (7.6)$$

а расстояние от пусковой установки равно

$$s_i(t) = \int_0^t \int_0^t a(t) dt dt. \quad (7.7)$$

Величины $v_i(t)$ и $s_i(t)$ называются соответственно *приращением скорости и приращением расстояния*. Они определяют скорость и расстояние снаряда по отношению к пусковой установке и, следовательно, обслуживающему персоналу; их важно знать для определения момента выключения предохранительного устройства. Необходимо отметить, что все сказанное выше справедливо даже в тех случаях, когда пусковая установка движется (например, вместе с самолетом или кораблем). Если траектория полета снаряда представляет собой практически прямую линию, измерение приращений осевой скорости и расстояния позволяет определить момент, когда снаряд удалится на безопасное расстояние от пусковой установки. В том случае, если траектория полета снаряда не является прямолинейной, на систему управления может быть возложена дополнительная функция: задерживать выключение предохранительного устройства при криволинейной траектории или при неисправности управления.

7.14. Измерение приращений скорости и расстояния

К счастью для конструкторов боевых частей, приращения скорости и расстояния представляют собой инерциальные количества и могут быть измерены внутри снаряда. Какой смысл вкладывается в термин «инерциальные»? Имеется в виду, что эти величины могут быть вычислены только в результате измерения действительного ускорения снаряда. Измерение ускорения может производиться с помощью инерциальных приборов или «акселерометров». Один из видов инерциальных приборов для измерения осевого ускорения снаряда представляет собой тело, способное двигаться только вдоль оси снаряда и, как предполагается, без трения. Движению такого инерционного

тела может препятствовать пружина или какой-либо другой механизм. Если перемещение тела по отношению к снаряду невелико, то оно движется, куда бы ни летел снаряд, причем с той же скоростью, что и сам снаряд. Поэтому оно имеет то же ускорение, что и снаряд. Для того чтобы тело имело ускорение, на него должна действовать сила. Эта сила, создаваемая пружиной или каким-либо другим механизмом, должна быть такой, чтобы сообщать телу ускорение, соответствующее ускорению снаряда. Таким образом, если масса инерционного тела равна m , действующая на него сила будет равна

$$F(t) = ma(t), \quad (7.8)$$

где $a(t)$ — ускорение снаряда.

Поскольку эта сила равна силе, действующей со стороны тела на пружину, то инерционное тело давит на пружину (после перемещения) с силой, пропорциональной ускорению снаряда. Произведем расчет этой силы в английской системе единиц. Если вес тела равен w фунтов, то масса его составляет $\frac{w}{g}$, где g — ускорение силы тяжести в фут/сек^2 . Таким образом, сила в (фунтах) будет равна

$$F(t) = \frac{wa(t)}{g}. \quad (7.9)$$

Отношение $a(t)/g$ можно рассматривать как ускорение снаряда, выраженное в g -единицах. Сила, действующая на пружину (в фунтах), равна произведению веса инерционного тела (в фунтах) на ускорение в g -единицах. Если какой-либо прибор производит интегрирование этой силы за время ее приложения, то в результате получится

$$\int_0^t F(t) dt = \frac{w}{g} \int_0^t a(t) dt, \quad (7.10)$$

$$\int_0^t F(t) dt = \frac{w}{g} v_i(t). \quad (7.11)$$

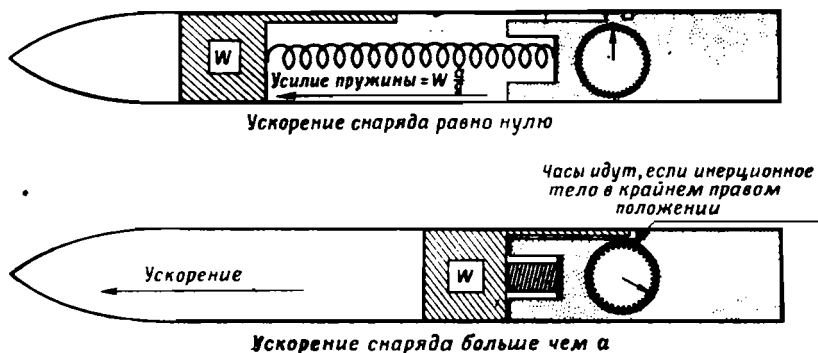
Другими словами, интегрируемая величина прямо пропорциональна приращению осевой скорости снаряда. Аналогично, двойное интегрирование силы дает величину, прямо пропорциональную приращению пройденного пути.

Приведенная выше формула является весьма точной. Однако в некоторых случаях удовлетворительные результаты дает применение и приближенного метода, называемого псевдоинтегрированием. Сущность этого метода заключается в следующем. Предположим, что ускорение, создаваемое реактивным двигателем,

постоянно по величине и действует в течение большего промежутка времени, чем период измерения приращения скорости. Если ускорение, равное a , действует в течение времени t , то приращение скорости составит

$$v_i = at. \quad (7.12)$$

Это уравнение просто констатирует тот факт, что ускорение имеет величину a и действует в течение промежутка времени t . Метод псевдоинтегрирования позволяет определить приращение скорости без интегрирования ускорения. Допустим, что на инерционное тело действует пружина с силой wa/g (рис. 7.2). Тело сможет перемещаться и сжимать пружину только в том случае,



Р и с. 7.2. Принцип псевдоинтегрирования.

когда ускорение несколько превысит величину a . При перемещении тела вправо включаются часы, а при возвращении его в первоначальное положение часы останавливаются. Возвращение инерционного тела будет происходить при падении ускорения ниже a . Когда часы отсчитывают время t , можно будет утверждать, что ускорение, превышающее величину a , действовало по крайней мере t сек. Это означает, что приращение скорости составило по крайней мере at фут/сек. Приращение скорости могло быть и больше, но оно не могло быть меньше этого значения, если часы отметили промежуток времени в t сек. Такой способ определения приращения скорости часто считается удовлетворительным и используется в простейших предохранительных устройствах. В данном случае, если достигнуто приращение скорости at , то приращение пути составляет по крайней мере $at^2/2$.

Для того чтобы не усложнять исследование вопроса, до сих пор действие силы тяжести не учитывалось. Рассмотрим теперь влияние осевой составляющей силы тяжести. На инерционное тело постоянно действует сила тяжести и, если она имеет

составляющую вдоль оси снаряда, тело будет перемещаться. Это движение тела будет вызывать сжатие или растяжение пружины в зависимости от взаимного расположения их внутри снаряда. Рассмотрим снаряд баллистического типа, стоящий вертикально на пусковом столе. Предохранительное устройство включает инерциальную систему, имеющую тело, способное двигаться вдоль оси снаряда. Пружина толкает тело вверх. Когда снаряд стоит на месте, на пружину действует сила тяжести, равная w фунтов. Если не принять никаких специальных мер, то система не сможет отличить описанное выше состояние от случая горизонтального полета снаряда с ускорением, равным $1g$. Таков недостаток инерциальных систем: они не могут отличить ускорение движущегося тела от ускорения силы тяжести. Таким образом, если не исключить влияния силы тяжести, акселерометр будет давать неправильные показания. Для снарядов, запускаемых почти горизонтально с большими ускорениями, это не имеет особого значения, поскольку большой точности работы не требуется. Но для снарядов, стартующих вертикально с ускорениями порядка $1g$, задача учета силы тяжести является весьма серьезной, поскольку ошибки могут быть очень большими.

Существует несколько способов интегрирования силы, действующей на пружину. Среди многочисленных конструкций интеграторов можно выделить устройства, содержащие инерционное колесо или вращающийся диск. Инерционное колесо представляет собой обычное вращающееся колесо, приводимое в движение тяжелым телом посредством зубчатой передачи. Если пренебречь трением, то можно показать, что угловая скорость вращения колеса пропорциональна приращению скорости полета, а полный угол поворота колеса пропорционален приращению пути. Вращающиеся диски широко применяются в обычных электрических ваттметрах. Под действием указанной выше силы диск, изготовленный из алюминия или какого-нибудь другого подходящего материала, вращается между полюсами магнита. Угловая скорость вращения диска пропорциональна действующей силе или ускорению снаряда, а полный угол поворота пропорционален скорости. Можно также применить электрические методы интегрирования и использовать силу, действующую на пружину, для изменения параметров интегрирующей схемы.

7.15. Возможные случаи применения псевдоинтегрирования

Решение вопроса о том, когда целесообразнее использовать интегрирование ускорения и когда псевдоинтегрирование, зависит от конкретных характеристик реактивного двигателя и

особенностей пусковой установки. Тяга и ускорение, создаваемые пороховыми реактивными двигателями и стартовыми ускорителями, не постоянны по величине и зависят от первоначальной температуры пороха: чем выше температура, тем больше тяга. Тяга может увеличиваться в 2—3 раза. Соответственно и ускорение будет меняться в широких пределах. Поскольку в двигатель помещается совершенно определенное количество топлива, содержащего определенный запас энергии, скорость снаряда в конце работы двигателя всегда будет примерно постоянной (это справедливо при постоянном лобовом сопротивлении и при полном выгорании топлива). Интегратор может измерять скорость в конце работы двигателя независимо от величины ускорения. Псевдоинтегратор может измерять только минимальное ожидаемое ускорение, соответствующее наименьшему времени работы двигателя. Если ускорение увеличится в 3 раза, а время горения топлива уменьшится в 3 раза, то приращение скорости, измеренное псевдоинтегратором, будет составлять лишь одну треть истинной величины. Такая низкая скорость может оказаться в пределах скоростей, измеряемых прибором при действии на снаряд ускорений самолета-носителя во время его катапультирования и в ряде других случаев. При таких условиях скорость, определенная псевдоинтегратором, не является надежным свидетельством самостоятельного полета снаряда. В то же время приращение скорости, измеренное интегратором, однозначно характеризует условия полета снаряда даже при описанных выше обстоятельствах. По этим причинам действительное интегрирование является более предпочтительным. Если же используется жидкостный реактивный двигатель, создающий при нормальной работе почти постоянное ускорение, то лучше использовать метод псевдоинтегрирования.

7.16. Примерная схема предохранительного устройства

Для того чтобы познакомить читателя с конструкцией предохранительного механизма, рассмотрим принцип устройства системы, примененной в гипотетическом снаряде класса «воздух — воздух». Предполагается, что этот снаряд снабжен пороховым реактивным двигателем, который создает ускорение порядка Xg в течение Y сек. при максимально допустимой температуре окружающей среды и ускорение $X/2g$ в течение $2Y$ сек. при минимально допустимой температуре окружающей среды. В любом случае приращение скорости, достигнутое к концу работы двигателя, составляет $32 XY$ фут/сек (так как $g = 32$ фут/сек²). В момент окончания горения топлива ускорение падает от положительного значения, создававшегося двигателем, до отрицательного, вызванного лобовым сопротивлением. Предположим,

что предохранительное устройство должно быть выключено через T сек. после отделения снаряда от пусковой установки.

Для того чтобы обеспечить производство независимых операций, предохранительное устройство содержит (см. рис. 7.3): часы для отсчета промежутка времени в T сек., интегрирующий акселерометр для измерения приращения скорости и пусковой контакт, включающий все механизмы перед пуском снаряда после получения соответствующего сигнала. Предохранитель размыкает детонационную цепь до тех пор, пока не будет закончена проверка всех устройств. Для усиления безопасности

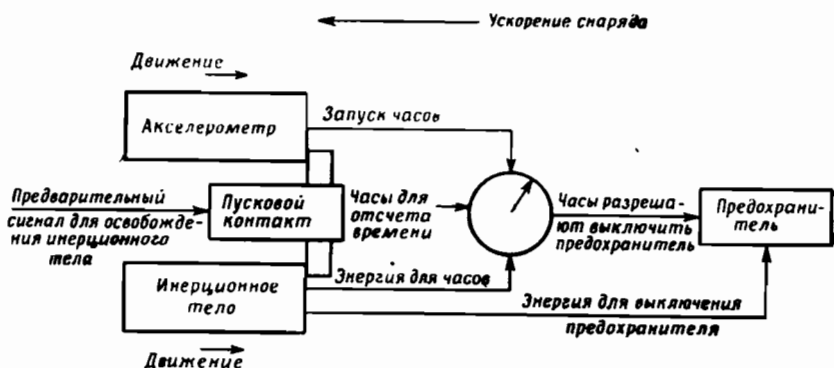


Рис. 7.3. Блок-схема предохранительного устройства.

системы введены дополнительные блокировки. Отдельное инерционное тело является частью механизма, предназначенного для выработки энергии в результате использования ускорения снаряда. Эта энергия применяется для выключения предохранителя и для приведения в действие часового механизма. Механизм, вырабатывающий энергию, устроен так, что инерционное тело приводится в движение только при ускорении, превышающем $X/3 g$. Часовой механизм имеет такое устройство, что при отсутствии непрерывного подвода энергии часы начинают отсчет времени сначала каждый раз, когда их «заводят». Устройство акселерометра таково, что он не прекратит своей работы до тех пор, пока приращение скорости снаряда не достигнет величины порядка 30 ХУ фут/сек и пока не произойдет ожидаемое падение ускорения в момент окончания работы двигателя. Больше того, акселерометр может быть устроен так, чтобы при достижении снарядом скорости 30 ХУ фут/сек прекращалось движение инерционного тела. Это необходимо для того, чтобы иметь некоторый запас энергии, накопленный инерционным телом за период времени между окончанием работы

двигателя и до истечения T сек. Другими словами, падение ускорения должно вызвать возврат инерционного тела в исходное положение и обеспечить выключение часов.

Итак, устройство всей системы таково, что, прежде чем произойдет выключение предохранительного устройства, должен совершиться ряд операций, а именно: должен замкнуться пусковой контакт; акселерометр должен определить момент достижения снарядом приращения скорости в 30 ХУ фут/сек и момент прекращения работы двигателя; до того как эта скорость будет достигнута, ускорение снаряда не должно снижаться ниже $X/3 \text{ g}$; часы должны без остановок отсчитывать промежуток времени в T сек. Все предохранительное устройство должно размещаться в очень малом объеме порядка нескольких кубических дюймов и самым тщательным образом испытываться. Вероятность правильного функционирования механизмов во время полета должна быть выше 0,99. Следует отметить, что для выключения предохранителя и работы часов нужна энергия, для накопления которой ускорение величиной по крайней мере $X/3 \text{ g}$ должно действовать в течение периода времени, достаточного для достижения приращения скорости в 30 ХУ фут/сек . При нарушении любого из перечисленных условий выключения предохранителя не произойдет. Выключению предохранителя препятствуют пусковой контакт, акселерометр и часовой механизм. При таком предохранительном устройстве снаряд вполне безопасен в обращении. Преждевременное замыкание детонационной цепи произойдет лишь в том случае, если все три перечисленных выше элемента преждевременно сработают и, кроме того, будет иметься запас энергии для выключения предохранителя. Если же запас энергии отсутствует, то выключение предохранителя будет весьма маловероятным событием.

7.17. Вопросы производства предохранительных устройств

В данном параграфе не будут подробно рассматриваться вопросы производства предохранительных устройств, они будут затронуты нами в общем виде в главе 8. Здесь лишь следует подчеркнуть, что благодаря той особой роли, какую играют предохранительные устройства в обеспечении безопасности обращения со снарядом, они подвергаются специальным испытаниям. Испытания проводятся при разомкнутой детонационной цепи для проверки безопасности обращения. Цель подобных испытаний — убедиться в том, что выключение предохранителя не будет происходить под действием каких-то внешних сил. Для этого предохранительные устройства подвергаются воздействию самых различных нагрузок; условия полета имитируются с помощью центрифуги. Качество работы проверяется

путем многократного выключения и включения предохранителя. К детонационным цепям присоединяются небольшие порции взрывчатого вещества, для того чтобы убедиться в надежности подрыва боевого заряда. Прежде чем рискнуть использовать предохранительные устройства в снаряженной боевой части, проводятся многочисленные летные испытания для проверки характеристик предохранительных механизмов. Даже после успешного применения их в боевых частях некоторое время все операции с предохранительными устройствами производит специально тренированный персонал с целью накопления опытных данных для подтверждения сложившегося мнения о надежности работы этого механизма. Только после всех этих предосторожностей предохранительное устройство принимается на вооружение. Обычно никогда не удается удостовериться в абсолютной безопасности устройства, поскольку на практике число испытаний, проводимых с управляемыми снарядами, не бывает достаточно велико. Однако с течением времени безотказная работа устройства убеждает в его надежности, и тогда оно становится полноправным членом семьи проверенных и надежно работающих предохранительных механизмов.

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА СИСТЕМ ПРИМЕНительно К БОЕВЫМ ЧАСТЯМ

8.1. Введение

Прежде чем рассматривать организацию производства систем¹ применительно к проектированию боевых частей (которая в известном смысле является не чем иным, как частью организации производства систем управляемых снарядов), необходимо остановиться на том, что же такое организация производства систем. По существу о производстве систем можно говорить с тех далеких времен, когда человек впервые стал использовать технологию, не ограничивающуюся применением одного инструмента в руках одного мастера. Как только человек перешел от изготовления простейших изделий к созданию механизмов, работа которых была основана на взаимодействии нескольких элементов, т. е. к созданию систем, он стал заниматься организацией производства систем. Читатель может возразить, что термин «организация производства систем» появился сравнительно недавно и получил распространение лишь за последние годы. Это верно, но отсюда не следует, что организация производства систем является чем-то новым — мы просто осмыслили этот процесс и дали ему название. Толчком к такому осмыслению явилось бурное развитие техники и расширение круга задач, которые необходимо решать. Пока механизмы были несложными и один человек мог досконально знать их устройство и освоить их изготовление и пока их работа не была тесно связана с работой других механизмов, дело обстояло довольно просто. Однако в настоящее время ни один человек не может знать во всех деталях современные сложнейшие системы оружия. Во всяком случае, одному человеку не хватит часов в сутках для того,

¹ Термин «организация производства систем» (Systems engineering) является, как можно видеть из приводимого ниже определения, весьма расплывчатым и мало чем отличающимся от общепринятого термина «организация производства» (Industrial engineering), поскольку понятие самой «системы» как механизма, работа которого основана на взаимодействии нескольких составных частей, очень неопределенно. Однако учитывая, что авторы данной серии книг широко пользуются этим термином, и в советской научной литературе пока нет для него подходящего эквивалента, редакция сочла возможным принять указанный русский перевод («организация производства систем») для американского Systems engineering. — *Прим. ред.*

чтобы руководить всеми работами по разработке проекта, испытаниям и производству.

Сущность организации производства систем состоит в том, что современные изделия являются очень сложными по устройству и требуют тесного и отлично налаженного взаимодействия многочисленных звеньев для достижения желаемого результата. Для разработки проекта и изготовления образца требуются усилия многих талантливых людей, действующих сообща, как единое целое. Один изобретатель не может больше разработать проект всей системы. Александр Белл мог изобрести телефон, но современная автоматическая телефонная станция является яркой демонстрацией сложной системы, созданной в результате совместных усилий многих людей. Отдельные части системы взаимодействуют друг с другом не сами собой, а в результате того, что люди правильно спроектировали и изготовили их. По мере того как все большее число людей участвует в производстве, усиливается необходимость координации их действий. По сути дела необходимость создания управляемых снарядов объясняется неспособностью людей осуществить такую организацию производства в мировом масштабе, которая обеспечила бы благосостояние всех обитателей нашей планеты. Однако эта проблема еще весьма и весьма далека от своего разрешения; она требует решения таких задач, как использование людей для разработки и создания такой системы, которая бы гармонично объединяла многие народы с их различными характерами, желаниями и нуждами. В настоящее время проще совершенствовать комплекс управляемого снаряда, чем социальную систему. Для разработки управляемых снарядов достаточно сформировать группу людей, имеющую задачей создание комплекса неодушевленных элементов и возглавляемую несколькими руководителями. Расстановка научных сил производится с таким расчетом, чтобы конструктора снаряда не тревожили задачи, которыми должен заниматься специалист по социальным проблемам. Однако конструктор будет абсолютно свободен от необходимости учета социальных факторов только при полной автоматизации оружия.

Таким образом, организация производства систем заключается в том, чтобы организовать использование рабочей силы, оборудования и материалов с целью производства действующего агрегата, который с максимальной эффективностью использовал бы свои составные элементы, а также с целью добиться того, чтобы изделие действовало надлежащим образом и полностью соответствовало всем остальным частям создаваемой системы. Если рассматривать всю национальную военную программу как организацию производства в гигантском масштабе, то проблема создания конкретного снаряда затрагивает не один, а несколько

компонентов этой обширнейшей системы. Производство управляемых снарядов вообще не планируется в масштабе страны, устанавливается лишь общее направление их развития. Надо сказать, что производство снаряда состоит из ряда отдельных производств, изготавливающих систему управления, боевые части, двигатели и т. п. Задачи таким отдельным отраслевым производствам ставит группа, занимающаяся организацией производства всего снаряда. Эта же группа обеспечивает взаимодействие специальных групп, работающих над совершенствованием отдельных частей снаряда, а также увязывает комплекс оружия с национальной военной программой. Можно считать, что организация производства систем идет по линии дробления производственных задач на все более и более мелкие, пока, наконец, они не становятся такими, что их вполне может выполнить один человек.

8.2. Организация производства систем

Организация производства систем охватывает две основные сферы деятельности, которые обычно считаются относительно независимыми друг от друга, — сферу технической координации и сферу административного руководства. Техническая сторона организации производства систем касается вопроса объединения различных частей и агрегатов в едином комплексе оружия. Иначе говоря, задача технической координации состоит в том, чтобы обеспечить соответствие каждой составной части остальным элементам снарядного комплекса по характеристикам и конфигурации. Вопросы административного руководства касаются расстановки людей, обеспечения материалами, составления отчетности и т. п. Цель его состоит в такой организации работ на различных этапах проектирования и производства системы оружия, чтобы создание всех элементов осуществлялось одновременно по намеченному плану и чтобы не происходило задержек в выполнении программы из-за того, что разработка какой-либо части снаряда не была начата своевременно или велась недостаточно быстрыми темпами. Следует также непрерывно следить за ходом выполнения программы с целью определить, продолжают ли еще оставаться в силе ранее принятые решения и сроки или же в программу следует внести соответствующие коррективы.

8.3. Специфические административные проблемы организации производства систем в области боевых частей

В главе 3 настоящего раздела были обрисованы в общих чертах начальные этапы определения основных требований к боевым частям и тот уровень научно-технической подготовки,

который необходим для выполнения программы научно-исследовательских работ и разработок. Была описана методика определения требуемых тактико-технических характеристик, лежащих в основе работы конструктора боевой части. Все это различные аспекты организации производства систем в рамках той огромной системы, которую представляют военные министерства США. Характеристики боевых частей, соответствующие основным тактико-техническим требованиям, отражают общие потребности национальной военной стратегии. Однако при определении указанных характеристик обычно не уточняется, как будет выполняться работа, как она будет финансироваться, кто будет ее выполнять и т. п.

Специальные организационные задачи решаются уже после разработки тактико-технических требований. Как было отмечено в главе 2, к этому моменту уже достигнуто соглашение с организациями, которые будут разрабатывать проект изделия. Исследованием, разработкой проекта и созданием определенной боевой части для конкретного комплекса управляемого снаряда занимается военное или военно-морское ведомство. Оно выбирает лаборатории и заводы для выполнения работ, в контакте с техническими органами определяет стоимость и сроки выполнения заказов, включает требуемую сумму в бюджет и представляет его на утверждение конгрессу. Если намеченная сумма окажется неприемлемой, необходимо пересмотреть всю программу создания комплекса управляемого снаряда, включая те организации, которые разрабатывают другие части снаряда.

Кроме того, упомянутое ведомство определяет степень секретности работы и вводит необходимые ограничения. Оно также контролирует все каналы распространения официальной и неофициальной информации. Короче говоря, оно осуществляет множество административных функций по организации производства боевых частей.

В лабораториях, получивших задание на проектирование боевой части, производится дальнейшее расчленение организационных задач на административные и технические. Военные учреждения выполняют почти исключительно административные функции, в них не производится проектирование и создание изделий. Лаборатория производит готовые образцы, и поэтому правильная организация дела должна обеспечивать успешный и своевременный выпуск продукции. Сроки изготовления определяются главным образом намеченной датой выпуска всего комплекса в целом, а также взаимосвязью между различными частями снаряда и степенями их готовности. Например, нет нужды ускорять выполнение программы изготовления боевой части, если затем придется ожидать, пока снаряд будет подготовлен

к летным испытаниям. Изготовление боевых частей и остальных элементов снарядов должно вестись одинаковыми темпами.

Административные органы производственных организаций распределяют рабочую силу, оборудование, денежные средства, составляют планы, налаживают взаимодействие, обеспечивают сохранение секретности и т. п. Время от времени по мере необходимости производится пересмотр программы выпуска продукции. В результате определяются необходимые изменения в материальных средствах, о которых ставятся в известность учреждения, ответственные за общее планирование. Тогда начинается новый цикл планирования, определения необходимых средств, ходатайств перед конгрессом и т. д. Затем все идет в обратном направлении. Программа изготовления боевых частей является динамичной, непрерывно изменяющейся. Она имеет основное направление развития, но подвержена влиянию технических, административных и политических — включая и внешнеполитические — факторов.

8.4. Технические проблемы организации производства систем в области боевых частей

Одной из важнейших проблем является создание таких компонентов боевой части (боевого заряда, взрывателя и предохранительного устройства), которые составляли бы наиболее эффективную и гармоничную систему, в свою очередь гармонично сочетающуюся с другими элементами общей системы, т. е. комплекса управляемого снаряда. Необходимо установить вес, размеры, конфигурацию, компоновку боевой части и вероятность поражения ею конкретной цели. Характеристики системы управления должны быть согласованы с параметрами боевой части. Конструктор боевого заряда использует весь свой опыт работы для того, чтобы найти приемлемый вариант конструкции вначале без учета возможностей его осуществления, стоимости, надежности и безопасности действия, а также множества других требований, которым должна удовлетворять боевая часть. Если возможны несколько вариантов решения задачи, конструктор боевого заряда должен совместно с конструктором взрывателя решить, какой вариант является наилучшим с точки зрения взаимодействия взрывателя с боевым зарядом. Выбранный вариант должен быть также проанализирован с точки зрения конструкции предохранительного устройства, поскольку размеры и вес элементов этого устройства могут оказать серьезное влияние на размеры и вес всей боевой части. Особый случай представляет конструирование кассетной боевой части. При необходи-

мости снабжения каждого субснаряда своим собственным взрывателем и предохранительным устройством вес взрывчатого вещества в боевом заряде может оказаться настолько малым, что будет целесообразнее применять одну боевую часть вместо нескольких. Возможен, конечно, и такой случай, когда современное состояние науки и техники не позволяет удовлетворить требования, предъявляемые к боевой части. Или же может не оказаться нужного взрывателя, который мог бы обеспечить эффективное использование оптимального боевого заряда. Подобные проблемы могут возникать при создании качественно новых систем оружия.

Для решения таких проблем требуется мобилизация всех сил и знаний инженеров, участвующих в разработке проекта. Часто бывает труднее принять решение о создании нового взрывателя, чтобы применить эффективный боевой заряд, чем пойти на снижение оптимальных характеристик боевой части и использовать худший боевой заряд, взрыватель для которого уже существует. Тот, кто принимает решение по этому вопросу, должен сопоставить данные о современном состоянии техники с прогнозом относительно путей дальнейшего ее развития. Необходимо учитывать, что правильность выбора будет доказана или опровергнута только через несколько лет, и в случае неправильной оценки темпов развития техники делу создания системы оружия будет нанесен непоправимый ущерб.

Задача сопоставления данных о современном состоянии техники с предположениями о перспективах ее развития с целью достижения наилучших результатов через несколько лет составляет одну из технических проблем организации производства систем, для решения которой должны привлекаться наиболее талантливые специалисты. Удачное соотношение между реальностью и перспективами достигается ценой больших усилий. Именно такое положение должно существовать во всех областях военной науки. Однако мы не знаем, какое именно оружие и в каком количестве потребуется для обеспечения победы в будущей войне. Нам неизвестно также, где возникнет война, кто будет нашим противником и каковы его методы ведения военных действий. Та нация, которая готовится к ведению войны в определенное время и с конкретным противником, находится в более выгодном положении. Поэтому страна требует от людей, ответственных за составление военных планов, максимальной проницательности.

Перечисленные выше проблемы касались главным образом боевой части как самостоятельной системы. Однако необходимо рассмотреть, хотя бы в общих чертах, и боевую часть как элемент всей системы оружия. К этому мы сейчас и переходим.

8.5. Соответствие боевой части остальным элементам комплекса управляемого снаряда

Ни одна боевая часть не может существовать отдельно от снаряда. Даже абсолютно автономные боевые части должны в какой-то мере зависеть от характеристик снаряда, поскольку они должны с ним скрепляться и совместно транспортироваться. Чаще имеет место такое положение, когда боевая часть нуждается в источниках питания (обычно электрических), находящихся на борту снаряда, в сигналах, вырабатываемых системой управления и пусковой установкой, и использует различные источники энергии, помещенные на пусковой установке. Это влечет за собой появление большого числа соединительных деталей, разъемов, штепселей и т. п. Если боевая часть должна присоединяться к корпусу снаряда, то необходимо выяснить, какие нагрузки действуют на соединительные детали во время полета и на земле, сколько времени и какие приспособления требуются для монтажа боевой части, при каких условиях должно происходить присоединение боевой части к корпусу снаряда, какое количество людей требуется для этого и т. п. Относительно источников питания нужно знать следующее: тип и число соединений между корпусом снаряда и боевой частью, токи, идущие через каждый из проводников, допустимое падение напряжения в линиях, изменение напряжения на зажимах источника питания между холостым ходом и полной нагрузкой, изменения напряжения, вызванные работой других агрегатов и происходящие во время полета снаряда, влияние изменения температуры, ограничения, накладываемые элементами боевой части, и т. п. Сигналы, получаемые боевой частью от снаряда и пусковой установки, следует различать по виду, продолжительности, способу передачи, числу и местоположению передающих линий и т. п. Для того чтобы удовлетворить противоречивые требования, часто приходится принимать компромиссные решения, при которых страдает то одно, то другое. При разрешении сложных проблем нельзя ограничиться учетом одних только технических соображений, необходимо принимать во внимание сроки изготовления, а также экономические и политические факторы.

8.6. Взаимные помехи

Ликвидация взаимных помех, создаваемых снарядом и боевой частью, всегда является одной из важнейших задач. Кроме внутренних помех, вызванных тем, что снаряд и боевая часть используют одни и те же устройства, или тем, что во время полета на снаряд и боевую часть по-разному действуют одни и те же факторы, возможно появление внешних помех, связан-

ных с излучением энергии в пространстве. Внешние помехи могут возникать даже в довольно совершенных конструкциях в результате действия естественных факторов или же вследствие того, что конструкторы отдельных частей снаряда игнорировали вопросы, относящиеся ко всему комплексу управляемого снаряда.

С другой стороны, в результате ошибочных расчетов или расчетов, основанных на неверной методике (последнее обычно бывает следствием недостатка времени для разработки такой методики), можно получить неправильные данные о помехах. Испытания комплекса оружия могут показать, что помехи, которые по предварительным расчетам должны были иметь недопустимую величину, на самом деле не существуют. Наоборот, некоторые другие факторы, считавшиеся второстепенными, в действительности могут оказаться весьма существенными. В результате оказывается, что перечисленные выше проблемы решаются в течение всего периода создания системы оружия; они не могут быть решены сразу и окончательно в самом начале работы.

8.7. Контрмеры

Хотя решением проблемы борьбы с вражескими контрмерами занимаются конструкторы всех частей комплекса управляемого снаряда, наибольшую ответственность несет конструктор боевой части. Причина заключается в следующем: если помехи, создаваемые противником, вызовут преждевременный взрыв боевого заряда, снаряд не выполнит своей задачи. В то же время результатом действия помех на систему управления обычно бывает лишь ухудшение ее характеристик.

Кратковременное воздействие помех на систему управления, как правило, незначительно сказывается на общих характеристиках снаряда; однако воздействие такого же характера на боевую часть с выключенным предохранительным устройством может привести к непоправимым последствиям, т. е. к взрыву боевого заряда и разрушению всего снаряда. Поэтому конструктор взрывателя стремится создать такую систему, которая бы не реагировала на помехи, и старается максимально снизить чувствительность выбранной системы к помехам (совокупность этих мероприятий называют борьбой с помехами противника). Вот почему необходимо, чтобы выключение предохранительного устройства происходило как можно позднее: тем самым предотвращается преждевременный подрыв боевого заряда в результате воздействия помех со стороны противника. Однако злоупотреблять этим приемом не следует, так как предохранительное устройство может в конце концов превратиться просто во взрыватель.

8.8. Практическая осуществимость проекта

К несчастью, для утверждения многих проектов оказывается достаточным признать их теоретически осуществимыми. Конструкторы, не имеющие достаточного опыта, часто необдуманно игнорируют проблемы, связанные с необходимостью создания новых элементов, с экстремальными условиями работы системы, с трудностями производства и с неисправностями в работе. Техника развивается настолько быстро, что окончательное решение придется принимать инженерам, которые никогда раньше не занимались вопросами создания системы в целом. Они могут не знать специфики производства и использования управляемых снарядов и даже игнорировать ее, будучи уверенными в том, что если что-то может быть изготовлено один раз, то оно может и даже должно быть сделано и второй. В действительности же дело обстоит следующим образом. На вопрос, можно ли изготовить данное устройство, следует ответить так: можно, если никого не интересует количество и стоимость продукции.

Другой вопрос, который, к сожалению, слишком редко задается и который конструктор обязан задавать сам себе, звучит так: следует ли изготавливать это устройство? Вообще говоря, если один образец изготовлен, то может быть изготовлен и другой. Это положение справедливо, но оно не вскрывает тех проблем, которые связаны с производством массовой продукции. Первый образец очень часто оказывается с точки зрения технологии недостаточно удачным для того, чтобы аналогичные приборы могли изготавливаться на заводах со сравнительно низкоквалифицированной рабочей силой. Конструктор должен отдавать себе отчет в том, что выпуск продукции будет осуществляться не квалифицированными инженерами, а мужчинами и женщинами самых разнообразных профессий, выполняющими простые, повторяющиеся операции. Только в этом случае можно обеспечить производство массовой продукции, имеющей приемлемую себестоимость. Монтаж и испытание первой атомной бомбы производили ведущие физики страны, и это было нормальным положением. Но обычные бомбы при массовом выпуске не могут изготавливаться таким способом.

Другим вопросом, которому при проектировании часто не придают должного значения, является учет условий эксплуатации. Ни одно устройство не должно создаваться в расчете на то, что его будут обслуживать опытные инженеры, так как во всей стране не наберется нужного количества таких инженеров. Устройство любого агрегата должно быть таким, чтобы для его обслуживания не требовался высококвалифицированный персонал; естественно, что при этом конструкция будет менее совершенной. Далее, если конструктор стремится обеспечить получение

ние оптимальных характеристик системы исключительно в лабораторных условиях, то изделие может оказаться непригодным для боевого использования. Поэтому конструктор должен стараться получить характеристики выше требуемых, чтобы в боевых условиях даже при снижении качеств изделия оно удовлетворяло предъявляемым требованиям.

Часто забывают о таком требовании, как удобство эксплуатации. Устройство не может считаться достаточно совершенным, если с ним неудобно обращаться. Когда работа устройства плохо контролируется, трудно снять показания приборов, техническое обслуживание очень сложное и т. п., то, естественно, уверенность в надежности устройства теряется и совершенство его снижается. По существу, оператора можно рассматривать как часть устройства — такую же, как какая-нибудь труба, подшипник, зубчатое колесо и т. д. И если его характерные особенности не учтены при проектировании устройства, оно не будет хорошо работать.

8.9. Экономика

Следует отметить, что к конструкции нельзя подходить лишь с точки зрения обеспечения ее максимального технического совершенства: стоимость изделия также должна приниматься во внимание. Например, не имеет никакого смысла повышение качества снаряда на 5%, если при этом его стоимость возрастет вдвое, хотя с чисто технической точки зрения снаряд станет лучше. К сожалению, в большинстве случаев решение не столь очевидно. Поэтому встает вопрос: как оценить экономические факторы? Сравним для примера два типа взрывателей, имеющих различные стоимости.

Чтобы иметь основу для принятия решения, конструктор должен знать, каково назначение снаряда. Предположим, что, по мнению экспертов, для достижения желаемого результата в конкретной обстановке необходимо применить W боевых зарядов данного типа, снабженных совершенными системами управления и взрывателями. Допустим, что существует определенный тип снаряда, способный доставить эти боевые заряды к цели и что тактико-технические требования, предъявляемые к обоим типам взрывателей, одинаковы. Поскольку надежность управления полетом снаряда не может быть 100%-ной, придется выпустить несколько большее количество снарядов (с исправными взрывателями) для того, чтобы W боевых зарядов разорвалось около цели. Необходимое число снарядов равно:

$$\frac{W}{R_m}, \quad (8.1)$$

где R_m — коэффициент надежности действия снаряда. Учитывая, что работа взрывателя также не может характеризоваться надежностью, равной 100%, число выпущенных снарядов следует увеличить до

$$\frac{W}{R_m R_f}, \quad (8.2)$$

где R_f — коэффициент надежности действия взрывателя. Введем в употребление такие термины, как стоимость снаряда при пуске C_m и стоимость взрывателя при пуске C_f . Это не только себестоимость — сюда входят стоимости выполнения всех работ, предшествующих запуску снаряда, распределенные равномерно среди всей выпущенной продукции. Это обстоятельство часто упускают из виду. Например, в стоимость бомб, сброшенных с самолета, нужно включить стоимости бомбардировщика и его экипажа, умноженные на коэффициент уничтожения и т. п. Конструктор всегда должен представлять размеры дополнительных расходов (в масштабе всего государства), связанных с применением созданного им оружия.

Итак, стоимость выполнения конкретной боевой задачи равна

$$C = \frac{W(C_m + C_f)}{R_m R_f}. \quad (8.3)$$

Вполне обоснованным критерием оценки качества взрывателя является стоимость, определяемая из уравнения (8.3). Из двух взрывателей, имеющих различные значения R_f и C_f , конструктор должен выбрать тот, который обеспечивает наименьшее значение C . Из уравнения (8.3) видно, что выбор конструктора не зависит от W и R_m . Таким образом, утверждение о том, что «постановка надежного взрывателя на ненадежный снаряд не имеет смысла», оказывается ошибочным. Каковы бы ни были качества снаряда, ненадежные взрыватели потребуют применения большего числа снарядов для выполнения конкретной задачи, чем надежные взрыватели.

Из уравнения (8.3) следует еще одно обстоятельство. Если стоимость снаряда велика по сравнению со стоимостью взрывателя, то затраты денег на повышение надежности действия взрывателя будут оправданы. Сравним взрыватель, имеющий коэффициент надежности действия R_{f1} и ничтожную стоимость, со взрывателем, имеющим коэффициент надежности R_{f2} (большой, чем R_{f1}) и стоимость C_{f2} . Определим допустимую величину C_{f2} при условии, что стоимости выполнения боевой задачи для обоих взрывателей одинаковы.

Получаем:

$$C_{f2} = C_m \left(\frac{R_{f2}}{R_{f1}} - 1 \right). \quad (8.4)$$

Если $R_f/R_f = 1,2$, т. е. надежность повышена на 10%, то

$$C_f = 0,1C_m. \quad (8.5)$$

Другими словами, для снаряда стоимостью в 1 млн. долларов стоимость взрывателя в 99 тыс. долларов является приемлемой, если при этом надежность действия взрывателя повышается на 10% в сравнении с взрывателем, стоимость которого даже равна нулю. Необходимо подчеркнуть, что к такого рода заключению можно прийти только при рассмотрении всей системы оружия; одного сравнения двух типов взрывателей для этого недостаточно.

Из всего сказанного выше можно сделать несколько интересных заключений относительно роли дублирования. Дублирование применяется для повышения надежности действия взрывателей (детально этот вопрос будет рассмотрен ниже). При использовании двух параллельно включенных взрывателей надежность определяется по формуле

$$R_p = R(2 - R), \quad (8.6)$$

где R — коэффициент надежности одного взрывателя. Если даже предположить, что стоимость двух взрывателей вдвое превышает стоимость одного взрывателя, то стоимость выполнения боевой задачи в случае использования двух параллельно включенных взрывателей будет равна

$$C_p = \frac{W(C_m + 2C_f)}{R_m R_f (2 - R_f)}. \quad (8.7)$$

Определим соотношение между C_f и C_m , при котором стоимость выполнения боевой задачи для снарядов с двумя взрывателями будет меньше, чем для снарядов с одним взрывателем. Оказывается, что для этого необходимо выполнение неравенства

$$\frac{C_f}{C_m} < \frac{1 - R_f}{R_f}. \quad (8.8)$$

Другими словами, если R_f равно 0,9, а стоимость взрывателя составляет менее 11% стоимости снаряда, выгоднее применять два параллельно включенных взрывателя. Если стоимость снаряда составляет 1 млн. долларов, дублирование взрывателей целесообразно производить в тех случаях, когда стоимость каждого взрывателя меньше 110 тыс. долларов. По мере повышения надежности действия взрывателя дублирование становится все менее целесообразным. Пользуясь приведенной выше методикой, можно определить, что выгоднее — использовать два взрыва-

теля, имеющих надежность 80 %, или один взрыватель с надежностью 90 %. Кроме того, можно установить границу, за которой дублирование уже не обеспечивает дальнейшего повышения надежности.

8.10. Дублирование

В главе 7 шла речь о дублировании в предохранительных устройствах. Термин «дублирование» употребляется для обозначения конструктивного метода повышения надежности путем использования нескольких одинаковых элементов системы в количестве, превышающем минимально необходимое, и соединения этих элементов определенным образом с целью достижения желаемых результатов. Обычно дублирование осуществляется во взрывателях и предохранительных устройствах. Дублирование боевых зарядов, как правило, не производится ввиду их достаточной надежности действия.

При применении взрывателя могут быть получены следующие результаты: *нормальный разрыв, ранний разрыв, поздний разрыв и неразрыв*. Для каждого конкретного взрывателя существуют вероятности получения перечисленных результатов. Обозначим эти вероятности соответственно p , e , t и d . Сумма вероятностей всех возможных событий, как известно, равна единице, т. е. в данном случае

$$p + e + t + d = 1. \quad (8.9)$$

Нормальный разрыв имеет место в том случае, когда снаряд находится на достаточно близком расстоянии от цели для того, чтобы цель была поражена. Ранний разрыв является результатом преждевременного срабатывания взрывателя; поздний разрыв происходит при запоздалом срабатывании взрывателя. Неразрыв является результатом несрабатывания взрывателя. Четкое различие между всеми этими случаями провести трудно, так как невозможно строго определить, какой разрыв является нормальным.

Момент срабатывания взрывателя зависит от ряда факторов, а именно от характеристик системы управления, цели и самого взрывателя. Если предположить, что характеристики системы управления и цели неизменны, то при стрельбе большим числом снарядов с одинаковыми взрывателями по одной и той же цели мы получим распределение точек разрывов (т. е. точек действия взрывателей) относительно цели, или рассеивание (см. рис. 8.1). Это рассеивание является следствием того, что невозможно изготовить устройства с абсолютно одинаковыми характеристиками, и обычно принимается во внимание при проектировании взрывателей. Если действительное рассеивание совпадает с теоретическим, взрыватель считается работающим нормально. Если бы

взрыватели были настолько совершенны, что их несрабатывание было бы полностью исключено, рассеивание определялось бы только конструкцией взрывателя. Предположив, что распределение точек разрывов подчиняется закону Гаусса, можно определить область нормальных разрывов. *Нормальные* разрывы являются результатами нормальных срабатываний взрывателей и располагаются в зоне, ограниченной тремя средними квадратическими отклонениями вправо и влево от оси распределения. *Ранние* разрывы являются результатами ранних срабатываний взрывателей и располагаются за пределами зоны нормальных

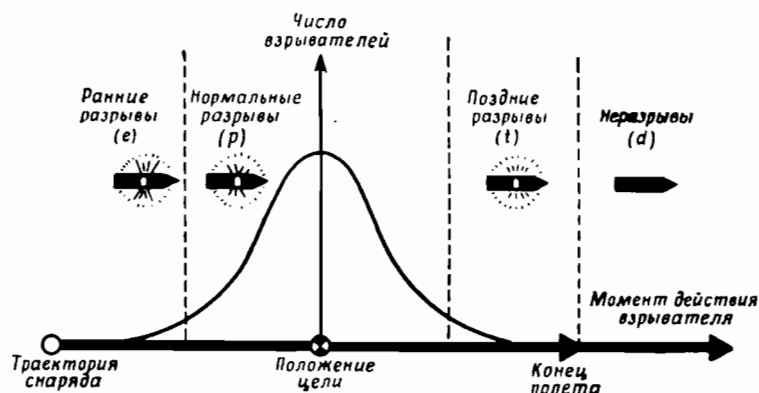


Рис. 8.1. Распределение точек разрывов относительно цели.

разрывов при недолетах снарядов до цели. *Поздние* разрывы являются результатами поздних срабатываний взрывателей и располагаются также за пределами зоны нормальных разрывов, но только при перелетах снарядов за цель. *Неразрыв* есть результат несрабатывания взрывателя.

Далее будут исследованы вероятности получения различных результатов действия взрывателей. Подсчет вероятностей произведем с помощью метода комбинаторики. При использовании этого метода анализа вычисление вероятностей сложных событий производится путем сложения всех возможных произведений вероятностей. Вероятность одновременного наступления нескольких событий равна произведению вероятностей отдельных событий. Определение всех возможных комбинаций производится путем перемножения. Для иллюстрации рассмотрим два прибора, каждый из которых может выполнять по две операции. Вероятности совершения этих операций связаны между собой следующими уравнениями:

$$p_1 + p_2 = 1, \quad (8.10)$$

$$p_3 + p_4 = 1. \quad (8.11)$$

Для определения вероятностей одновременного выполнения обеих операций запишем

$$(p_1 + p_2)(p_3 + p_4) = 1, \quad (8.12)$$

откуда

$$p_1 p_3 + p_1 p_4 + p_2 p_3 + p_2 p_4 = 1. \quad (8.13)$$

В уравнении (8.13) содержатся все возможные комбинации произведений двух отдельных вероятностей для одновременно совершающихся событий. Например, вероятность того, что события с вероятностями p_1 и p_3 произойдут одновременно, равна произведению $p_1 p_3$.

Прежде чем приступить к расчетам, введем некоторые обозначения. Вероятности, связанные с различными событиями, происходящими в условиях дублирования, будем обозначать заглавными буквами. Так, через P обозначим вероятность обеспечения нормальных разрывов при дублировании взрывателей, а через E , T и D соответственно вероятности обеспечения ранних разрывов, поздних разрывов и получения неразрывов. Индексы будут употребляться для обозначения способов комбинирования взрывателей при дублировании. Например, P_{12} обозначает вероятность того, что хотя бы один из двух взрывателей, соединенных параллельно, обеспечит нормальный разрыв. С другой стороны, P_{22} обозначает вероятность получения нормального разрыва, если два взрывателя соединены последовательно и для подрыва боевого заряда требуется срабатывание обоих взрывателей. В последнем случае одновременное срабатывание обоих взрывателей не обязательно, т. е. один взрыватель может сработать раньше, но взрыв боевой части произойдет только после срабатывания второго взрывателя. Аналогично, P_{35} обозначает вероятность получения нормальных разрывов снарядов, снабженных пятью взрывателями, которые соединены между собой таким образом, что подрыв боевого заряда происходит при одновременном срабатывании любых трех взрывателей из пяти.

Для того чтобы проиллюстрировать методику расчета, проще всего вывести формулы для комбинации двух одинаковых взрывателей. Совокупность вероятностей всех возможных срабатываний и несрабатываний двух взрывателей может быть получена при возведении в квадрат выражения (8.9):

$$(p + e + t + d)^2 = p^2 + e^2 + t^2 + d^2 + 2pd + 2pe + 2pt + 2de + 2dt + 2et. \quad (8.14)$$

Таким образом, p^2 есть вероятность нормальных срабатываний обоих взрывателей, $2pd$ есть вероятность того, что один из взрывателей работает нормально, а другой не работает. Теперь

можно вычислить вероятности более сложных событий. Вероятность того, что хотя бы один из двух параллельно соединенных взрывателей вызовет нормальный взрыв, будет равна

$$P_{12} = p^2 + 2pd + 2pt. \quad (8.15)$$

При выводе этой формулы нужно обратить особое внимание на то, в какой последовательности происходит срабатывание взрывателей. Член p^2 должен быть включен сюда потому, что это вероятность одновременного нормального срабатывания обоих взрывателей, а P_{12} — вероятность нормального срабатывания хотя бы одного из них. $2pd$ включено в выражение для P_{12} по той причине, что это вероятность нормального срабатывания какого-либо одного взрывателя, вызывающего взрыв боевого заряда, если второй взрыватель вообще не сработал. $2pt$ включено в выражение для P_{12} потому, что это вероятность нормального срабатывания одного из двух взрывателей и позднего срабатывания другого; причем взрыв боевого заряда происходит при срабатывании первого из взрывателей, так как они соединены параллельно. Произведение $2pe$ не включено в выражение для P_{12} , поскольку это вероятность преждевременного срабатывания одного из взрывателей и нормального срабатывания другого. В этом случае взрыв боевого заряда происходит также преждевременно, ибо при параллельном соединении взрывателей достаточно срабатывания одного из них. Остальные члены в выражении (8.14) не включают нормальных взрывов. Вероятности других сложных событий запишутся так:

$$E_{12} = e^2 + 2pe + 2de + 2et, \quad (8.16)$$

$$T_{12} = t^2 + 2dt, \quad (8.17)$$

$$D_{12} = d^2. \quad (8.18)$$

Таким образом, охвачены все возможные случаи. В результате преобразований приведенные выше формулы можно привести к следующему виду:

$$P_{12} = p(1 - e + d + t), \quad (8.19)$$

$$E_{12} = e(2 - e), \quad (8.20)$$

$$T_{12} = t(t + 2d), \quad (8.21)$$

$$D_{12} = d^2. \quad (8.22)$$

Анализ этих выражений приводит к некоторым интересным заключениям. Комбинация двух параллельно соединенных взрывателей

- а) всегда увеличивает число преждевременных разрывов;
- б) всегда уменьшает число неразрывов;

в) может увеличивать, уменьшать или оставлять неизменным число нормальных разрывов;

г) обычно уменьшает число поздних разрывов.

Если под надежностью понимается высокий процент нормальных разрывов, то, как это ни странно, дублирование может привести к снижению надежности.

Рассмотрим теперь вероятности получения различных видов разрывов при использовании двух последовательно соединенных взрывателей, т. е. в случае, когда для подрыва боевого заряда необходимо срабатывание обоих взрывателей. При условиях

$$P_{22} = p(1 + e - d - t), \quad (8.23)$$

$$E_{22} = e^2, \quad (8.24)$$

$$T_{22} = t(2 - t - 2d), \quad (8.25)$$

$$D_{22} = d(2 - d). \quad (8.26)$$

Следовательно, при последовательном соединении взрывателей всегда увеличивается число неразорвавшихся снарядов, а также поздних разрывов; всегда уменьшается число ранних разрывов, а число нормальных разрывов может увеличиваться, уменьшаться или оставаться постоянным.

Задача о выборе способа соединения между собой двух взрывателей не имеет однозначного решения. Решение, очевидно, зависит от относительных величин p , e , t и d . Если e больше суммы d и t , то при последовательном соединении двух взрывателей число нормальных разрывов возрастает; если e меньше суммы d и t , то увеличение числа нормальных разрывов происходит при параллельном соединении. Поэтому для принятия решения о том, какой способ дублирования взрывателей следует применить, необходимо определить эмпирическим путем закон изменения плотности вероятности нормальных, преждевременных и поздних разрывов, а также неразрывов. Если требуемые экспериментальные данные не могут быть получены до тех пор, пока не будет произведен отстрел большого числа снарядов в боевой обстановке, необходимо провести специальное исследование или же отказаться от применения дублирования для повышения надежности. В случае создания противником помех число преждевременных и ранних разрывов, а также неразрывов может возрасти и распределение точек разрывов относительно цели не будет известно с достаточной точностью. К счастью, даже в этих случаях можно найти другие методы повышения надежности. Оказывается, нужно просто использовать больше двух взрывателей.

Теми же методами, что и изложенные выше, можно рассчитать вероятности различных событий в случае применения трех взрывателей. Три взрывателя могут быть соединены между

собой таким образом, что взрыв боевого заряда произойдет при срабатывании одного, двух или всех трех взрывателей. Приближенные формулы для случая параллельного соединения трех взрывателей имеют следующий вид:

$$P_{13} > 1 - 3e - d^3 - t^3 - 3t^2d - 3td^2, \quad (8.27)$$

$$E_{13} < 3e, \quad (8.28)$$

$$T_{13} = t^3 \left(1 + \frac{3d}{t} + \frac{3d^2}{t^2} \right), \quad (8.29)$$

$$D_{13} = d^3. \quad (8.30)$$

Можно заметить, что число неразрывов еще больше уменьшается, число поздних разрывов снижается, число преждевременных разрывов возрастает; что же касается числа нормальных разрывов, то оно может увеличиться, уменьшиться или остаться тем же самым. Вообще говоря, получились примерно те же результаты, что и в случае параллельного соединения взрывателей.

Если три взрывателя соединены между собой таким образом, что для подрыва боевого заряда требуется срабатывание двух из них, то

$$P_{23} > 1 - 3e^2 - 3d^2 - 3t^2 - 6td, \quad (8.31)$$

$$E_{23} < 3e^2, \quad (8.32)$$

$$T_{23} < 3t^2 + 6td, \quad (8.33)$$

$$D_{23} < 3d^2. \quad (8.34)$$

Полученные результаты представляют определенный интерес. По сравнению со случаем использования одного взрывателя число ранних и поздних разрывов, а также неразрывов уменьшается. Число неразрывов больше, чем для случая применения двух параллельных взрывателей; число преждевременных разрывов больше, чем для случая двух последовательно соединенных взрывателей; число поздних разрывов несколько больше, чем для случая двух параллельно соединенных взрывателей; число нормальных разрывов в большинстве случаев возрастает. Эти результаты не должны вызывать удивления; последний рассмотренный способ дублирования взрывателей сочетает свойства двух параллельно и последовательно соединенных взрывателей, но не имеет преимуществ ни перед одним из них в отдельности.

Для трех последовательно соединенных взрывателей

$$P_{33} > 1 - e^3 - 3d - 3t, \quad (8.35)$$

$$E_{33} = e^3, \quad (8.36)$$

$$T_{33} < 3t, \quad (8.37)$$

$$D_{33} < 3d. \quad (8.38)$$

Как и следовало ожидать, в этом случае уменьшается число преждевременных разрывов по сравнению со случаем использования одного взрывателя, но увеличивается число неразорвавшихся снарядов, поздних разрывов и, вероятно, нормальных разрывов.

Рассмотрим случай использования четырех взрывателей. Способы только параллельного и последовательного соединения отвергнуты как невыгодные. В остальных случаях

$$P_{24} > 1 - 6e^2 - 4d^3 - 4t^3 - 12t^2d - 12td^2, \quad (8.39)$$

$$E_{24} < 6e^2, \quad (8.40)$$

$$T_{24} < 4t^3 + 12t^2d + 12td^2, \quad (8.41)$$

$$D_{24} < 4d^3, \quad (8.42)$$

$$P_{34} > 1 - 4e^3 - 6d^2 - 6t^2 - 12td, \quad (8.43)$$

$$E_{34} < 4e^3, \quad (8.44)$$

$$T_{34} < 6t^2 + 12td, \quad (8.45)$$

$$D_{34} < 6d^2. \quad (8.46)$$

Можно заметить некоторую симметрию в написании формул. Для сравнения характеристик комбинации взрывателей «два из четырех» с комбинацией «три из четырех» снова необходимо знать закон распределения точек разрывов. Следует отметить, что E_{24} больше, чем E_{23} ; таким образом, использование комбинации «два из четырех» вместо «два из трех» не приводит к уменьшению числа ранних разрывов. Если к тому же число неразрывов и поздних разрывов невелико, комбинация взрывателей «два из трех» заслуживает предпочтения.

Переходя к анализу системы, состоящей из пяти взрывателей (опуская случаи чисто последовательного и чисто параллельного соединения как не представляющие интереса), можно получить следующие зависимости:

$$P_{25} > 1 - 10e^2 - 5d^4 - 20t^3d - 30t^2d^2 - 20td^3 - 5t^4, \quad (8.47)$$

$$E_{25} < 10e^2, \quad (8.48)$$

$$T_{25} < 5t^4 + 20td^3 + 30t^2d^2 + 20td^3, \quad (8.49)$$

$$D_{25} < 5d^4, \quad (8.50)$$

$$P_{35} > 1 - 10e^3 - 10d^3 - 10t^3 - 30t^2d - 30td^3, \quad (8.51)$$

$$E_{35} < 10e^3, \quad (8.52)$$

$$T_{35} < 10t^3 + 30t^2d + 30td^2, \quad (8.53)$$

$$D_{35} < 10d^3, \quad (8.54)$$

$$P_{45} > 1 - 5e^4 - 10d^2 - 10t^2 - 20td, \quad (8.55)$$

$$E_{45} < 5e^4, \quad (8.56)$$

$$T_{45} < 10t^2 + 20td, \quad (8.57)$$

$$D_{45} < 10d^2. \quad (8.58)$$

Снова наиболее выгодным способом соединения взрывателей оказывается комбинация «три из пяти», т. е. сочетание примерно одинакового числа последовательных и параллельных соединений. В случае использования комбинации «четыре из пяти» возрастает число неразрывов и уменьшается число ранних разрывов; в случае использования комбинации «два из пяти» возрастает число преждевременных разрывов и снижается число неразрывов.

Сделаем вывод из вышесказанного.

Если установить закон распределения вероятности различных видов разрывов эмпирическим путем невозможно, применение нечетного числа взрывателей является лучшим методом использования дублирования, чем применение четного количества. Наилучшие результаты достигаются при использовании примерно одинакового числа последовательных и параллельных соединений среди нечетного числа взрывателей.

Рассмотрение дублирования можно закончить следующим замечанием. До сих пор предполагалось, что взрыватели и, по-видимому, предохранительные устройства представляют собой единые, неразборные механизмы. При таких условиях эти механизмы не могут обеспечить надежность с максимальной эффективностью. Значительно большего успеха можно добиться путем расчленения механизмов на отдельные части и составления из них более сложных комбинаций.

8.11. Влияние дублирования на точность работы взрывателя

В предыдущих параграфах речь шла о работе системы, состоящей из нескольких взрывателей. Было показано, что использование дублирования может повысить надежность действия взрывателей. Вначале были даны определения различных видов действия взрывателей — преждевременного, нормального, позднего, а также несрабатывания. В § 8.10 было установлено, что нормальное срабатывание взрывателя обеспечивает разрыв снаряда в области, ограниченной определенным расстоянием от цели.

Ниже будет исследовано влияние дублирования на распределение нормальных разрывов. Для упрощения задачи рассмотрим конкретный случай: пусть взрыватель, использующийся для поражения наземной цели, определяет момент для подрыва боевого заряда путем измерения высоты над поверхностью земли и сравнения ее с заданной высотой. Если изготовить большое количество таких взрывателей, применить их для стрельбы по одной цели и определить число разрывов на каждой высоте, то мы получим кривую, подобную изображенной на рис. 8.2.

Площадь под кривой эквивалентна общему количеству использованных взрывателей за вычетом числа несработавших взрывателей. Максимум кривой может располагаться на расчетной высоте, но может и не совпадать с ней. В последнем случае имеет место определенная систематическая ошибка в работе механизма настройки взрывателя либо из-за неудачной конструкции, либо из-за влияния какого-либо естественного фактора. В любом случае получается тот или иной закон распределения. Если это нормальное распределение, то можно говорить о «среднеквадратическом отклонении», которое равно корню

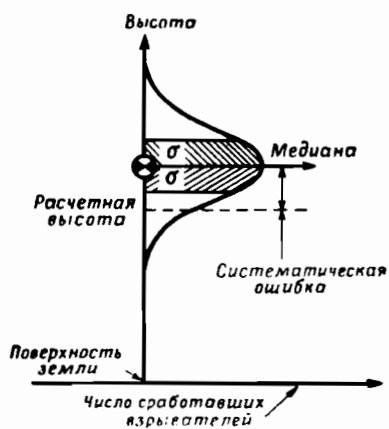


Рис. 8.2. Распределение высоты срабатывания взрывателей при стрельбе по наземной цели.

требуется определить высоту над целью с большой точностью для повышения эффективности использования боевого заряда, то необходимо весьма тщательно произвести выбор, проектирование и изготовление системы взрывателей.

Как все это увязать с данными выше определениями нормальных, преждевременных и поздних разрывов, а также случаев неразрыва? Рассматривая выше эти определения (рис. 8.1), мы использовали понятие распределения точек разрывов (точек действия взрывателей), однако о систематической ошибке там ничего не говорилось. Если теперь провести анализ с учетом как распределения точек действия взрывателей, так и систематической ошибки, сразу станет ясно, что распределение нормальных срабатываний взрывателей не будет симметричным относительно расчетной высоты при наличии систематической ошибки даже в том случае, когда оно симметрично относительно медианы. Автор полагает, что в этом нет никакого противоречия. Функция

квадратному из средней величины квадрата единичного отклонения и обычно выражается в процентах от расчетной высоты. Таким образом, среднеквадратическое отклонение является мерой точности работы взрывателя. Разность между расчетной высотой и медианой распределения представляет собой систематическую ошибку. Причин отклонения можно назвать много. Это прежде всего, конечно, недостаточная точность работы механизма настройки взрывателя, влияние рельефа земной поверхности на отражение радиоволн, не очень удачная конструкция взрывателя, рассеивание траекторий полета снаряда и т. п. Если

распределения и связанные с ней области нормальных, преждевременных и поздних разрывов характеризуют точность или стабильность работы взрывателя; систематическая ошибка является следствием неправильного использования взрывателей, неверной их градуировки, ошибок при расчете и т. п. При обнаружении систематической ошибки ее можно устранить путем исправления градуировки или введения корректур; однако точность работы взрывателя является неотъемлемой характеристикой конструкции.

Для проведения последующего анализа целесообразнее перейти от многоугольника предельных частот, подобного изображенным на рис. 8.1 и 8.2, к функции плотности вероятности. Многоугольник частот и функция плотности вероятности имеют одну и ту же форму, разница состоит только в том, что первый показывает общее число срабатываний взрывателей на каждой высоте для известного числа выстрелов, а вторая определяет вероятность срабатывания взрывателей на данной высоте. Для перехода от многоугольника частот к функции плотностей вероятности необходимо изменить масштабы на координатных осях таким образом, чтобы площадь под кривой плотности вероятности была равна полной вероятности срабатывания взрывателя (преждевременного, нормального или позднего). Эта вероятность равна единице минус вероятность несрабатывания взрывателя, т. е. $1 - d$. Введем некоторые обозначения, которые потребуются нам для анализа. Обозначим плотность вероятности срабатывания взрывателя на высоте a через

$$f_u(a). \quad (8.59)$$

Соответственно вероятность того, что взрыватель вообще работает на какой-либо высоте, будет равна

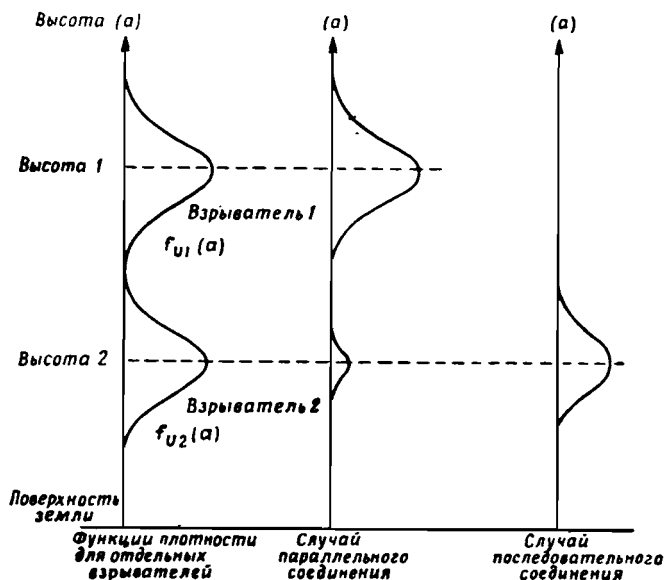
$$F_u = \int_{-\infty}^0 f_u(a) da, \quad (8.60)$$

$$F_u = 1 - d, \quad (8.61)$$

где d — вероятность несрабатывания взрывателя (вероятность неразрыва). Поскольку дальнейший анализ связан с отличием функций плотности вероятности для системы взрывателей, использующей дублирование, и для отдельного взрывателя и поскольку эти функции включают все виды срабатываний взрывателей, в дальнейшем термины «ранний», «нормальный» и «поздний» разрыв употребляться не будут. Кроме того, поскольку функция плотности для системы, использующей дублирование, не всегда является гауссовой, параметры нормального распределения употребляться почти не будут.

К сожалению, использование дублирования, помимо повышения надежности, оказывает заметное влияние на функцию

плотности вероятности. Отдельные взрыватели не подвержены этому влиянию—дублирование не может изменять характеристики компонентов системы взрывателей. Но функция плотности сложной системы существенно отличается от функций плотности отдельных взрывателей. В случае использования дублирования вид функции плотности зависит от распределений для отдельных взрывателей и от последовательности их срабатывания. Если взрыватели соединены между собой последовательно, взрыв боевого заряда происходит только в результате срабатывания всех



Р и с. 8.3. Плотность вероятности срабатывания двух взрывателей, настроенных на различные высоты.

взрывателей; поэтому разрывы располагаются вокруг той высоты, на которую настроен взрыватель, сработавший последним. Даже в том случае, если все взрыватели будут иметь одинаковые функции плотности, функция плотности для всей системы взрывателей будет отличаться от них. Для подтверждения этого тезиса рассмотрим случай, иллюстрацией которого служит рис. 8.3.

В левой части рисунка изображены функции плотности, соответствующие двум взрывателям, которые имеют совершенно одинаковые параметры, но настроены на различные высоты так, что функции плотности не накладываются друг на друга. Взрыватель 1, настроенный на большую высоту, имеет функцию плотности $f_{U1}(a)$, а взрыватель 2, настроенный на меньшую высоту,

имеет функцию плотности $f_{u2}(a)$. Соответствующие вероятности срабатывания обоих взрывателей F_{u1} и F_{u2} равны 0,9, а вероятности несрабатывания d_1 и d_2 равны 0,1. При нахождении функции плотности для случая *параллельного* соединения будем рассуждать следующим образом. Взрыв боевого заряда произойдет при срабатывании хотя бы одного из взрывателей на той высоте, на которую настроен первый сработавший взрыватель. Рассмотрим теперь вероятность разрыва боевого заряда во всем диапазоне высот. Искомая вероятность равна сумме трех вероятностей: во-первых, вероятности срабатывания взрывателя 2 после срабатывания взрывателя 1; во-вторых, вероятности несрабатывания взрывателя 2 после срабатывания взрывателя 1; в-третьих, вероятности срабатывания взрывателя 2 после несрабатывания взрывателя 1. (В последнем случае разрыв боевого заряда, очевидно, произойдет на высоте срабатывания взрывателя 2.)

Для получения функции плотности вероятности, относящейся к любой высоте a в диапазоне высот срабатывания взрывателя 1, необходимо рассчитать вероятность взрыва боевого заряда в интервале da вокруг высоты a . Учтем вначале только первые две вероятности из трех, перечисленных выше. Получим

$$F_{u2}f_{u1}(a)da + d_2f_{u1}(a)da. \quad (8.62)$$

Это выражение можно переписать так:

$$f_{u1}(a)da(F_{u2} + d_2) \quad (8.63)$$

или просто

$$f_{u1}(a)da, \quad (8.64)$$

поскольку сумма, стоящая в скобках, равна единице. Следовательно, в области высот срабатывания взрывателя 1 плотность вероятности параллельно соединенной системы взрывателей равна

$$\frac{f_{u1}(a)da}{da} \quad (8.65)$$

или

$$f_{u1}(a). \quad (8.66)$$

В области высот срабатывания взрывателя 2 взрыв боевого заряда может произойти только в том случае, если взрыватель 1 не работает. Вероятность взрыва боевого заряда в интервале da у высоты a в области срабатывания взрывателя 2 равна

$$d_1f_{u2}(a)da. \quad (8.67)$$

Соответственно функция плотности вероятности параллельно соединенной системы взрывателей в области высот срабатывания взрывателя 2 равна

$$\frac{d_1f_{u2}(a)da}{da} \quad (8.68)$$

или

$$d_1 f_{u2}(a). \quad (8.69)$$

Итак, суммарная плотность вероятности взрыва боевой части, снабженной двумя параллельно соединенными взрывателями, на любой высоте a равна

$$f_{u12}(a) = f_{u1}(a) + d_1 f_{u2}(a). \quad (8.70)$$

Это показано в средней части рис. 8.3. Полная вероятность взрыва боевого заряда равна

$$F_{u12} = \int_{-\infty}^0 f_{u12}(a) da, \quad (8.71)$$

$$F_{u12} = \int_{-\infty}^0 f_{u1}(a) da + d_1 \int_{-\infty}^0 f_{u2}(a) da, \quad (8.72)$$

$$F_{u12} = F_{u1} + d_1 F_{u2}, \quad (8.73)$$

$$F_{u12} = 0,99. \quad (8.74)$$

При определении функции плотности вероятности для случая *последовательного* соединения двух взрывателей необходимо рассмотреть только случай срабатывания обоих взрывателей, так как взрыв боевого заряда может произойти лишь в результате срабатывания обоих взрывателей на высоте срабатывания последнего из них. Поэтому весь диапазон возможных взрывов боевых частей лежит в области высот срабатывания взрывателя 2. Найдем вероятность срабатывания взрывателя 2 в интервале da вокруг высоты a в области высот срабатывания взрывателя 2 при условии, что взрыватель 1 уже сработал. Искомая вероятность равна

$$F_{u1} f_{u2}(a) da. \quad (8.75)$$

Следовательно, функция плотности вероятности равна

$$f_{u22}(a) = F_{u1} f_{u2}(a). \quad (8.76)$$

График этой функции показан в правой части рис. 8.3. Полная вероятность взрыва боевой части, снабженного двумя последовательно соединенными взрывателями, равна

$$F_{u22} = \int_{-\infty}^0 f_{u22}(a) da, \quad (8.77)$$

$$F_{u22} = F_{u1} \int_{-\infty}^0 f_{u2}(a) da, \quad (8.78)$$

$$F_{u22} = F_{u1} F_{u2}, \quad (8.79)$$

$$F_{u22} = 0,81. \quad (8.80)$$

В рассмотренных выше случаях задача решалась достаточно просто, потому что взрыватели были настроены на различные высоты и функции плотности не накладывались друг на друга. Однако обычно на практике взрыватели настраиваются на одну и ту же высоту. Как определить суммарную функцию плотности в этом случае?

Решение такой задачи не вызывает особых трудностей. Рассмотрим вначале случай *параллельного* соединения взрывателей, когда для взрыва боевого заряда достаточно срабатывания хотя бы одного взрывателя. Обозначим взрыватели номерами 1 и 2 и будем считать, что они имеют одну и ту же функцию плотности $f_u(a)$.

Рассмотрим взрыватель 1. Вероятность того, что этот взрыватель сработает в интервале da вокруг высоты a , будет равна $f_u(a)da$. При этом взрыватель 2 может либо совсем не сработать, либо сработать на высоте, меньшей чем a (если взрыватель 2 сработает на высоте, большей a , то это будет противоречить первоначальному предположению, что взрыв боевого заряда происходит на высоте, не превышающей a).

Для определения вероятностей каждого из этих сложных событий необходимо подсчитать произведение вероятностей. Вероятность первого события равна

$$df_u(a) da, \quad (8.81)$$

где d — вероятность несрабатывания взрывателя 2. При определении вероятности второго события нужно учесть, что вероятность срабатывания взрывателя 2 на высотах ниже a равна

$$\int_a^0 f_u(x) dx, \quad (8.82)$$

следовательно, вероятность второго события равна

$$f_u(a) da \int_a^0 f_u(x) dx. \quad (8.83)$$

Таким образом, полная вероятность того, что взрыватель 1 сработает в интервале da у высоты a и, кроме того, взрыватель 2 не сработает совсем или же сработает на высотах, не превышающих a , будет равна

$$df_u(a) da + f_u(a) da \int_a^0 f_u(x) dx. \quad (8.84)$$

Однако это еще не все. Дело в том, что взрыватели 1 и 2 могут поменяться ролями. Для этого случая вероятность срабатывания будет точно такой же, как в выражении (8.84).

Следовательно, полная вероятность срабатывания хотя бы одного взрывателя в интервале da вокруг высоты a и несрабатывания на высотах, превышающих высоту a , равна

$$2df_u(a)da + 2f_u(a)da \int_a^0 f_u(x)dx. \quad (8.85)$$

Суммарная функция плотности вероятности равна

$$f_{u12}(a) = 2df_u(a) + 2f_u(a) \int_a^0 f_u(x)dx. \quad (8.86)$$

Итак, полная вероятность предыдущего события равна

$$F_{u12} = 2dF_u + 2 \int_{-\infty}^0 f_u(a)da \int_a^0 f_u(x)dx. \quad (8.87)$$

Для иллюстрации этой формулы предположим, что первичная функция плотности имеет форму, изображенную слева на рис. 8.4, т. е. плотность вероятности постоянна. Произведение $2df_u(a)$ будет также иметь постоянную величину, а функция

$2f_u(a) \int_a^0 f_u(x)dx$ будет иметь треугольную форму. Суммарная

функция плотности для двух взрывателей по своей форме будет похожа на скошенный четырехугольник. В случае если функция плотности для отдельного взрывателя имеет треугольную форму, функция плотности для двух взрывателей будет иметь вид, изображенный на рис. 8.4 внизу справа. Следует отметить, что максимальная плотность вероятности функции двух взрывателей располагается на большей высоте, чем для функции, относящейся к отдельному взрывателю.

При анализе случая *последовательного* соединения взрывателей необходимо определить вероятность срабатывания одного взрывателя на высоте a при условии, что другой взрыватель сработал на некоторой высоте, большей чем a . В результате преобразований, аналогичных приведенным выше, можно получить

$$f_{u22}(a) = 2f_u(a) \int_a^a f_u(x)dx, \quad (8.88)$$

следовательно,

$$F_{u22} = 2 \int_{-\infty}^a f_u(a)da \int_a^a f_u(x)dx. \quad (8.89)$$

Сравним между собой формулы плотности вероятности для случаев параллельного и последовательного соединений взрывателей, т. е. формулы (8.86) и (8.88). При наличии некоторого сходства разница между этими двумя выражениями состоит в

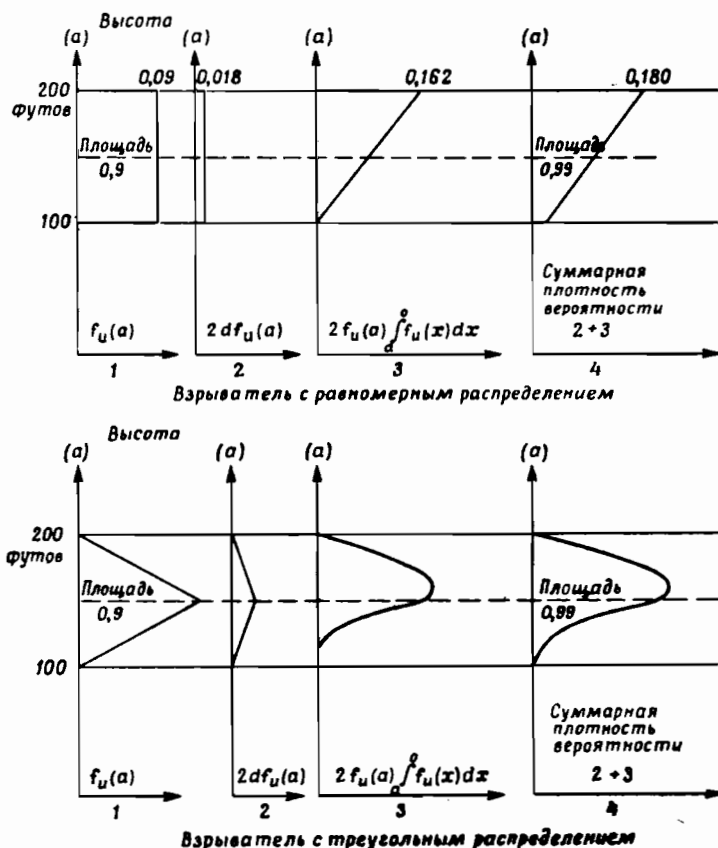


Рис. 8.4. Суммарная функция плотности двух взрывателей, настроенных на одну и ту же высоту (случай параллельного соединения).

том, что они имеют различные пределы интегрирования, а также в том, что в формуле (8.88) отсутствует член $2df_u(a)$. Интеграл, входящий в оба выражения, является функцией высоты a и монотонно возрастает с уменьшением высоты. Поэтому функции плотности вероятности для случаев последовательного и параллельного соединений имеют наклон в разные стороны. На рис. 8.5 изображены функции плотности вероятности для двух последовательно соединенных взрывателей при равномерном и треугольном

распределении плотности вероятности срабатывания отдельных взрывателей. Видно, что максимальная плотность вероятности для двух взрывателей располагается ниже, чем для функции, относящейся к отдельному взрывателю. Представляет

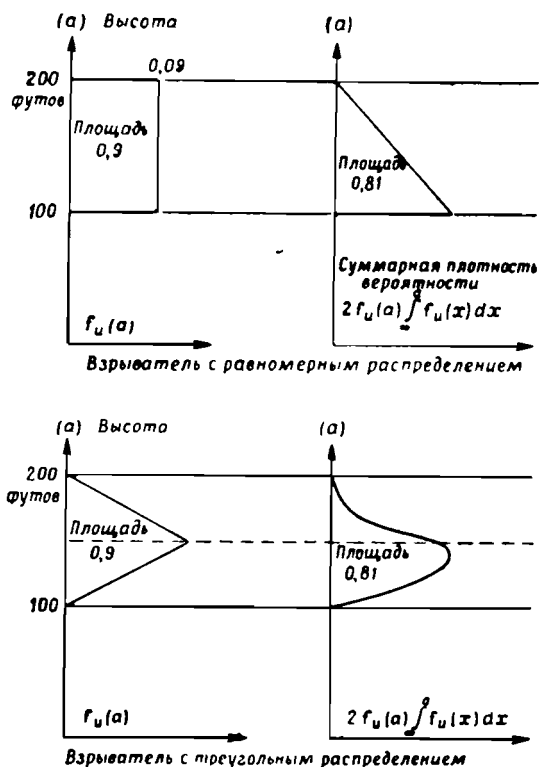


Рис. 8.5. Суммарная функция плотности двух взрывателей, настроенных на одну и ту же высоту (случай последовательного соединения).

интерес тот факт, что в данном случае оказывается справедливым следующее тождество:

$$2 \int_{-\infty}^0 f_u(a) da \int_0^{\infty} f_u(x) dx \equiv 2 \int_{-\infty}^0 f_u(a) da \int_a^0 f_u(x) dx \equiv F_u^2. \quad (8.90)$$

Иначе говоря, площади под кривыми 3 на рис. 8.4 и под соответствующими кривыми справа на рис. 8.5 оказываются одинаковыми. Пользуясь приведенной здесь методикой, можно было бы продолжать анализ и рассмотреть более сложные случаи использования дублирования, однако здесь мы этого делать не будем.

Читатель, конечно, понимает, что изложенный метод исследования результатов дублирования применим в принципе к взрывателям любого типа.

8.12. Дополнительные замечания относительно надежности

До сих пор предполагалось, что надежность может быть повышена путем применения дублирования; в настоящем параграфе будет рассмотрен вопрос о том, как повысить надежность путем уменьшения числа компонентов в дублирующем устройстве. Выше было показано, что вероятность срабатывания цепи из n последовательно соединенных элементов равна p^n , где p — вероятность срабатывания одного элемента. Любой прибор, устроенный таким образом, что несрабатывание одного элемента приводит к отказу в работе всего прибора, может рассматриваться как последовательная цепь. Поэтому по мере увеличения числа элементов в устройствах с чисто последовательным соединением надежность их действия снижается. Увеличение веса снаряда сверх допустимого также может являться препятствием для использования дублирования. Таким образом, *на практике следует выбирать систему с минимальным числом компонентов, но в то же время обеспечивающую требуемую надежность. Необходимо использовать надежно действующие компоненты. Более того, работа компонентов на максимальном режиме обычно оказывается менее надежной, чем на обычном режиме.* При соблюдении перечисленных условий обычно обеспечивается достаточная надежность работы приборов. К сожалению, хотя все соглашается с этими положениями, на практике их не всегда придерживаются.

При исследовании надежности не был рассмотрен вопрос о том, как распределяются требования обеспечения надежности между различными частями снаряда. Каждый конструктор отдельного агрегата снаряда естественно желает увеличения допусков на изготовление своего изделия. Однако совершенно очевидно, что если установить максимальные допуски для всех частей снаряда, кроме боевой части, и потребовать обеспечения надежности действия боевой части в 99,99%, то задача, стоящая перед конструктором боевой части, будет невыполнимой. Правильнее будет устанавливать надежность в соответствии с экономическими факторами, относительной сложностью и уровнем развития науки и техники. Боевые заряды из обычного взрывчатого вещества являются достаточно надежными и почти не нуждаются в допусках. Предохранительное устройство является довольно простым по сравнению с остальными частями снаряда и имеет небольшие размеры; использование дублирования позволяет повысить надежность предохранительного устройства до

такой степени, что оно вообще перестает влиять на надежность действия снаряда. Однако взрыватель может быть устроен так же сложно, как система управления; в этом случае разумно будет распределить допуски равномерно между ними. Никаких твердых правил на этот счет нет; решение проблемы зависит от ряда экономических, политических, исторических и других факторов.

По всем вопросам, касающимся надежности и организации производства систем и не затронутым в этой главе, отсылаем читателя ко второй и четвертой книгам настоящей серии. Целью написания данной главы было рассмотрение вопросов, специально относящихся к боевым частям и поэтому не затронутых в других разделах, и, кроме того, изложение некоторых личных взглядов автора.

ОЦЕНКА И ИСПЫТАНИЯ БОЕВЫХ ЧАСТЕЙ

9.1. Введение

Прежде чем ввести созданный образец в эксплуатацию, необходимо установить его соответствие тем первоначальным требованиям, которые были сформулированы перед началом проектирования. Оценка качества изделия производится группой специалистов, которым поручен контроль за его производством; если оценка должна базироваться на фактическом материале, необходимо провести специальные испытания. Когда получение нужных экспериментальных данных связано с проведением простых и сравнительно дешевых испытаний, обычно организация проведения требуемого числа испытаний не вызывает особых трудностей. Но испытания такого изделия, как комплекс управляемого снаряда, требуют огромных затрат времени и материальных средств. Поэтому в таких случаях необходимость проведения большого числа испытаний для накопления статистического материала должна быть достаточно обоснована.

Проведение испытаний боевых частей управляемых снарядов представляет исключительно трудную задачу, поскольку надежные результаты могут быть получены только при разрушении целей. Если эти цели по своим характеристикам и степени уязвимости не являются аналогами соответствующих объектов противника, то результаты испытаний не могут служить надежной основой для оценки боевых частей. В то же время создать цели, копирующие во всех отношениях объекты потенциального противника, в мирное время невозможно. Это проще всего показать на следующем примере. Допустим, что конструктор закончил разработку боевой части, снабженной термоядерным боевым зарядом. Едва ли удастся провести достаточное количество испытаний этой системы оружия в мирное время, поскольку многие ученые доказывают общественности, что массовые испытания такого оружия повысят общий уровень радиоактивности на нашей планете и создадут опасность для существования всего живого на земле. Таким образом, даже в том случае, когда экономически возможно создание реальных целей для испытания, сами свойства оружия воспрепятствуют проведению такого

количества испытаний, которое необходимо для накопления достаточных статистических данных.

Однако для того, чтобы проиллюстрировать трудности, стоящие перед конструктором боевой части, вовсе не обязательно ссылаться на пример с термоядерным оружием. Достаточно рассмотреть комплекс управляемого снаряда, используемый для борьбы с самолетами, чтобы убедиться в том, что идеальное решение проблемы испытаний невозможно. Даже в том случае, если удастся предугадать, какими будут вражеские самолеты, и изготовить точно такие же, очень трудно провести испытание, которое должно завершиться уничтожением пилотируемого самолета. Если же в качестве целей используются радиоуправляемые самолеты-мишени, то при обработке данных испытаний возникает проблема определения влияния управляемости мишени на ее уязвимость.

Итак, проведение испытаний комплекса управляемого снаряда в реальных условиях его использования невозможно до начала военных действий. В результате любая оценка вероятных боевых свойств оружия производится на основе экстраполяции данных, которые получены во время испытаний, рассчитанных на выявление максимальных характеристик. Ненадежность такой оценки может привести к серьезным ошибкам при принятии важных государственных решений; тем не менее это единственно возможный путь. Поэтому необходимо прилагать все усилия к тому, чтобы совершенствовать методы проведения испытаний, обработки их результатов и оценки качеств оружия. В конечном счете нужно сделать все, что в человеческих силах, чтобы превратить эти пока еще недостаточно надежные результаты в точный критерий боеспособности оружия. Ниже рассматриваются вопросы, связанные с решением данной проблемы.

9.2. Классификация испытаний

Испытания должны начинаться задолго до того, как будет полностью закончена отработка опытных образцов различных элементов боевых частей снаряда. Основные детали боевого заряда, взрывателя и предохранительного устройства должны пройти испытания в лабораторных и полигонных условиях. В ходе этих испытаний должно выясниться, удовлетворяют ли элементы боевой части требованиям, предъявляемым ко всему изделию в целом. Кроме того, должны быть определены и сопоставлены с проектными параметрами характеристики распространения и ослабления взрыва боевой части, а также характеристики действия взрывателя. Во время испытаний различных элементов предохранительного устройства необходимо определить основные параметры, относящиеся к надежности действия

и безопасности обращения с предохранительным устройством. Большинство из этих испытаний проводится в лабораториях, за исключением тех, которые необходимо проводить на открытых стендах. Одновременно начинаются работы по созданию испытательного оборудования и определению параметров, подлежащих измерению во время испытаний.

Затем приступают к широким комплексным испытаниям готовых образцов. Эти испытания могут быть полностью проведены в стенах лаборатории, причем применяются всевозможные способы для имитаций боевых условий. С этой целью разрабатываются специальные устройства для воспроизведения всеми доступными средствами режимов работы системы. Такие устройства используются для изучения способов применения системы оружия во всех возможных условиях.

Наконец, после того как будут исчерпаны все возможности проведения испытаний в лаборатории, изделия поступают на ракетный испытательный полигон, где впервые осуществляются летные испытания управляемых снарядов. Теперь приборы работают в реальных, а не искусственно созданных условиях, и, хотя обстановка, в которой протекают испытания, все же существенно отличается от действительных боевых условий, можно произвести некоторую корректировку данных лабораторных испытаний. Расхождения между результатами лабораторных и полигонных испытаний указывают на то, в каких областях первоначальные предположения были неправильными. Для улучшения методов проведения испытаний и совершенствования испытательного оборудования между полигоном и лабораторией устанавливается непрерывный обмен информацией.

Этот процесс продолжается до тех пор, пока не появится уверенность в успешном функционировании всей системы во время полета. Тогда приглашается специальная комиссия из представителей того вида вооруженных сил, который заказал новый образец оружия. Демонстрация действия снаряда производится в полевых условиях, а не в лаборатории. Для запуска используются пусковые устройства, являющиеся прототипом боевого стартового оборудования. Объекты, по которым производится стрельба, должны быть по своим характеристикам как можно более близки к самым совершенным целям. Если во время демонстрации будет показано, что комплекс управляемого снаряда удовлетворяет первоначальным тактико-техническим требованиям, то изготавливаются еще несколько таких же образцов и передаются специальным командам с целью проведения испытаний, которые будут служить основой для последующей оценки оружия в войсках.

Войсковые испытания состоят в использовании нового комплекса управляемого снаряда *боевыми расчетами* для стрельбы

по реальным целям и в обстановке, максимально приближенной к боевой. Если войсковые испытания дали положительные результаты, комплекс управляемого снаряда принимается на вооружение. Тогда начинается серийное производство нового образца, и готовые изделия поступают в распоряжение того военного ведомства, которое финансировало разработку проекта. С этого времени испытания ведутся в направлении дальнейших исследований и выработки норм времени для производства различных операций. Проведение завершающих испытаний в реальных боевых условиях, конечно, не осуществимо.

9.3. Проблемы испытания боевых зарядов

При испытаниях боевых зарядов должны быть разрешены три основные проблемы: установлена степень воздействия поражающего элемента на цели данного вида, определены характеристики распространения и ослабления действия боевого заряда и решен вопрос о том, поместится ли поражающий элемент боевого заряда в отведенном для него месте и выдержит ли он все условия, возникающие во время полета снаряда.

Для того чтобы оценить степень воздействия поражающего элемента, необходимо использовать целые боевые заряды (или их части) для поражения целей (или их частей). Обычно такого рода испытания проводятся в лабораторных условиях при неподвижном боевом заряде и неподвижной цели. Имитация движения цели или боевого заряда, как правило, не производится. Естественно, что определение характеристик распространения затруднено из-за близости земли и отсутствия движения боевого заряда. К оценке результатов испытаний нужно подходить очень осторожно, так как условия, при которых была поражена цель, могут быть совершенно не похожими на реальные, как, например, в случае воздушной цели. Кроме того, высота, температура и влажность во время испытаний могут не совпадать с действительными условиями применения снаряда или же могут не изменяться в тех диапазонах, которые указаны в тактико-технических требованиях.

Для приближения к реальным условиям полета без использования самого снаряда можно поднимать боевые заряды с помощью воздушных шаров, опускать на парашютах или же сбрасывать, как бомбы, с самолета. Для увеличения скорости полета такие бомбы могут быть снабжены реактивными двигателями. Однако в конце концов всегда наступает момент, когда все эти вспомогательные испытания в той или иной степени закончены и необходимо произвести испытания боевых зарядов в условиях, максимально близких к боевым. Для этой цели должны быть использованы управляемые снаряды.

Испытание боевого заряда на прочность, т. е. проверка того, выдержит ли конструкция боевого заряда нагрузки, возникающие во время полета, может быть произведено без стрельбы по конкретным целям и обычно вне всякой зависимости от работы системы управления. Но конечный этап испытаний требует, чтобы стрельба велась по определенной цели, причем она должна находиться в пределах зоны поражения боевого заряда. *Поэтому такие испытания нельзя проводить до тех пор, пока система управления не будет действовать достаточно точно и надежно.* Разработка конструкции снаряда и боевого заряда должна быть спланирована таким образом, чтобы они были готовы к заключительным летным испытаниям в одно и то же время. На основании анализа результатов этих испытаний производится оценка боевого заряда, как элемента боевой части.

9.4. Проблемы испытания предохранительных устройств

Испытание предохранительных устройств представляет менее сложную проблему, чем испытание боевых зарядов. Значительная часть всех необходимых испытаний может быть выполнена в лаборатории. Проверка статистическими методами безопасности работы с предохранительными устройствами совершенно невозможна, ибо необходимо подтвердить чрезвычайно высокую степень безопасности. Поэтому при испытаниях предохранительных устройств используются методы, оправдавшие себя при испытаниях других приборов. Эти методы позволяют оценить безопасность на основе предварительных данных и затем подкрепить первоначальное заключение путем проведения приемлемого числа испытаний. Испытания безопасности предохранительных устройств в обращении производятся в искусственно созданных условиях вибрации, тряски, воздействия ударной нагрузки и т. п. Эффективность работы детонационной цепи предохранительного устройства проверяется при использовании его для подрыва боевого заряда. Завершающими по-прежнему являются летные испытания, однако они служат не для проверки безопасности, а скорее для проверки надежности выключения предохранителя. Во время таких испытаний создаются условия, приближенные к боевым и отличные от тех, которые создавались в центрифугах и вибрационных машинах, только частично имитирующих условия полета.

9.5. Проблемы испытания взрывателей

Так же как и испытания боевых зарядов, испытания взрывателей проводятся на земле. Большая часть проблем, связанных с проверкой конструкции взрывателя, решается во время

стационарных лабораторных и полигонных испытаний, однако полностью создать в такой обстановке условия полета, конечно, не удастся.

Испытания конструкции взрывателя в целом и проверка правильности взаимодействия взрывателя со снарядом могут быть проведены еще до того, как будут решены проблемы, связанные с работой системы управления; однако для завершающих испытаний необходима цель. Если взрыватель является неконтактным, снаряд должен пролететь вблизи цели, если же взрыватель контактный, снаряд должен попасть прямо в цель. Для того чтобы не тратить понапрасну время и не расходовать зря взрыватели, необходимо использовать надежно работающую систему управления. Таким образом, заключительные испытания взрывателей в условиях полета снарядов могут проводиться только после того, как будет отработана система управления. Если в ходе таких испытаний будут обнаружены недостатки в конструкции взрывателя, то на их исправление понадобится определенное время и в результате возникнет задержка в выполнении программы создания управляемого снаряда. Это отставание программы создания взрывателя от программы создания всего снаряда — очень неприятная, но неизбежная вещь. Однако взрыватели имеют одно преимущество перед боевыми зарядами. Поскольку целью может служить земля, взрыватели, использующиеся для стрельбы по наземным целям, могут испытываться даже в случае неисправностей в системе управления. Но в тех случаях, когда при испытаниях производятся сложные измерения с помощью наземных приборов для определения характеристик работы взрывателя, система управления должна быть исправна, так как в противном случае снаряд может выйти из зоны измерений. Из всего сказанного выше следует, что летные испытания имеют чрезвычайно важное значение. Рассмотрим, какие этапы этих испытаний являются наиболее важными.

9.6. Задачи, решаемые на начальном этапе летных испытаний

Лабораторные и полигонные наземные испытания являются, безусловно, необходимыми, но в ходе таких испытаний не обеспечивается создание реальных условий применения боевых частей управляемых снарядов. Основными их недостатками являются невозможность распространения результатов наземных испытаний на случай полета снаряда, а также невозможность полной имитации условий полета. Условия боевого применения любого вида оружия никогда не могут быть достаточно точно воспроизведены в лаборатории, и управляемые снаряды не являются в этом смысле исключением. Поэтому одна из задач начального этапа летных испытаний состоит в том, чтобы подверг-

нуть боевую часть воздействию со стороны всех реальных полетных факторов, а также обнаружить недостатки конструкции, подлежащие устранению.

Кроме того, в лабораторных условиях нельзя выявить эксплуатационные качества боевой части с точки зрения удобства обращения с ней. Обслуживающий персонал производит монтаж, регулировку и проверку боевой части перед пуском снаряда. В период проведения начального этапа летных испытаний этот персонал участвует в разработке руководств службы и наставлений по боевому использованию оружия, а также в решении проблем, связанных с распределением функций между отдельными номерами расчета. Опыт эксплуатации боевых частей в полевых условиях помогает внести такие изменения в конструкцию, которые сводят к минимуму предпусковые операции с боевой частью и вредные последствия неправильного обращения с ней.

Последняя по счету, но не по важности задача начального этапа летных испытаний состоит в проверке правильности взаимодействия всех составных частей комплекса управляемого снаряда. Вопросам взаимодействия уделяется много внимания со стороны конструкторов различных частей снаряда в период разработки конструкции этих элементов, но никакой обмен информацией не заменит действительной проверки взаимодействия частей снаряда во время полета. В ходе летных испытаний решаются проблемы эксплуатации и взаимосвязи, определяется расхождение между летными характеристиками и параметрами, полученными в лабораторных условиях и т. д. Результаты испытаний сообщаются в лаборатории для того, чтобы замеченные недостатки были устранены.

9.7. Недостатки летных испытаний, проводящихся с исследовательскими целями

Хотя летные испытания являются наиболее полными и всесторонними испытаниями комплекса управляемого снаряда, во время этих испытаний не обеспечивается создание реальных условий боевой обстановки. Первый этап летных испытаний проводится все еще в искусственных условиях, хотя уже не в лабораториях, а на испытательных полигонах. Персонал, проводящий эти испытания, имеет значительно более высокую квалификацию, чем боевые расчеты в войсках. Руководство и инспекция состоят обычно из инженеров и специалистов, имеющих большой опыт эксплуатации испытываемого комплекса управляемого снаряда. Такие условия обслуживания системы не типичны для войск. Однако следует отметить, что они не обязательно отличаются в лучшую сторону. Правда, пока происходит доводка системы, обслуживание ведется весьма тщательно. Но после устранения основных

неполадок случается, что квалифицированный персонал в силу естественного для него желания экспериментировать допускает грубые нарушения правил обращения с боевой частью, чего не могло бы случиться при эксплуатации системы в войсках.

Другим недостатком летных испытаний является то обстоятельство, что на первом этапе испытаний еще не разработаны правила обращения со снарядом и методика измерений. Поэтому многие из запусков снарядов могут оказаться бесполезными и не дать никаких результатов либо из-за неудовлетворительных измерений, либо из-за неправильного обращения. Организация измерений во время полета снаряда дело не простое. Мало того, что приходится разрабатывать и создавать совершенно новые системы измерительных приборов, необходимо еще освоить эти приборы и в конце концов превратить их в надежные и проверенные инструменты для получения достоверных данных. В результате начальный этап летных испытаний часто оказывается весьма дорогостоящим средством добывания необходимых данных и служит главным образом для того, чтобы провести тренировку обслуживающего персонала и отладку системы измерительных приборов.

9.8. Войсковые испытания

Представители вооруженных сил понимают, что летные испытания, проводимые подрядчиком, являются по своей природе слишком искусственными и не могут служить средством для оценки комплекса управляемого снаряда как вида вооружения. С этой целью организуется проведение еще одной серии летных испытаний — войсковых. Войсковые испытания проводятся, насколько это возможно, силами воинских подразделений в условиях, приближающихся к боевым. Правда, условия несколько отличаются от реальных, так как боевые расчеты, впервые испытывающие новый образец управляемого снаряда, формируются из специально отобранных людей. Естественно, что такой отборный персонал должен более добросовестно выполнять свои обязанности, чем средние боевые расчеты во время войны.

Возникает и ряд других проблем. Трудно создать вполне реальные цели для стрельбы; проведение громадного числа полетов при самых различных условиях требует слишком больших затрат, несмотря на то, что накопление статистических данных является, безусловно, желательным. Тем не менее войсковые оценочные летные испытания являются последним испытанием управляемого снаряда, если не считать его первого боевого применения. На результатах этих испытаний государственные и военные руководители должны основывать свои решения о пригодности оружия. На ранней стадии разработки принципиально но-

вой системы оружия эти решения могут быть не столь обоснованными, как по прошествии нескольких лет, когда будет приобретен опыт эксплуатации. Искусство создания управляемых снарядов находится еще в младенческом возрасте, несмотря на то, что такие снаряды применялись уже во время второй мировой войны.

9.9. Характеристики боевых частей, определяемые во время летных испытаний

Некоторые результаты испытания боевого заряда не требуют измерения; например, цель может быть повреждена до такой степени, что не понадобится специального исследования обломков для того, чтобы убедиться в полном выводе ее из строя. Но в некоторых случаях результаты взрыва боевой части не являются столь очевидными. Какова бы ни была степень повреждения, полезно мысленно представить себе момент взрыва боевой части, поскольку только таким путем конструктор боевого заряда может исследовать его механизм действия. Для определения оптимальных характеристик боевого заряда или для замены боевого заряда одного типа другим, а также для дальнейшего развития этой области науки и техники необходимо накапливать данные испытаний.

Обломки цели должны быть исследованы для того, чтобы определить размеры разрушений и установить, какими способами можно достичь желаемого результата. Следует различать разрушения, являющиеся непосредственным результатом взрыва боевого заряда, и те повреждения отдельных элементов цели, которые возникли вследствие этих разрушений. Если повреждения оказываются слишком незначительными, чтобы привести к уничтожению цели, должны быть приглашены специальные эксперты для оценки возможных результатов этого повреждения.

Для исследования ослабления действия взрыва и характеристик распространения поражающих элементов необходимо организовать измерение параметров траектории снаряда относительно цели и определить точку на траектории, где произошел взрыв. Может быть также использован метод исследования степени повреждения в зависимости от траектории снаряда по отношению к цели.

Определение характеристик предохранительного устройства представляет более простую задачу. Для определения моментов срабатывания различных элементов предохранительного устройства используется телеметрическая система передачи данных. Ускорения, испытываемые предохранительными устройствами, определяются по параметрам траектории, а также измеряются акселерометрами, расположенными на борту снаряда, показания

которых передаются телеметрическим способом на землю. Единственная проблема заключается в создании достаточного числа каналов в телеметрической системе для передачи данных, необходимых конструктору предохранительного устройства. Однако, к сожалению, ни один снаряд не имеет достаточно свободного места для размещения устройств, обеспечивающих передачу всех необходимых конструкторам различных частей снаряда данных. Поэтому конструкторам приходится обычно довольствоваться меньшим объемом информации, чем они желают.

Характеристики взрывателей определяются с помощью различных измерительных приборов; для передачи данных на землю используются телеметрические системы. Определение траектории полета цели относительно снаряда производится посредством фотографических и других способов. Доказательством того, что взрыватель сработал и вызвал детонацию боевого заряда (при выключенном предохранительном устройстве), является разрыв дымовой шашки или практической боевой части, или же взрыв реального боевого заряда. Характеристика направленности неконтактного взрывателя может быть получена, если известны параметры траектории снаряда относительно цели и точка взрыва боевого заряда. Если взрыватель контактного типа, то получение точных характеристик его действия сопряжено с большими трудностями. Но в этих случаях можно ограничиться подрывом боевых зарядов на земле.

9.10. Проблемы анализа результатов испытаний

Оценка образца, являющаяся целью летных испытаний, не может быть сделана до тех пор, пока не будут проанализированы результаты. Именно при анализе результатов выясняется, насколько успешно прошли испытания, и производится деление всех испытаний на «зачетные» и «незачетные». Испытания оказываются «незачетными» либо в тех случаях, когда снаряд не обеспечивает выполнения условий испытания, т. е. не доставляет боевую часть на такое расстояние к цели, на котором последняя может быть поражена; либо когда собранные данные являются недостаточно полными; либо, наконец, когда некоторые измерительные приборы работают с ошибками. Если испытание признается «зачетным», то следует затем решить, является ли оно «удачным» или «неудачным». Решение зависит от того, с какой стороны рассматриваются данные испытания. Если подходить к их оценке всесторонне, то испытания, неудачные с точки зрения решения какой-нибудь частной проблемы, могут оказаться, наоборот, удачными с исследовательской точки зрения (когда, например, они помогли установить причину неудовлетворительных характеристик системы). Редкое испытание не дает

вообще никаких результатов, но иногда полученные данные оказываются весьма скудными. Это объясняется сложностью всего оборудования и в особенности измерительной аппаратуры, а также трудностью обеспечения надежного действия не только самого комплекса управляемого снаряда, но и всей сложнейшей системы измерительных приборов, целей и предохранительных устройств.

На этом заканчивается рассмотрение проблем, связанных с боевыми частями управляемых снарядов. Более подробное изложение вопросов, связанных с полигонными и летными испытаниями, можно найти в разделе «Полигонные испытания» пятой книги настоящей серии.

ЛИТЕРАТУРА

Книги

- Boysce J. C., *New Weapons for Air Warfare*, Science in World War II, Little, Brown, 1947.
Burchardt J., *Rockets, Guns and Targets*, Atlantic, Little, Brown, 1948.
Glasstone S., *Source Book on Atomic Energy*, D. Van Nostrand, 1950.
Halliday D., *Introductory Nuclear Physics*, John Wiley and Sons, 1950.
«Effects of Atomic Weapons», McGraw-Hill Book Co., New York, 1950.
Smyth H. D., *Atomic Energy for Military Purposes*, Princeton Univ. Press, 1947.
Suits, Harrison and Jordan, *Applied Physics*, Science in World War II, Little Brown, 1948.
Thiesmeyer and Burchardt, *Combat Scientists*, Science in World War II, Atlantic, Little, Brown, 1947.

Журнальные статьи

- Bonner H. M., *Radio Proximity Fuse*, Electrical Engineering, vol. 66, № 9, September 1947.
Eddy G. G., *Pilbox Buster*, Army Ordnance, vol. 28, № 150, May-June 1945.
Hinman W. S., jr., and Brunetti C., *Radio Proximity Fuze Development*, Proceedings of the IRE, vol. 34, № 12, December 1946.
Huntoon R. D. and Miller B. J., *Generator-Power Proximity Fuze*, Electronics, vol. 18, № 12, December 1945.
McDonnell, *Medical Aspects of Atomic Bomb*, Ordnance, vol. 34, № 179, March-April 1950.
Morton H. S., *VT Fuze*, Army Ordnance, vol. 30, № 154, January-February 1946.
Page C. H. and Astin A. V., *Survey of Proximity Fuze Development*, American Journal of Physics, vol. 15, № 2, March-April 1947.
Taylor G., *Formation of Blast Waves by Very Intense Explosion*, Royal Society Proceedings, vol. 201, № 1065, March 22, 1950.
Zupe F. O., *Optical Proximity Fuse*, Machine Design, vol. 19, № 7, February 1947.

ЧАСТЬ III
ПУСК СНАРЯДОВ

ВСТУПЛЕНИЕ

Большинство пусковых систем¹ снарядов и конструкций пусковых установок было разработано на основе опыта, приобретенного при проектировании функционально сходных конструкций в строительной технике и авиации. Надо сказать, что о проектировании таких систем опубликовано очень мало сведений, даже в закрытой литературе. Поэтому данный раздел написан главным образом на основании большого личного опыта авторов по испытанию и оценке многочисленных авиационных и наземных пусковых установок и пусковых систем, а также по разработке способов запуска снарядов.

Все три основных автора в процессе подготовки данного раздела работали в тесном сотрудничестве, так что изложенный здесь материал является в значительной мере плодом дискуссий и взаимного обмена идеями. Следовательно, об индивидуальном вкладе каждого из авторов можно говорить только в самом общем смысле. Вилли Фидлеру принадлежит большая часть материала, посвященного соображениям о проектировании корабельных пусковых устройств, Льюис Лик изложил то же самое для авиационных пусковых установок. Я постарался объединить различные части раздела в единое целое и подчеркнуть, что к решению данных частных вопросов проектирования следует подходить с точки зрения комплекса управляемого снаряда в целом.

Авторы весьма признательны многим своим коллегам за оказанную помощь, и в особенности Мануэлю Гарсиа за подготовку большей части материала по основам проектирования конструкций, Теодору Штурму за обсуждение проблем, связанных с управлением снарядами, и Дональду Пауэру за значительную часть материала по эксплуатации и устройству пусковых установок.

Р. Гельмгольц

Пойнт-Мугу, Калифорния.

¹ Под пусковой системой (launching configuration) автор понимает совокупность снаряда и стартового двигателя, а в некоторых случаях также и стартовой установки. — *Прим. ред.*

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПУСКЕ СНАРЯДОВ

1.1. Введение

Решение многочисленных проблем, связанных с пуском управляемых снарядов, не требует создания каких-то новых отраслей науки. Нужна лишь тщательная оценка и ясная постановка задачи, за которыми должно следовать разумное применение существующих знаний и технических средств. Метод решения обычно бывает ясен, когда проблема полностью изучена. По этой причине основная цель данного раздела состоит в том, чтобы осветить некоторые наиболее неясные проблемы пуска, а также те связанные с ним вопросы, на которые обычно не обращают должного внимания.

1.2. Общие соображения

Силы, разгоняющие снаряд. При запуске снаряда прежде всего происходит разгон снаряда от состояния покоя (по отношению к пусковой установке) до некоторой полетной скорости. Сила, необходимая для разгона, создается либо вспомогательным жидкостным или пороховым двигателем, либо газовой или паровой катапульты, либо двигателем самого снаряда. Каждое из этих средств может применяться как самостоятельно, так и в комбинации с другим средством. Как правило, действие указанных сил на снаряд сопровождается весьма значительными нагрузками, а также ударами и вибрациями.

Средняя величина ускорения в процессе движения снаряда по траектории может быть иногда меньше чем $2g$, однако обычно эти ускорения достигают величин порядка $30g$. Кроме того, при воспламенении топлива в двигателе, при его неустойчивой работе, при срабатывании срезных болтов, а также в результате действия ряда других факторов возникают кратковременные ускорения, величина которых может во много раз превышать указанные выше средние величины ускорений.

В некоторых простых управляемых снарядах типа планирующих бомб необходимое ускорение создается благодаря действию силы тяжести.

Влияние ударной волны и реактивной струи. Кратковременные и установившиеся нагрузки, действующие на снаряд в процессе его разгона, часто определяют те критерии, которыми надлежит руководствоваться при проектировании системы оружия. Однако имеются еще нагрузки и другие факторы, воздействующие на пусковую установку, которыми нельзя пренебрегать. Так, горение воспламенителя и воспламенение топлива в двигателе не только создают ударные нагрузки на устройства, крепящие двигатель к снаряду, но могут также вызывать появление ударных волн, которые действуют на пусковую установку.

Запуск снарядов, создающих сильную ударную волну, с расположенных под крылом установок может привести к повреждению

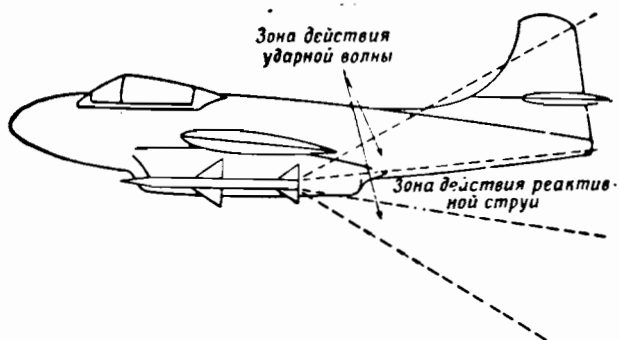


Рис. 1.1. Типичный конус действия ударной волны.

органов управления и фюзеляжа самолета, а при многократном его повторении возможен прогрессивный износ некоторых частей конструкции самолета. Но если повреждение как непосредственный результат запуска обнаружить очень легко, то предугадать конечный результат повторяющегося действия ударных волн на элементы конструкции самолета весьма трудно. Какая часть самолета при этом будет наиболее сильно повреждена — крыло или, скажем, хвостовое оперение, — зависит от того, где и когда возникает ударная волна. Обычно это происходит либо непосредственно перед началом движения снаряда, либо в первый момент после начала его движения. Из рис. 1.1, на котором приблизительно изображены конус хвостовой ударной волны и конус распространения реактивной струи для типичного порохового двигателя, видно, что наиболее сильному воздействию подвергается горизонтальное оперение.

Струя газов, образующаяся при работе турбореактивных и пульсирующих двигателей, имеет более низкую температуру и скорость, чем истекающая из сопла пороховых двигателей. Тем

не менее во многих случаях температура истекающих газов и ударные волны, образующиеся при работе этих двигателей, могут повредить пусковую установку.

При жестком запуске любого двигателя, а также при нормальной работе пульсирующих двигателей образуются ударные волны большой силы. Кроме того, то обстоятельство, что для прогрева воздушно-реактивных двигателей требуется довольно большой промежуток времени, заставляет учитывать и воздействие тепла, выделяемого истекающими газами и самим работающим двигателем.

Газовая струя, вытекающая из сопла порохового и жидкостного двигателя, имеет такую большую скорость и такую высокую температуру, что любой из известных конструкционных материалов, помещенный в струю вблизи сопла, будет быстро разрушен. В этом заключается одна из причин того, почему метод изменения направления струи при помощи специальных лопаток (**газовых рулей**) никогда не был особенно практичным. В струе могут содержаться частицы материалов, из которых изготовлен двигатель, и даже на значительном удалении от сопла будет наблюдаться турбулентное течение с высокой скоростью.

Большой шум, сопровождающий работу двигателя, может вызвать неисправности в работе элементов снаряда или даже выход их из строя.

Способы пуска и пусковые системы. Существует много факторов, способных повлиять на выбор пусковой системы и способа пуска снаряда. Выбор устройств или двигателей для разгона обычно достаточно широк, однако практически он ограничен теми средствами, которые имеются в распоряжении и могут быть использованы в данной тактической обстановке. К тому же разгон снаряда до определенной скорости полета является лишь одним из многих условий, необходимых для успешного запуска. Главным из них является то, что снаряд должен быть запущен по требуемой траектории в устойчивом положении.

Кроме того, пуск не должен сопровождаться повреждениями снаряда или пусковой установки, а также не должен вызывать серьезных неисправностей в работе элементов снаряда. Для многих снарядов эти последние требования определяют возможный способ запуска.

Другими факторами, влияющими на выбор пусковых систем и способов пуска, являются размеры и вес снаряда, расчетная скорость и высота полета, степень сложности в эксплуатации, а также ожидаемая тактическая обстановка. Например, снаряд, предназначенный для полета в стратосферу, запускается обычно вертикально и с малым ускорением в начале полета; отчасти это происходит из-за того, что для разгона с большим ускорением потребовались бы громадные силы. С другой стороны, для того

чтобы достигнуть оптимального соотношения между дальностью и скоростью, дальнобойные снаряды небаллистического типа должны иметь скорость, меньшую чем скорость звука. Эти снаряды используют аэродинамические поверхности для набора высоты и могут быть запущены только при малых углах атаки.

Прежде чем перейти к детальному рассмотрению способов пуска и пусковых систем, необходимо сделать обзор некоторых основных теоретических принципов проектирования конструкций, рассмотреть характеристики стартовых двигателей, а также условия, при которых должен происходить запуск. Изложению этих вопросов и будет посвящена данная глава.

1.3. Основные вопросы расчета пусковых установок на прочность

Анализ нагрузок. При проектировании пусковой установки существенным моментом является оценка нагрузок, действующих на пусковую установку со стороны снаряда в его «активном» и «пассивном» состояниях. Эти нагрузки зависят от нескольких переменных; их численные значения конструктор может определить, зная реальные условия работы пусковой установки. Наиболее вероятно, что это будут не вполне реальные данные, полученные из комбинации известных и предполагаемых величин.

Рассмотрим снаряд, находящийся в «пассивном» состоянии — в покое. В этом случае нагрузка, действующая на пусковую установку, является функцией веса снаряда, характеристик основания, на котором пусковая установка смонтирована (грунт, самолет и т. д.), и давления, создаваемого ветром. Нагрузка, создаваемая весом снаряда, определяется просто, и ее можно легко распределить между отдельными элементами пусковой установки, если ее схема уже выбрана. Воздействие ветра на поверхность снаряда и пусковой установки можно также легко выразить в виде нагрузок, которые опять-таки можно распределить между отдельными элементами установки.

Несколько менее очевидны нагрузки, зависящие от типа основания, на котором смонтирована пусковая установка. Если она установлена на земле, то единственными нагрузками, действующими на пусковую установку при «пассивном» положении снаряда, являются те, о которых упоминалось выше. Если же пусковая установка смонтирована на подвижном основании — например на корабле, самолете или автоприцепе, — то она будет подвергаться инерционным нагрузкам, равным произведению массы снаряда и пусковой установки на составляющие как линейных, так и угловых¹ ускорений основания, на котором

¹ В отношении угловых ускорений точнее было бы воспользоваться понятием момента инерции, а не массой. — *Прим. перев.*

пусковая установка смонтирована. Поскольку эти нагрузки могут быть очень большими, то очень важно, чтобы были определены максимальные значения указанных ускорений и чтобы вызываемые ими инерционные нагрузки были рассчитаны и учтены при окончательной разработке конструкции пускового устройства. При «активном» положении снаряда, т. е. во время его разгона, возникают дополнительные нагрузки на пусковую установку и изменяется характер рассмотренных выше нагрузок, поскольку масса снаряда уже не является неподвижной относительно пусковой установки.

Теперь уже при анализе конструкции необходимо учесть и эти динамические нагрузки, включая и возможные ударные нагрузки. Более того, на пусковую установку в период разгона снаряда могут действовать реактивная струя и ударная волна, а также добавочные боковые нагрузки, возникающие из-за несовпадения направления тяги с направлением движения снаряда.

В случае если запуск производится с помощью нескольких стартовых двигателей, может оказаться, что один или несколько двигателей совсем откажут или начнут работать с запозданием, что приведет к несбалансированной тяге и к возникновению чрезвычайных боковых нагрузок.

Как только определены максимальные нагрузки, возникает проблема распределения этих нагрузок между отдельными конструктивными элементами пусковой установки. Пусковая установка, если исключить случай сплошной конструкции, является, по существу, фермой, поэтому данная проблема относится к области расчета ферм. К сожалению, большинство пусковых установок либо являются сплошными, либо представляют собой статически неопределимые конструкции, а это автоматически выводит анализ из сферы применимости элементарной статике.

В этих случаях, если известен характер нагрузок, можно посоветовать обратиться к более сложным курсам¹ по анализу конструкций в области авиации или в строительной механике, где разработаны методы расчета таких конструкций.

Анализ напряжений. Анализ конструкции фермы пусковой установки позволяет найти распределение нагрузки, действующей на пусковую установку, между отдельными элементами фермы. Эти нагрузки классифицируются затем по виду и величине. На основе этих данных можно найти распределение напряжений в каждом элементе конструкции и, задаваясь допустимыми

¹ Имеется много работ, которые можно использовать, например: Timoshenko and Young, Theory of Structures, McGraw-Hill Book Co., Inc., New York; Bruhn, Analysis and Design of Airplane Structures, John S. Swift Co., New York.

рабочими напряжениями, выбрать оптимальную конструктивную форму этих элементов.

На каждый элемент конструкции может действовать одна или несколько из следующих нагрузок: растяжение, сжатие, изгиб, срез и кручение.

Простейшее распределение напряжений, возникающих в каждом из элементов конструкции под действием указанных выше нагрузок, можно легко определить по формулам, известным из курса сопротивления материалов; если же известны допустимые напряжения, то можно вычислить требуемую площадь поперечного сечения и момент сопротивления поперечного сечения элемента.

При этих расчетах предполагается, что при воздействии на элемент растягивающего, сжимающего или срезающего усилия нагрузка распределена по всему сечению элемента равномерно, поэтому напряжение в данном сечении находится путем деления прикладываемой нагрузки на площадь поперечного сечения.

Конечно, имеет место и обратное: по известной нагрузке и величине допустимого напряжения можно определить требуемую площадь поперечного сечения элемента. Напряжения, возникающие при действии простого растягивающего усилия, выражаются формулой

$$\sigma_D = \frac{P_A}{A_R}, \quad (1.1)$$

где

- σ_D — напряжение при простом растяжении;
- P_A — действующая нагрузка (это может быть растягивающее, сжимающее или срезающее усилие);
- A_R — площадь поперечного сечения элемента, перпендикулярная к направлению действующей нагрузки в случае растяжения или сжатия и параллельная в случае среза.

Уравнение (1.1) справедливо при следующих условиях:

- а) направление действия силы должно проходить через центр поперечного сечения;

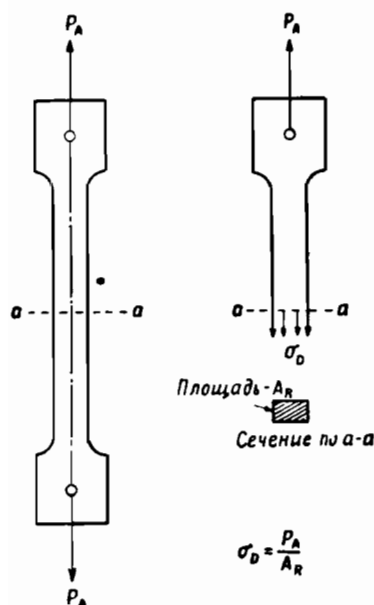


Рис. 1.2. Напряжения, возникающие при растяжении.

б) в сечении, для которого ведется расчет, не должно быть резких изменений;

в) продольный изгиб элемента под действием сжимающей нагрузки должен быть пренебрежимо малым.

Физический смысл величин, входящих в формулу для определения напряжений при простом растяжении, виден из рис. 1.2, где показан стержень, на который действуют приложенные вдоль его продольной оси силы.

В элементах, подвергающихся действию поперечных нагрузок или неуравновешенных моментов, приложенных к концам, возникают горизонтальные и вертикальные напряжения среза, а также напряжения изгиба. Касательные напряжения при горизонтальном и вертикальном срезе равны между собой в любой точке поперечного сечения и легко определяются для любого сечения, если перерезывающая сила для этого сечения уже вычислена. Этот случай показан на рис. 1.3. Формула для касательных напряжений имеет следующий вид:

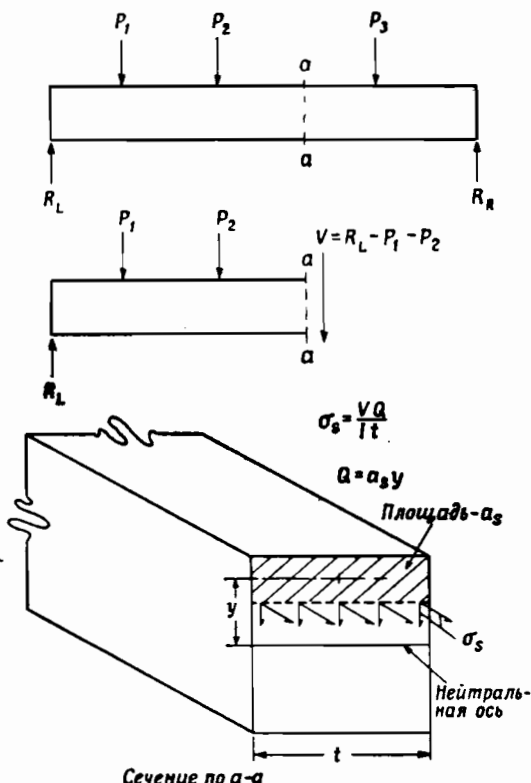


Рис. 1.3. Горизонтальные и вертикальные напряжения среза.

$$\sigma_s = \frac{VQ}{It}, \quad (1.2)$$

где

σ_s — горизонтальное или вертикальное касательное напряжение;

V — суммарная перерезывающая сила;

I — момент инерции элемента относительно нейтральной оси в том сечении, для которого производится расчет;

Q — статический момент части площади поперечного сечения, находящейся между крайними волокнами и продольной плоскостью, для которой вычисляются горизонтальные касательные напряжения (статический момент берется относительно нейтральной оси поперечного сечения);

t — толщина поперечного сечения в продольной плоскости, для которой рассчитываются горизонтальные касательные напряжения.

Касательные напряжения имеют минимальную величину для крайних волокон и максимальны для нейтральной оси поперечного сечения. Характер изменения касательных напряжений по высоте между этими предельными значениями зависит только от формы поперечного сечения; простейшим случаем является случай прямоугольного сечения, для которого это распределение является параболическим.

Напряжения изгиба в элементе возникают вследствие изгибающих моментов. Эти напряжения распределяются по сечению элемента линейно и равны нулю на его нейтральной оси (рис. 1.4). Максимальные напряжения возникают в наиболее удаленных крайних волокнах. Если моменты изгибают элемент вниз, то в нижней его части возникают растягивающие напряжения, а в верхней части — сжимающие. Если направление изгиба элемента изменяется, то меняют знак и напряжения. Они определяются по известному уравнению

$$\sigma_r = \frac{Mc}{I}, \quad (1.3)$$

где

σ_r — напряжение изгиба;

M — изгибающий момент в сечении, для которого производится расчет;

c — расстояние от нейтральной оси или центра поперечного сечения до его наиболее удаленной кромки, параллельной нейтральной оси;

I — момент инерции поперечного сечения относительно нейтральной оси.

Целый ряд факторов ограничивает применение уравнения (1.3) для напряжений изгиба, по крайней мере в теоретическом плане. На практике многие из них не учитываются ввиду того, что их влияние незначительно, а применяемые при проектировании коэффициенты безопасности обеспечивают достаточный запас прочности.

Тем не менее имеются определенные ограничения, игнорировать которые нельзя. Так, например, изгиб элемента должен быть незначительным; осевые нагрузки на элемент не допускаются,

особенно сжимающие. Поперечное сечение должно иметь хотя бы одну ось симметрии, а внешние моменты или поперечные нагрузки должны лежать в плоскости, в которой находится эта ось симметрии; или же плоскость симметрии должна иметь центр жесткости, а поперечные нагрузки должны лежать в плоскости, перпендикулярной нейтральной оси и проходящей через этот центр жесткости. Последние два из этих ограничений исключают всякую возможность приложения крутящих нагрузок. Кроме того, элемент конструкции должен быть однородным и изотропным.

Параметры, связанные с уравнением для горизонтальных и вертикальных касательных напряжений и уравнением для напряжений изгиба, иллюстрируются соответственно на рис. 1.3 и 1.4. Для наглядности на каждом рисунке внутренние силы или моменты сопротивления для каждого вида нагрузки показаны отдельно, практически же эти нагрузки действуют совместно.

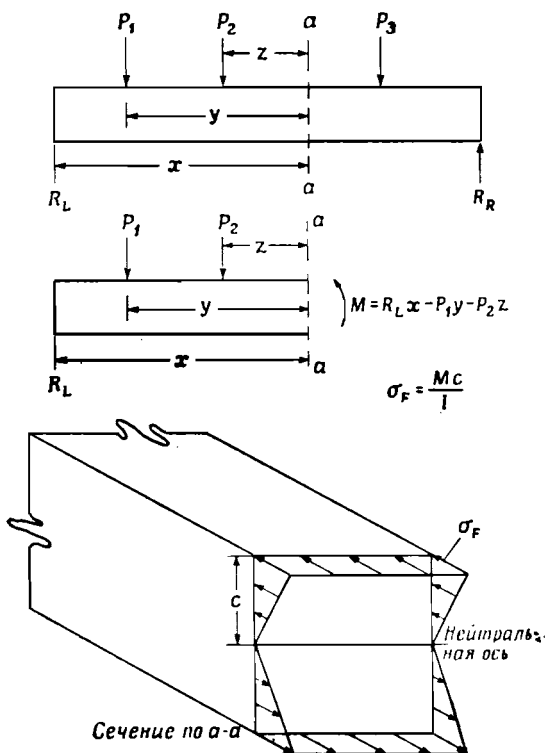


Рис. 1.4. Напряжения изгиба.

Разрушение при сжатии появляется в двух формах, в зависимости от геометрической формы балки, определяемой отношением L/r , где L — длина балки, а r — наименьший радиус инерции поперечного сечения. Для каждого материала имеется критическое значение L/r , дальнейшее уменьшение которого приводит к разрушению балки из-за возникающих напряжений сжатия, определяемых по формуле (1.1) для простого сжатия, и равных по величине пределу прочности для данного материала. При величине отношения L/r выше критической разрушение происходит в форме продольного изгиба. Поскольку разрушения при продольном изгибе происходят очень быстро и, как правило,

неожиданно, то сжимающие нагрузки представляют большую опасность.

Напряжения, вызывающие разрушение из-за продольного изгиба, могут быть подсчитаны по уравнению Эйлера:

$$\sigma_{CR} = \frac{K\pi^2 E}{\left(\frac{L}{r}\right)^2}, \quad (1.4)$$

где

σ_{CR} — критическое напряжение;

E — модуль упругости;

L — длина балки;

r — наименьший радиус инерции;

K — постоянная, зависящая от способа закрепления концов балки.

На рис. 1.5 показана шарнирно закрепленная балка и продольный изгиб этой балки при различном закреплении концов. Приведены также значения величины K для каждого случая закрепления. Нагрузка P может быть определена путем умножения критического напряжения на площадь поперечного сечения стойки. Если это критическое напряжение известно, то для каждой приложенной нагрузки можно рассчитать минимальную площадь поперечного сечения. Радиус инерции этой площади должен быть равен или больше радиуса, используемого в указанном уравнении.

Уравнение (1.4) выведено аналитически для случая прогиба простых стержней или элементов, подверженных сжатию. Имеется большое количество эмпирических уравнений, полученных из экспериментальных данных, которые могут быть использованы при проектировании элементов пусковых установок¹.

Применение уравнений такого рода требует от конструктора осторожности, так как эти уравнения часто включают коэффициент безопасности и отражают влияние свойств конкретных материалов. Насколько это справедливо — зависит от источников, из которых получены эти эмпирические уравнения.

Напряжения, возникающие в элементах конструкции под действием крутящих нагрузок, являются касательными напряжениями, которые действуют в плоскостях, параллельных плоскости приложения крутящей нагрузки. Для случая круглого стержня эти напряжения определяются формулой

$$\sigma_s = \frac{Tc}{J}, \quad (1.5)$$

¹ Seely, Resistance of Materials, 3rd Ed., John Wiley and Sons, Inc., New York.

где

σ_g — касательное напряжение;

T — крутящий момент;

c — расстояние от центра до крайнего слоя волокон;

J — полярный момент инерции поперечного сечения.

Напряжения распределены линейно вдоль радиуса от нуля в центре элемента до максимума на периферии.

Параметры, входящие в приведенное выше уравнение, показаны на рис. 1.6, на котором изображен круглый вал, один конец которого закреплен, а другой свободен. Крутящий момент T приложен к свободному концу; показаны касательные напряжения, линейно возрастающие по мере удаления от центра вала.

Область применения этого уравнения весьма ограничена: нагрузка должна быть только крутящей, элемент должен быть однородным и изотропным и, что более важно, должен иметь круглое поперечное сечение. Остальные ограничения обычно учитываются введением коэффициентов безопасности.

Уравнения для определения напряжений при простом сжатии, изгибе и кручении обычно справедливы только для действия нагрузки соответствующего вида. Если же нагрузка представляет собой комбинацию нескольких нагрузок различного вида, то результирующее напряжение находится как алгебраическая сумма отдельных напряжений при условии, что природа этих напряжений одинакова (т. е. нормальное напряже-

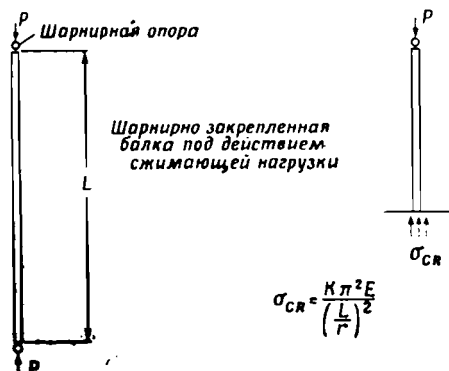


Рис. 1.5, а. Изгиб балки под действием критической нагрузки.

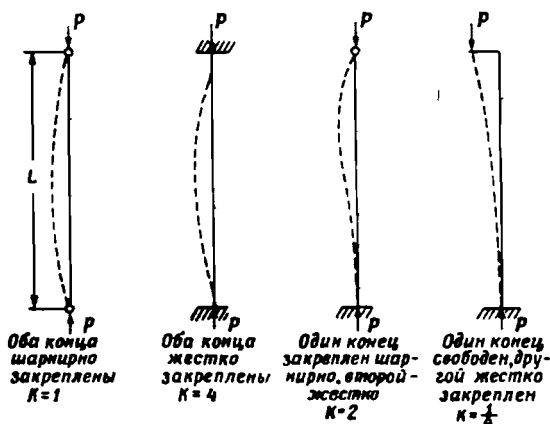
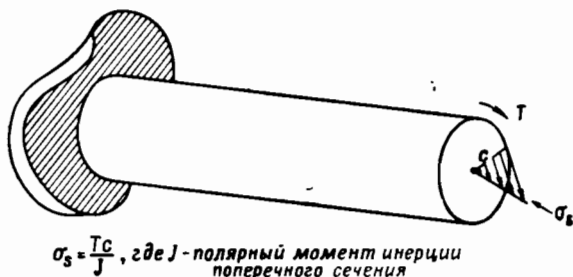


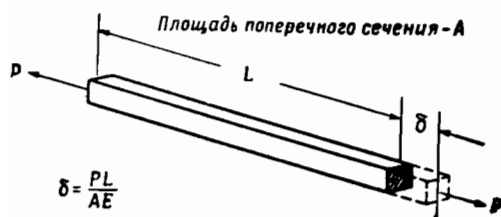
Рис. 1.5, б. Балка под действием сжимающей нагрузки.

ние нельзя суммировать с касательными напряжениями). Этот прием основан на принципе суперпозиции и может быть применен лишь тогда, когда между нагрузкой и вызываемым ею напряжением сохраняется линейная зависимость или, иными словами, напряжения не превышают предела упругости, а деформации небольшие.



Р и с. 1.6. Скручивающая нагрузка.

Перемещения и деформации. При анализе конструкций рамного и каркасного типа, а также механизмов имеется два вида перемещений, которые представляют интерес: внешние перемещения в виде прогибов, удлинений или углов закручивания и внутренние перемещения плоскостей элемента конструкции.



Р и с. 1.7. Удлинение балки.

Внешние перемещения являются функциями нагрузки и сами по себе могут иметь характер разрушений. Например, чрезмерные перемещения могут влиять на работу подвижных частей.

Удлинения обычно возникают в результате действия продольных растягивающих нагрузок и могут быть просто определены из выражения

$$\delta = \frac{PL}{AE}, \quad (1.6)$$

где δ — перемещение; P — нагрузка; L — начальная длина; A — площадь поперечного сечения; E — модуль упругости (рис. 1.7). Отрицательное удлинение вызывается, естественно, действием сжимающей нагрузки и может быть определено из этого же уравнения при условии, что продольного изгиба не происходит.

Прогибы при изгибе определяются несколько сложнее, так как они зависят не только от величины нагрузки, но и от распре-

деления нагрузки по элементу конструкции. Общее уравнение для прогибов при изгибе таково:

$$\Delta = \frac{KPL^3}{EI}, \quad (1.7)$$

где Δ — прогиб; P — нагрузка; L — длина балки; K — модуль упругости; I — момент инерции поперечного сечения относительно нейтральной оси балки (рис. 1.8). Постоянная K — коэффициент, учитывающий характер нагрузки; он определяется по специальной таблице¹.

Если такой таблицы под рукой нет, то прогиб балки можно определить по дифференциальному уравнению

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M(x)}{EI}, \quad (1.8)$$

где $M(x)$ есть изгибающий момент как функция расстояния x .

Если изгибающий момент не является непрерывной функцией расстояния вдоль балки, то нельзя проводить интегрирование по всей длине балки; оно должно выполняться отдельно по участкам, на которых момент является непрерывной функцией. Постоянные интегрирования должны быть определены в точках разрыва непрерывности путем сравнения величин прогибов и углов поворота оси балки для двух смежных участков с обеих сторон от точки разрыва непрерывности.

В этом случае величины прогибов могут быть описаны несколькими уравнениями, каждое из которых справедливо для соответствующего участка балки.

Перемещения в элементах, подверженных действию крутящего момента, представляются углами закручивания. Помня, что здесь рассматривается только кручение элементов с круглым сечением, мы заключаем, что угол закручивания соответствует углу вращения радиуса поперечного сечения. Это перемещение или угол вращения определяется из следующего выражения:

$$\theta = \frac{TL}{JG}, \quad (1.9)$$

где θ — угол закручивания; T — крутящий момент; L — длина элемента; J — полярный момент инерции; G — модуль сдвига.

Внешняя деформация стержня под действием осевого растягивающего усилия, прогиб консольной балки под действием

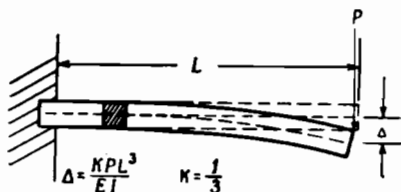


Рис. 1.8. Пример изгиба простой балки.

¹ Marin, *Strength of Materials*, Macmillan Co., Inc., New York; Frocht, *Strength of Materials*, Ronald Press, New York.

поперечной нагрузки, приложенной на свободном конце, и угол вращения радиуса вала при кручении показаны соответственно на рис. 1.7—1.9. На этих рисунках показаны внешние деформации, определяемые по уравнениям 1.6, 1.7 и 1.9.

Внутренние перемещения в конструкции представляют собой перемещение и повороты плоскостей внутри конструкции по отношению друг к другу. Значения этих перемещений даются не в абсолютных величинах, а в виде деформаций, которые представляют собой отношение перемещения к длине элемента, на котором это перемещение происходит.

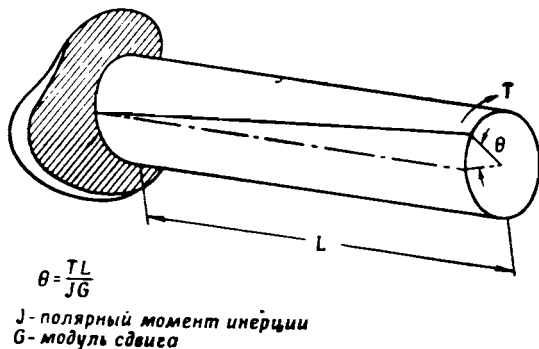


Рис. 1.9. Вращение радиуса при кручении.

Деформации, встречающиеся в конструкциях, представляют особый интерес при проектировании пусковых устройств. Установлено, что для большинства материалов, применяемых в конструкциях пусковых устройств, деформации прямо пропорциональны напряжению. Коэффициент пропорциональности между деформацией и напряжением есть модуль упругости для данного материала. Для нормальных напряжений это выражается в виде

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (1.10)$$

где σ — нормальное напряжение; E — модуль продольной упругости; ε — относительное удлинение. Для касательных напряжений справедливо аналогичное выражение:

$$\tau = G\gamma, \quad (1.10a)$$

где τ — касательное напряжение; G — модуль поперечной упругости (модуль сдвига); γ — угол сдвига.

Методов непосредственного измерения напряжений в конструкции не существует, однако имеется несколько методов для определения деформации. Эти деформации в свою очередь можно математически преобразовать в напряжения и тем самым оценить напряжения в конструкции. Отсюда видна важность ана-

лиза соотношений между напряжениями и деформациями: экспериментальное измерение деформаций в собранной конструкции позволит вычислить соответствующие напряжения и затем путем математической экстраполяции определить предельную нагрузку.

Упругость. Вследствие сложности конструкции, особой специфики проектирования конкретной пусковой установки или необходимости сохранения веса, например в авиационных пусковых установках, применение элементарной теории сопротивления материалов может привести к неточным и неприемлемым результатам. Для того чтобы точно определить напряжения и деформации в сложной конструкции пусковой установки, необходима теория, в основу которой положен минимум упрощающих предположений и высокая математическая точность. Единственным инструментом, способным в наибольшей степени удовлетворить этим требованиям, является теория упругости.

Хотя теория упругости позволяет получить точное решение в пределах упругих деформаций для однородных, изотропных материалов, однако применение ее затруднительно и требует высоких знаний в области математики. Это особенно справедливо, когда речь идет об исследовании проблем, мало сходных с теми, которые уже были исследованы ранее и решения которых часто встречаются на страницах технических журналов.

Так как ввиду своей сложности математическая теория упругости выходит за пределы данной работы, мы отсылаем интересующегося читателя к соответствующей литературе ¹.

1.4. Основы динамики

Второй закон Ньютона. Второй закон Ньютона применим к исследованию динамики снаряда при пуске или разгоне только в его наиболее строгой форме. Всем инженерам знакома следующая формулировка второго закона Ньютона: неуравновешенная сила, действующая на тело, равна массе тела, умноженной на его ускорение, сообщаемое неуравновешенной силой: $F = ma$. Эта формулировка является точной при условии, что масса объекта не изменяется во времени. Очевидно, что в случае снаряда, в котором масса топлива ускорителя составляет значительную часть всей начальной массы снаряда, масса не остается постоянной во времени. При сгорании заряда масса снаряда в некоторых случаях уменьшается более чем на 30% в течение нескольких секунд.

Поэтому необходимо, чтобы при расчетах траектории снаряда второй закон Ньютона применялся в более строгой форме.

¹ Sechler, Elasticity in Engineering, John Wiley and Sons Inc., New York; Timoshenko and Goodier, Theory of Elasticity, 2nd Ed., McGraw-Hill Book Co., Inc., New York.

Более строгая формулировка второго закона Ньютона такова: *неуравновешенная сила, действующая на материальную точку, равна скорости изменения количества движения этой точки.* Хотя снаряд вовсе не является материальной точкой, можно показать, что второй закон может использоваться в более широком смысле, а именно в смысле утверждения, что скорость изменения суммарного количества движения материальной системы равна равнодействующей всех внешних сил. Для того чтобы записать математическое выражение для второго закона Ньютона при установившихся условиях работы ракетного двигателя, допустим, что V есть мгновенная скорость снаряда, V_e — эффективная скорость истечения¹ газовой струи по отношению к снаряду, M — мгновенная масса снаряда и несгоревшей части топлива, m — мгновенное значение массы несгоревшего топлива и F — неуравновешенная сила, действующая на снаряд по касательной к его траектории. Тогда скорость изменения массы топлива равна dm/dt , она эквивалентна скорости изменения массы системы — dM/dt . Отсюда:

$$F = \frac{d}{dt}(MV) - (V - V_e) \frac{dM}{dt} \quad (1.11)$$

$$F = M \frac{dV}{dt} + V_e \frac{dM}{dt}. \quad (1.12)$$

Подставляя выражение для dM/dt и беря массу снаряда без топлива в виде $M_M = M - m$, получим

$$F = (M_M + m) \frac{dV}{dt} - V_e \frac{dm}{dt}. \quad (1.13)$$

По определению реактивная сила $T = V_e dm/dt$, поэтому уравнение (1.13) можно переписать в виде

$$T + F = (M_M + m) \frac{dV}{dt}. \quad (1.14)$$

Неуравновешенная сила F есть сумма отрицательной силы лобового сопротивления и составляющей мгновенного веса в направлении полета. Следовательно, если обозначим этот член через $(-D)$, то уравнение примет вид

$$T - D = (M_M + m) \frac{dV}{dt}. \quad (1.15)$$

Необходимо подчеркнуть, что для данного снаряда D является функцией аэродинамических характеристик снаряда, скорости, плотности атмосферы, угла атаки, числа Маха, а также

¹ Термин «эффективная скорость истечения» рассматривается во второй книге данной серии, в разделе «Теория реактивных двигателей». По определению она связана с тягой соотношением $T = V_e dm/dt$.

мгновенной массы снаряда и угла наклона траектории к горизонту. Для решения этих уравнений обычно необходимо применять методы последовательного приближения или численного интегрирования.

Толчок и удар. Толчок и удар являются случайными, изменяющимися во времени нагрузками, обычно кратковременными, но большими по величине. Характерной особенностью таких нагрузок является быстрое нарастание до пикового значения и затем быстрый спад до некоторого установившегося значения; форма нарастания импульса зависит от характера удара или толчка и характеристик соударяемых материалов.

Разрушительное действие удара или толчка зависит от пикового значения силы, от продолжительности импульса, формы импульса и характеристик конструкции, подвергаемой воздействию толчка или удара. Предположим, например, что частота собственных колебаний конструкции равна 50 гц, а продолжительность импульса порядка одной миллисекунды. При этих условиях частота первой гармоники ряда Фурье для ударного импульса равна 500 гц. Очевидно, что частота первой гармоники импульса значительно превышает частоту собственных колебаний конструкции, поэтому реакция конструкции на этот ударный импульс не носит характер резонанса, и, следовательно, амплитуда колебаний, возникающих под действием импульса, будет сравнительно небольшой. С другой стороны, если конструкция имеет частоту собственных колебаний 500 гц, то система будет колебаться в резонанс с ударным импульсом и амплитуда возникающих колебаний будет зависеть от высоты пика импульса и от его формы. Обычно принято выражать величину удара или толчка в единицах g , соответствующих ускорению, сообщаемому импульсной нагрузкой или силой. Это делается по той причине, что ускорения можно легко измерить как в полевых условиях, так и в лаборатории.

Во время запуска двигателя и в процессе разгона снаряд может подвергаться воздействию сильных ударных нагрузок, которые способны вызвать серьезные повреждения как самого снаряда, так и его отдельных элементов. Многие электронные устройства могут выйти из строя при малейшем повреждении, после чего снаряд практически станет бесполезен.

Некоторые воспламенительные устройства ускорителей создают весьма интенсивную кратковременную ударную нагрузку в пределах от 5 до 200 g и продолжительностью от 1 до 6 мсек. Ударные нагрузки такого типа могут оказаться очень опасными для элементов с высокой резонансной частотой, например электровакуумных приборов. При правильном проектировании и экспериментальной отработке можно создать воспламенительное устройство ускорителя с минимальными ударными

характеристиками, что представляет собой хорошую основу для повышения надежности снаряда по отношению к внешним воздействиям.

Другие виды ударных нагрузок высокой интенсивности могут иметь место при так называемом жестком запуске воздушно-реактивных двигателей или двигателей на жидком топливе, а также вследствие неустойчивого горения твердого топлива.

Расцепление стопорных устройств пусковой установки и отделение электрических и других соединений может привести к появлению опасных нагрузок на снаряд в процессе пуска. При проектировании пусковых установок необходимо принять меры, чтобы отделение снаряда от пусковой установки происходило без больших динамических нагрузок.

В некоторых типах снарядов стартовый ускоритель прикрепляется с помощью скользящих устройств, которые дают возможность произвести отделение ускорителя от снаряда за счет аэродинамического сопротивления. Если удар при воспламенении или скорость нарастания давления в камере двигателя достаточно велики, это может привести к тому, что снаряд будет двигаться по пусковой установке быстрее, чем ускоритель. Когда же тяга ускорителя достигнет полной величины, ускоритель в свою очередь начнет быстро двигаться вперед, сокращая образовавшийся промежуток между ним и снарядом, и в конце концов произойдет их соударение. При этом, естественно, возникнут большие ударные нагрузки. Следует принимать все меры к тому, чтобы между снарядом и ускорителем не образовывался разрыв; в случае если этого избежать нельзя, нужно применять амортизирующие устройства.

Процесс горения топлива в двигателе сам по себе может являться источником воздействия ударных нагрузок на снаряд. Внезапное повышение давления передается на снаряд и воспринимается его конструкцией и элементами как импульс ускорения. Эти импульсы обычно имеют малую длительность, поэтому они представляют опасность главным образом для элементов с большой частотой собственных колебаний. Изолировать снаряд от действия этих мгновенно приложенных нагрузок можно с помощью амортизаторов, поставленных в месте соединения снаряда с ускорителем.

Механические вибрации. Периодические колебания упругой конструкции носят название механических вибраций. Для существования вибраций необходимо лишь наличие массы, которая может быть распределенной либо сосредоточенной, и пружины, или упругой силы, которая будет возвращать массу в положение равновесия после того, как она получила некоторое перемещение. Если масса постоянна и сила пружины является линейной функцией перемещения массы, то вибрация массы от-

носителем некоторого положения равновесия будет гармонической функцией, т. е. она может быть выражена тригонометрическими функциями, в которых время входит как переменная в аргумент:

$$x = A \sin \omega_n t + B \cos \omega_n t. \quad (1.16)$$

Это общее решение для перемещения x массы относительно положения равновесия в зависимости от времени. В этом решении ω_n есть *круговая частота недемпфированных собственных колебаний*, выражаемая в радианах в секунду. Круговая частота собственных колебаний является функцией только физических параметров системы «масса + пружина», т. е. коэффициента упругости пружины K и массы m , и выражается в виде $\omega_n = \sqrt{K/m}$. Собственная частота в герцах находится делением ω_n на 2π или $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{K/m}$. Обычно предпочитают пользоваться величиной f , поскольку она выражается в герцах, а не в радианах в секунду.

При детальном рассмотрении динамики упругой системы необходимо принять во внимание имеющееся внешнее трение или демпфирование, если оно считается *существенным*. В некоторых случаях демпфирование может быть настолько сильным, что полностью препятствует возникновению колебаний; такая пороговая величина демпфирования носит название *критического демпфирования*. Обычно демпфирование в системе составляет некоторый процент от критического демпфирования.

В результате наличия демпфирования в системе динамическое уравнение движения принимает форму

$$x = e^{-\frac{m}{c} t} (A \sin \omega_{nd} t + B \cos \omega_{nd} t) \quad (1.17)$$

в случае, если демпфирующая сила рассматривается как линейная функция скорости. В этом уравнении c есть коэффициент пропорциональности между демпфирующей силой и скоростью, m — масса, а ω_{nd} есть круговая частота демпфированных собственных колебаний. Круговая частота демпфированных собственных колебаний связана с круговой частотой недемпфированных собственных колебаний соотношением

$$\omega_{nd} = \omega_n \sqrt{1 - \delta^2}, \quad (1.18)$$

где ω_n есть круговая частота недемпфированных собственных колебаний, определенная выше, а δ есть отношение действительного демпфирования в системе к критическому демпфированию.

Из рассмотрения двух приведенных выше уравнений очевидно, что влияние демпфирования в системе выражается в уменьшении как амплитуды колебаний, так и частоты, с которой эти колебания будут происходить.

Вибрации некоторой массы или упругого тела с распределенной массой могут быть двух видов, причем оба эти вида колебаний независимы и могут иметь место одновременно. Первым и наиболее известным видом колебаний являются свободные колебания конструкции — эти колебания возбуждаются силой, создающей внезапное изменение скорости или перемещение тела (такие колебания могут быть вызваны, например, мгновенно приложенной ударной нагрузкой). Частота этих колебаний зависит только от физических параметров массы и коэффициента упругости пружины и является, таким образом, функцией самой конструкции. Для системы, в которой можно легко разграничить массу и упругий элемент (т. е. для системы с сосредоточенной массой), частота недемпфированных колебаний находится из выражения

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}}, \quad (1.19)$$

где f — частота в герцах или в циклах в единицу времени; K — коэффициент упругости элемента; m — масса. Частота демпфированных колебаний определяется как

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m} (1 - \delta^2)}. \quad (1.20)$$

В случае когда трудно отграничить массу от пружины или когда колебательная система может быть представлена в виде нескольких масс или пружин, соединенных последовательно или параллельно, формула (1.20) уже не годится, и определение частоты становится очень сложной и трудной задачей¹. Однако во многих задачах в качестве первого приближения или, по крайней мере, в качестве инструмента для объяснения природы явления можно использовать простую модель в виде массы с пружиной.

Вторым видом колебаний являются колебания, вызываемые силой, изменяющейся по гармоническому закону. Если колебательная система движется под действием такой силы, частота ее колебаний должна быть в точности равна частоте возмущающей силы, т. е. она совершенно не должна зависеть от свободных колебаний или собственной частоты системы.

Амплитуда вынужденных колебаний будет зависеть от отношения частоты вынужденных колебаний к частоте собственных колебаний и от коэффициента демпфирования.

¹ Для изучения этой проблемы можно рекомендовать Den Hartog, *Mechanical Vibrations*, 3rd Ed., McGraw-Hill Book Co., Inc., New York; Timoshenko, *Vibration Problems in Engineering*, D. Van Nostrand Co., Inc., Princeton, N. J.

Эти условия легко можно понять, если рассмотреть уравнения движения демпфированной системы с одной степенью свободы, подверженной действию гармонической возмущающей силы вида $F_0 \cos vt$, где F_0 — амплитудное значение силы, v — круговая частота возбуждающих колебаний.

Величина x смещения массы относительно положения равновесия определяется как

$$x = \frac{F_0}{K} \frac{\cos(vt - \theta)}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{v}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left(2\delta \frac{v}{\omega_n}\right)^2}}, \quad (1.21)$$

где θ — есть угол сдвига фаз между перемещением и вынуждающей силой; он находится из выражения

$$\theta = \arctg \frac{cv}{K - mv^2}. \quad (1.22)$$

Когда отношение частот равно единице, т. е. когда частота внешнего воздействия в точности равна частоте собственных колебаний, наступает так называемый **резонанс**. При резонансе амплитуда вынужденных колебаний сильно возрастает, особенно при малом демпфировании, при этом конструкция испытывает большие напряжения и находится в состоянии сильного динамического нагружения. Перед наступлением резонанса, когда частота внешнего воздействия меньше собственной частоты колебаний системы, реакция системы на гармоническую силу будет по крайней мере равна реакции на эквивалентную статическую нагрузку, имеющую ту же величину, что и амплитудное значение внешнего воздействия. По мере приближения частоты внешнего воздействия к частоте собственных колебаний и с наступлением резонанса амплитуда вынужденных колебаний системы растет, и чем меньше демпфирование, тем больше возрастает амплитуда. По сравнению с величиной отклонения при статическом нагружении амплитуда увеличивается от 1 до 5 и более раз, опять же в зависимости от величины демпфирования.

Динамическая амплитудная характеристика системы, представляющая собой отношение амплитуды вынужденных колебаний к статическому отклонению, обратно пропорциональна степени демпфирования, и по мере того, как демпфирование приближается к критическому, характеристика быстро падает. Как только частота внешнего воздействия превысит частоту собственных колебаний системы, динамическая характеристика начинает быстро падать, становясь значительно меньше по величине, чем статическая характеристика, и затем медленно уменьшается до нуля. Это явление объясняется большой инерционностью массы по отношению к воздействующей на него

гармонической силе, когда частота внешнего воздействия превосходит частоту собственных колебаний системы.

Зависимость амплитуды вынужденных колебаний упругой системы от частоты гармонической силы приведена на рис. 1.10. Статическую характеристику можно определить как реакцию системы на статическую нагрузку, величина которой равна амплитудному значению внешней силы, или более наглядно, как реакцию системы на воздействие внешней силы нулевой частоты.

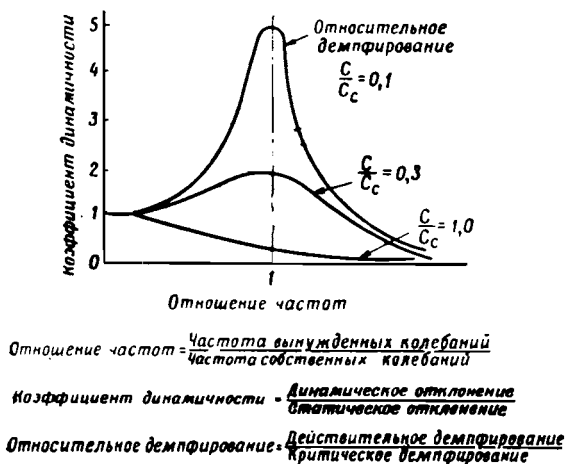


Рис. 1.10. Реакция системы на гармоническое возмущение.

На рис. 1.10 приведено семейство кривых, каждая из которых представляет собой характеристику системы при данной величине демпфирования.

В наших рассуждениях мы считаем, что демпфирование прямо пропорционально скорости. Кривые, приведенные на рис. 1.10, указывают методы уменьшения повреждений из-за вибрации: для этого необходимо, чтобы частота собственных колебаний системы была ниже, чем частота внешнего воздействия, а кроме того, нужно вводить в систему демпфирование.

При анализе конструкции, представляемой в виде системы с распределенной массой или по крайней мере в виде нескольких масс и упругих элементов, число резонансов растет прямо пропорционально количеству рассматриваемых масс. Следовательно, при рассмотрении распределенной массы может иметь место большое количество резонансов.

Если конструкция простая (например, стержень или колонна) и величина внутреннего трения очень мала, то имеется несколько собственных частот, кратных друг другу, и несколько

резонансов. В случае же когда имеется демпфирование, резонансные пики сглаживаются, по крайней мере при малых значениях амплитуд.

Очевидно, что для предохранения элементов снаряда и всего снаряда в целом от повреждений необходимо, чтобы частота собственных колебаний проектируемой системы отличалась от частоты возмущающих сил, которые могут иметь место в условиях применения снаряда. Поскольку частоты этих сил обычно разнообразны, то трудно спроектировать все элементы снаряда и его конструкцию так, чтобы частоты собственных колебаний не совпадали с некоторыми из частот внешних возмущающих сил. Поэтому хотя усилия по уменьшению влияния внешних факторов и необходимы, однако нужно спроектировать конструкцию снаряда и его элементов так, чтобы они были в состоянии противостоять действию нагрузок, возникающих при резонансных колебаниях.

Предыдущие рассуждения проводились в предположении, что интересующая нас система описывается линейными уравнениями. Однако может случиться, что система будет нелинейной, и использование линейных уравнений приведет к совершенно неверным результатам (важно заметить, что многие устройства для предохранения конструкции от вибраций являются существенно нелинейными). Реакция нелинейной системы на действие импульсной или вибрационной нагрузки может содержать, кроме частоты входных колебаний, еще и более высокие гармоники или субгармоники со значительными амплитудами. Для некоторых нелинейных случаев получены общие решения, их можно найти в более сложных курсах¹; однако часто требуются графические² или численные решения.

Степень передачи колебаний. Энергия колебаний и вибрационные нагрузки, действующие на пусковую установку и на снаряд, должны в какой-то степени передаваться через корпус снаряда его отдельным элементам. Для того чтобы уменьшить разрушительное действие этих колебаний в процессе этой передачи, имеется несколько возможностей.

Степень передачи возмущающей силы зависит от отношения частоты возмущающей силы к частоте собственных колебаний конструкции. Например, если рассматривать простую систему, состоящую из массы, подвешенной на пружине, то усиление будет наблюдаться тогда, когда частота возмущающей силы приблизительно равна частоте собственных колебаний. Когда же

¹ Stoker J. J., Non-Linear Vibrations in Mechanical and Electrical Systems, Interscience Publishers, Inc., New York, 1950.

² Jacobson L. S., On a General Method of Solving Second-Order Ordinary Differential Equations by Phase-Plane Displacements, *Journal of Applied Mechanics*, December 1952.

частота возмущающей силы значительно выше частоты собственных колебаний системы, то система ведет себя как фильтр и ослабляет воздействие возмущающей силы. Это положение иллюстрируется семейством кривых, приведенных на рис. 1.11. Они построены для случая простой системы, состоящей из сосредоточенной массы и пружины, при наличии демпфирования или внешнего трения. Элемент снаряда можно рассматривать

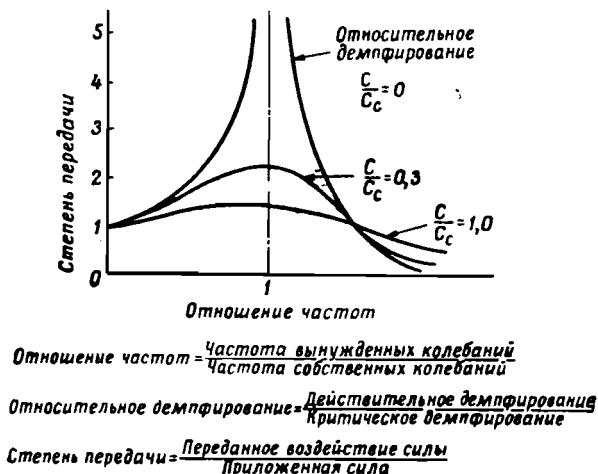


Рис. 1.11. Степень передачи гармонического возмущения.

как сосредоточенную массу, а поддерживающую его конструкцию — как пружину и демпфер. Тогда система в целом будет иметь некоторую частоту собственных свободных колебаний. Если теперь мы предположим, что в точке, в которой рассматриваемый элемент с помощью соответствующих приспособлений крепится к снаряду, действует вынуждающая сила одной частоты, то степень передачи изобразится графиком, приведенным на рис. 1.11. Здесь в качестве ординаты принята степень передачи колебаний (трансмитабельность), определяемая как отношение переданной силы к воздействующей силе. По оси абсцисс отложено отношение частоты возмущающей силы к частоте собственных колебаний системы. На графике изображено семейство кривых, поскольку трансмитабельность зависит от величины демпфирования.

Если на конструкцию с распределенной массой, имеющую несколько резонансов, будет действовать сложная возмущающая сила, то в конструкции будут усиливаться те составляющие возмущающей силы, частоты которых близки к частоте собствен-

ных колебаний конструкции. В снаряде имеется большое количество собственных частот; источниками возмущающих сил являются здесь двигатель снаряда, а также стартовый двигатель. В этих возмущениях содержится целый спектр разнообразных частот, которые могут совпасть с собственными частотами как самого снаряда, так и его элементов. Передача этих частот осуществляется сравнительно легко, когда они, проходя по конструкции, усиливаются. Эти частотные составляющие затем могут оказать вредное влияние на отдельные чувствительные элементы, воспринимающие вибрации. Для того чтобы обеспечить нормальную работу элементов снаряда и предотвратить повреждение, необходимо уменьшить передачу вибраций через конструкцию к этим элементам. Первым способом, естественно, является уменьшение колебаний в самом источнике возмущений, т. е. обычно в двигателе снаряда и в стартовом двигателе. Однако следует учесть, что одно это еще далеко не решает проблемы.

Вторым способом уменьшения колебаний, передаваемых к элементам снаряда, является разработка такой конструкции, которая сама по себе обладала бы фильтрующими свойствами. Но пока что такие конструкции изготавливать не умеют, и это практически исключает подобное решение.

Остается еще один способ, который является наиболее простым и поэтому в настоящее время наиболее распространенным: изолировать стартовый двигатель и двигатель снаряда от самого снаряда посредством применения **амортизаторов**. Амортизатор представляет собой по сути дела пружину, которая совместно со снарядом образует систему типа «масса + пружина», имеющую низкую собственную частоту по отношению к стартовому двигателю. Действие амортизатора аналогично действию фильтра, предотвращающего передачу высоких частот от двигателя к снаряду. Это наиболее приемлемый способ, поскольку теоретически он предохраняет не только элементы снаряда, но и весь снаряд в целом от воздействия вибраций стартового двигателя.

Одной из разновидностей этого способа является изоляция элементов снаряда от корпуса за счет постановки противоударного крепления или других типов изолирующих устройств. Так как в этом случае никаких устройств, изолирующих сам корпус снаряда от двигателя или стартового двигателя, не ставится, то корпус воспринимает колебания двигателя, однако эти колебания не передаются отдельным элементам снаряда, поскольку они отфильтровываются противоударным креплением. Этот способ эффективен при условии, что конструкция снаряда способна выдержать воздействие передаваемых ею колебаний и что достаточно хорошо известно, какие силы действуют на крепление.

1.5. Возмущающие силы при пуске и разгоне снаряда

Возмущающие силы, возникающие в результате работы двигателя. В момент пуска и во время разгона снаряд в результате работы двигателя подвергается воздействию следующих трех возмущающихся сил.

Первая — это толчок при воспламенении топлива, который передается на корпус и отдельные детали снаряда. Сила и продолжительность этого толчка зависят от типа воспламенителя и самого двигателя, воздействие же толчка на корпус и детали снаряда зависит от силы, продолжительности и характера толчка. Если частота возмущающей силы при толчке совпадает с частотой собственных колебаний корпуса или элементов снаряда, то вполне возможно разрушение конструкции.

Вторая возмущающая сила есть квазипостоянная тяга, которая ускоряет снаряд при его движении с пусковой установки. При соответствующей конструкции стартового двигателя его тяга может быть постоянной, возрастающей или незначительно уменьшающейся в течение всего периода старта. Обычно она остается в основном постоянной или уменьшается для компенсации уменьшения массы топлива в процессе пуска и разгона. За исключением снарядов, которые характеризуются очень большим уменьшением массы топлива по отношению к начальной массе всего снаряда, в большинстве случаев ускорение остается почти постоянным во времени; оно может иметь значение в пределах от 1 до 30 g в зависимости от типа снаряда. Это постоянное ускорение приводит к воздействию на конструкцию снаряда и его детали квазистатической нагрузки, направленной в сторону, противоположную направлению движения.

Влияние этой нагрузки на конструкцию снаряда и его отдельные элементы, например, на амортизатор усилителя системы наведения, пропорционально весу усилителя, умноженному на ускорение, выраженное в единицах g . Ясно, что при наличии больших ускорений при старте (порядка 30 g) снаряд испытывает значительные нагрузки, которые должны быть учтены при расчете конструкции.

Третьей возмущающей силой, возникающей в результате работы двигателя, является многоамплитудная, многочастотная колебательная составляющая тяги, которая накладывается на квазипостоянную тягу стартового двигателя. Сумма этих двух видов тяги представляет собой общую тягу двигателя. Колебательная составляющая не является обязательно чисто гармонической функцией, обычно она будет суммой нескольких гармонических функций различных частот и амплитуд с изменяющимися соотношениями фаз и мгновенных ударных импульсов. В некоторых типах двигателей на твердом топливе имеется

легко различимая полоса частот колебаний с преобладающими амплитудами. В любом двигателе данной конструкции при одной и той же температуре эти колебания носят вполне определенный характер. Некоторые из этих колебаний можно теоретически сравнить с колебаниями давления, возникающими в открытой трубе или трубе органа¹. Однако следует иметь в виду, что очень высокая первоначальная температура шашек твердого топлива вызовет изменения характеристик спектра колебаний.

Преобладающие частоты колебаний тяги находятся в пределах от 300 *гц* до 20 *кгц*. У некоторых двигателей ускорения при колебаниях превосходят 100 *g*. Вредное влияние высокочастотных колебаний (которые составляют наибольшую часть колебаний тяги) до настоящего времени не изучено.

Частоты и амплитуды колебания тяги у жидкостных двигателей меньше, чем у работающих на твердом топливе. Колебание тяги может оказывать очень вредное влияние на конструкцию снаряда и его элементы. Так, колебания низкой частоты с большой амплитудой вызывают разрушение конструкции, особенно в местах соединений пайкой, а также могут явиться причиной расшатывания и отвертывания болтов и гаек.

Влияние механизмов крепления. Для прочного крепления стартового двигателя к снаряду, а также для предотвращения случайного перемещения снаряда по направляющим пускового устройства применяются различные механизмы крепления. Эти механизмы, а также электрические и другие соединительные устройства, связывающие снаряд с пусковой установкой, в момент отделения снаряда от установки могут быть источником ударных нагрузок. Создание безударно действующих механизмов является трудной задачей; вообще говоря, следует применять как можно более плавно действующие механизмы. Это особенно важно потому, что характер, продолжительность и величина таких ударных нагрузок не могут быть вычислены заранее, вследствие чего степень воздействия их на снаряд и пусковое устройство остается неизвестной. Особенно следует избегать применения срезных и взрывных болтов и стержней, работающих на разрыв.

1.6. Стартовые двигатели

Вспомогательные реактивные двигатели, используемые для разгона снаряда с пускового устройства до некоторой определенной скорости, называются стартовыми двигателями. В более строгом смысле под *стартовым двигателем* следует понимать

¹ Grad H., Resonance Burning in Rocket Motors, Communications on Pure and Applied Mathematics, vol. 2, 1949, p. 79—102.

самостоятельный вспомогательный реактивный двигатель, имеющий ограниченное время работы и определенную тягу. Оказывается, что в рамки этого определения не укладывается ряд двигателей, которые могут быть использованы для старта и разгона снаряда. Поэтому в настоящем разделе понятие «стартовый двигатель» несколько расширено: это название будет применяться ко всем двигателям, которые используются главным образом для запуска снаряда.

Реактивные двигатели, используемые как основной источник энергии после этапа старта для дальнейшего разгона снаряда или поддержания его скорости полета, мы будем называть *маршевыми* двигателями.

Вопросы конструирования и производства двигателей на твердом и жидком топливах, их характеристики, а также сами топлива описываются в одной из книг настоящей серии, посвященной реактивным двигателям. В данной главе рассматриваются только проблемы и вопросы, связанные с применением стартовых двигателей.

Стартовые двигатели на твердом топливе. Двигатели на твердом топливе хорошо приспособлены для использования в качестве стартовых двигателей. Они компактны, сравнительно просты в эксплуатации, могут быть изготовлены самых различных размеров. По своей форме и размерам эти двигатели весьма удобны для применения на реактивных снарядах; кроме того, на их работу не влияют даже значительные изменения окружающих атмосферных условий. Главными недостатками двигателя на твердом топливе являются: трудность изменения характеристик двигателя для того, чтобы он полнее соответствовал данному снаряду, высокая стоимость в силу сложности производства и необходимости тщательного контроля, значительные кратковременные изменения тяги двигателя, наложенные на характеристики установившегося режима работы, и некоторая опасность взрыва. Кроме того, отдельные виды твердого топлива имеют ограниченные сроки хранения.

Условное обозначение образцов стартовых двигателей на твердом топливе. Обозначение двигателей на твердом топливе в США в настоящее время более или менее стандартизировано. Оно состоит из трех основных частей, показывающих: а) основное название, б) краткие характеристики, в) состояние образца. Основным названием является сокращенное JATO (Jet-assisted takeoff). Группа с характеристиками состоит в свою очередь из трех следующих подгрупп: 1) числа, определяющего в секундах продолжительность работы двигателя при 70°F, 2) двух букв, обозначающих вид и физическое состояние топлива, 3) числа, обозначающего приближенно силу тяги в фунтах, развиваемую двигателем при 70°F.

Третья часть обозначения состоит из различных букв и цифр, определяющих производственное состояние двигателя: экспериментальный или стандартный, номер модели или модификации.

Имеются некоторые различия в обозначениях, принятых для третьей группы в армии, авиации и флоте США.

Для обозначения вида топлива, его физического состояния при обычных температурах используются следующие буквенные обозначения:

- А — кислота с горючим или битум с перхлоратом;
- В — двухосновное топливо, изготовленное в виде шаров, а также нарезанных кусков или шашек определенной длины;
- С — механическая смесь (пикрат — нитрат);
- Д — двухосновное топливо (может содержать слои или частицы топлива С), полученное заливкой в формы или непосредственно в камеру двигателя;
- Е — двухосновное топливо, изготовленное формованием;
- Ф — фуриловый спирт с окислителем (включает все спирты выше этилового);
- Н — топлива на основе соединений с водородом;
- К — литой перхлорат (горючее — любое, кроме битума);
- Н — нитраты и нитросоединения, кроме обозначенных выше;
- О — жидкий кислород со спиртом или другими углеводородами.

Вторая буква обозначает физическое состояние топлива при нормальной температуре. Для этой цели применяются такие буквенные обозначения:

- L — жидкое;
- P — пластическое (может деформироваться при средних нагрузках);
- S — твердое (деформируется только при весьма значительных нагрузках).

Пример обозначения: JATO 2,2KS-11000, X102F1.

Характеристики стартового двигателя на твердом топливе.

Основные зависимости для вычисления траектории снаряда при запуске даны уравнением (1.15). При использовании в снарядах стартовых двигателей на твердом топливе применяется несколько иной метод расчета, который можно рассматривать как специальный случай внешней баллистики ракет. Если ограничиться рассмотрением только существующих двигателей и предположить, что имеет место установившийся режим работы двигателя, то тяга T будет пропорциональна скорости истечения продуктов сгорания. В зависимости от выбранных единиц измерения

коэффициентом пропорциональности является или *удельный импульс* I , или *эффективная скорость истечения* V_e , так что

$$T = Ig \frac{dm}{dt} \quad (1.23)$$

или

$$T = V_e \frac{dm}{dt}, \quad (1.24)$$

где dm/dt есть скорость изменения массы снаряда за счет истечения продуктов сгорания через сопло.

Интегрируя данную функцию в пределах времени горения топлива от $t=0$ до $t=t_b$, получаем

$$V_e = \frac{1}{m_0} \int_0^{t_b} T dt = \frac{g}{w_0} \int_0^{t_b} T dt, \quad (1.25)$$

где m_0 — начальная масса топлива; w_0 — соответственно начальный вес топлива, а t_b — время выгорания топлива.

Приведенный выше интеграл определяется как полный импульс и вычисляется по данным огневых испытаний. Тогда удельный импульс определится путем деления приведенного выше интеграла на начальный вес топлива, т. е. удельный импульс — это импульс, отнесенный к фунту топлива.

Обозначив через m массу топлива в любой момент работы двигателя, мы определим M_M как массу ракеты со стартовым двигателем в момент окончания работы двигателя (в момент полного выгорания топлива).

В соответствии с законами Ньютона в любой промежуток времени количество движения, направленного в сторону полета снаряда, увеличивается на такую величину, которая равна количеству движения, сообщенного частицами продуктов сгорания в обратном направлении (действием всех внешних сил при этом пренебрегаем). Если скорость снаряда в любой момент работы двигателя равна V , то относительно земли количество движения элементарной частицы продуктов сгорания dm , вылетающей со средней эффективной скоростью V_e , будет $(V - V_e)dm$. В любой момент времени количество движения снаряда равно $(M_M + m)V$, а его изменение за бесконечно малый интервал времени dt будет

$$\frac{d}{dt} [(M_M + m)V] dt = (M_M + m)dV + Vdm. \quad (1.26)$$

Тогда

$$(V - V_e)dm = (M_M + m)dV + Vdm \quad (1.27)$$

и

$$-\frac{dm}{M_M + m} = \frac{dV}{V_e}.$$

Проинтегрировав полученное выражение по времени горения топлива, в течение которого масса топлива изменяется от m_0 до 0, а скорость от 0 до V_b в момент окончания горения, будем иметь

$$V_b = V_e \ln \left(\frac{M_M + m_0}{M_M} \right) = V_e \ln \left(\frac{W + w_0}{W} \right), \quad (1.28)$$

где W есть суммарный вес снаряда со стартовым двигателем в момент прекращения работы двигателя; w_0 — вес израсходованного топлива.

Уравнение (1.28) можно применять для приближенного определения конечной скорости снаряда при некоторых способах пуска. Основная же ценность этого уравнения заключается в том, что оно наглядно иллюстрирует связь между отношением конечной скорости снаряда к эффективной скорости истечения (или удельным импульсом) и отношением масс. В большинстве случаев необходимо учитывать влияние силы тяжести и силы лобового сопротивления, что приводит к уменьшению скорости, определяемой из уравнения (1.23).

Влияние температуры на характеристики двигателя. После воспламенения топлива давление газов внутри двигателя быстро возрастает до такой величины, когда количество образующихся газов становится равным расходу газа через сопло. Это давление известно как *давление равновесия*, оно отчасти зависит от скорости горения топлива, которая в свою очередь частично зависит от начальной температуры пороховой шашки. Зависимость между давлением, а следовательно тягой и начальной температурой шашки примерно линейная.

В пределах рассматриваемого диапазона температур величина импульса практически не изменяется, поэтому при возрастании тяги время горения уменьшается, а при уменьшении, наоборот, увеличивается.

1.7. Стартовые двигатели на жидком топливе

В некоторых случаях жидкостный реактивный стартовый двигатель является более выгодным по сравнению со стартовым двигателем на твердом топливе. Дело в том, что при использовании двигателей на твердом топливе для очень больших снарядов возникает много сложных проблем. Некоторые из них связаны с большим объемом рабочей камеры двигателя в конце горения топлива, другие — с прочностью рабочей камеры и ее деформациями. Ко всему этому необходимо добавить весьма высокую стоимость такого двигателя, трудность хранения и

сложность в эксплуатации. С другой стороны, и при применении стартовых двигателей на жидком топливе возникает ряд трудностей, связанных со сложностью установки сбрасываемых топливных баков, их заправкой и созданием в них давления. Все это исключает возможность использования этих двигателей для снарядов малых размеров; здесь преимущество остается за двигателями на твердом топливе.

Имеется большое количество различных видов жидких горючих и окислителей, которые могли бы быть использованы в двигателях, однако их хранение и обращение с ними затруднены вследствие того, что многие топлива химически не стойки, ядовиты и обладают большой корродирующей способностью. Обычно двигатель на жидком топливе состоит из отдельных баков для горючего и окислителя, рабочей камеры, где происходит смешение и сгорание топлива (обычно самопроизвольное), и сопла Лаваля. Для подачи жидких компонентов в камеру сгорания необходимо преодолеть давление внутри камеры, что обеспечивается либо путем создания необходимого давления в баках, либо с помощью насосов. Известным успехом в преодолении трудностей, связанных с созданием необходимого давления, является разработка комбинированных систем подачи топлива, в которых подача компонентов топлива под давлением и их смешение осуществляются за счет газов, образующихся при сгорании небольшой пороховой шашки.

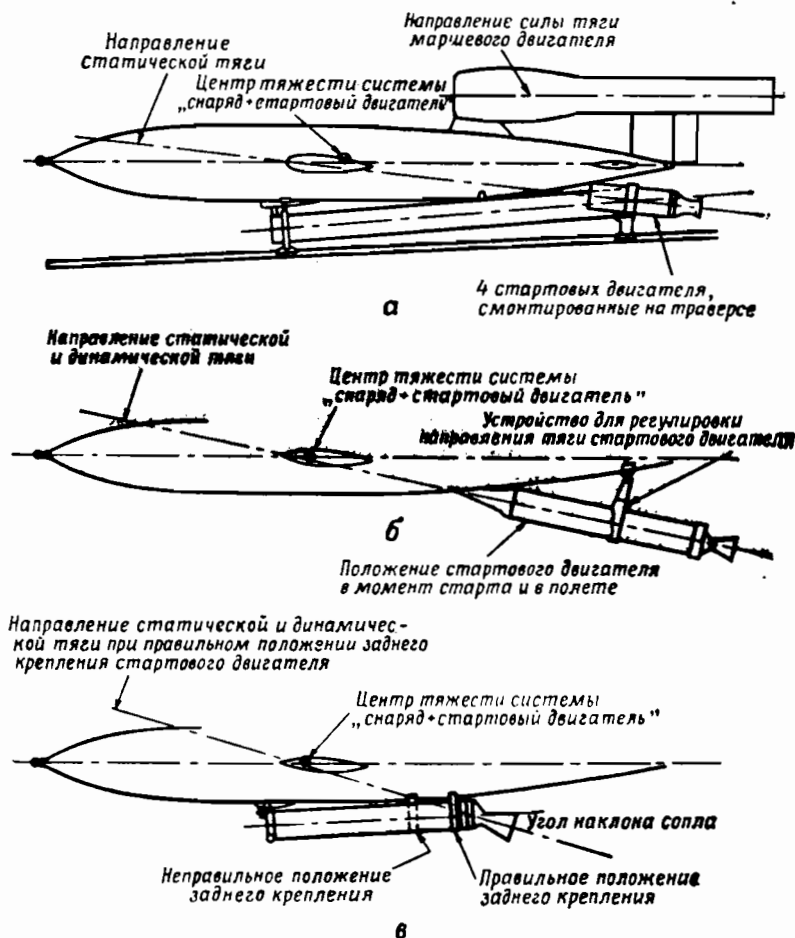
Для уменьшения опасности в обращении со снарядом баки последнего заполняются горючим и окислителем только после того, как снаряд установлен на пусковой установке. Это требует расположения соответствующих хранилищ для топлива и насосного оборудования вблизи стартовой площадки или создания специального подвижного заправочного оборудования.

Жидкостный реактивный двигатель был с успехом применен на немецкой ракете Фау-2, у которой баки и двигатель были размещены внутри корпуса. Ракета разгонялась двигателем до сверхзвуковой скорости на высоте порядка 20 миль. После израсходования топлива ракета продолжала лететь, как баллистический снаряд, по инерции. Так как двигатель и баки были расположены внутри корпуса и не увеличивали лобового сопротивления ракеты, то, очевидно, сбрасывание их не было необходимым.

Для снарядов, совершающих после выгорания топлива полет по баллистической кривой в пределах земной атмосферы и снабженных двигателями, полностью или частично размещенными внутри корпуса, сбрасывание двигателей не всегда выгодно, поскольку при этом уменьшается не только лобовое сопротивление, но и количество движения снаряда.

1.8. Крепление стартового двигателя

Под термином *крепление стартового двигателя* понимается устройство, при помощи которого один или несколько стартовых



Р и с. 1.12. Варианты размещения стартовых двигателей на снарядах типа Фау-1.

а — система с четырьмя стартовыми двигателями (пуск с направляющих); б — система с одним стартовым двигателем с прямым соплом; в — система с одним стартовым двигателем с наклонным соплом.

двигателей крепятся к снаряду. Оно должно обеспечить передачу тяги стартовых двигателей снаряду, причем линия действия тяги должна проходить через общий центр тяжести системы «снаряд + стартовый двигатель».

В некоторых случаях это крепление состоит всего из нескольких сравнительно элементарных частей: из фитинга или кольца для крепления двигателя к силовому фитингу снаряда, расположенному по его оси. Крепление может состоять также из фитинга, кольца или прилива, расположенных вблизи сопла стартового двигателя при креплении последнего сбоку снаряда. Во всех случаях крепление стартового двигателя к снаряду должно быть настолько жестким, чтобы была исключена возможность смещения двигателя относительно снаряда до прекращения работы двигателя, после чего использованный стартовый двигатель обычно сбрасывается.

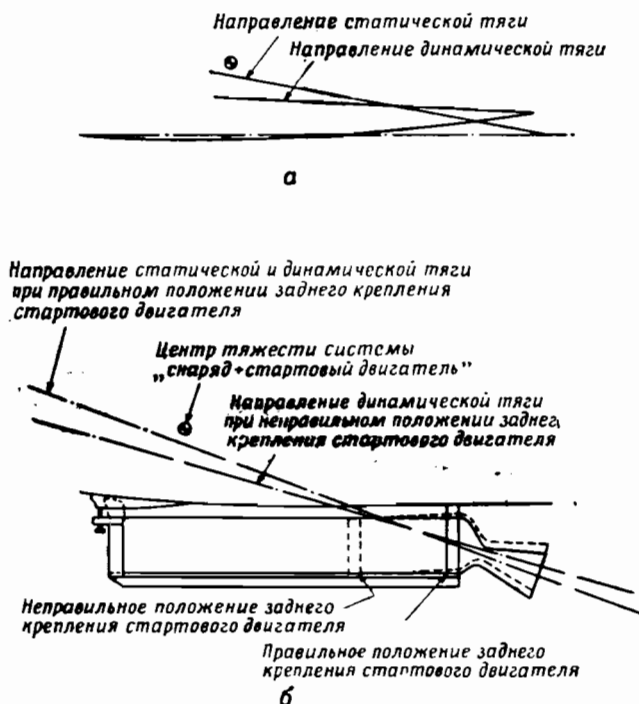
Должно быть обращено особое внимание на то, чтобы конструкция крепления не могла деформироваться под действием силы тяги, так как в результате этого может произойти смещение оси тяги двигателя, которая всегда должна быть соответствующим образом ориентирована относительно центра тяжести пусковой системы. На рис. 1.12 даны схемы трех возможных способов крепления стартовых двигателей к немецкому самолету-снаряду Фау-1, а на рис. 1.13 показано влияние смещения оси тяги для двух из этих способов крепления.

Первая схема на рис. 1.12 показывает крепление четырех стартовых двигателей с общей тягой порядка 40 000 фунтов. Для устранения опасности смещения линии действия тяги четыре двигателя могут быть заменены одним с примерно такой же тягой. Однако если этот один двигатель имеет обычное сопло, т. е. сопло, ось которого совпадает с осью камеры сгорания, то его придется установить на снаряде под большим углом к продольной оси снаряда. Чтобы можно было установить стартовый двигатель под малым углом к оси снаряда, необходимо применить сопло, ось которого расположена под некоторым углом к оси камеры сгорания. Во избежание смещения направления тяги при таком сопле нужно обеспечить точное расположение заднего крепления, а возможно, и ввести дополнительное крепление под двигателем, работающее на растяжение.

Аэродинамические проблемы, связанные с ускорением системы «снаряд + стартовый двигатель», а также связанные с полетом по инерции сброшенного стартового двигателя после прекращения его работы, требуют тщательного анализа. Эти вопросы разобраны во второй книге настоящей серии.

Вопросы конструирования креплений стартовых двигателей подробно разбираются ниже. Сейчас же мы хотим лишь обратить внимание на тот факт, что аварии во время полета снарядов могут быть вызваны недостаточной продуманностью конструкции крепления стартовых двигателей. Аэродинамические рули, например, могут частично оказаться в струе газов стартового двигателя, а неучет мгновенно приложенных нагрузок, воз-

никающих при применении срезных болтов и других аналогичных устройств, может привести к разрушению крепления. Толчок при воспламенении двигателя, а также другие толчки и удары могут вызвать смещение стартового двигателя в креплениях



Р и с. 1.13. Смещение направления силы тяги для пусковых систем а и б, показанных на рис. 1.12.

а — влияние изгиба направляющих на направление силы тяги системы а;
б — влияние неправильной установки заднего крепления стартового двигателя с наклонным соплом на направление силы тяги системы б.

силового фитинга снаряда. В результате такого смещения в момент пуска стартового двигателя может последовать удар двигателя по его креплению под действием тяги. Недостаточно хорошо продуманная конструкция крепления нескольких одновременно действующих двигателей может привести к тому, что один из двигателей, горение заряда в котором началось позже, будет сорван под действием ускорения, создаваемого другими двигателями. Неотделение стартового двигателя при сбрасывании после окончания работы может быть результатом как действия аэродинамических сил, вызвавших изгиб конструкции, так и деформации крепления при старте вследствие неправильного расчета.

1.9. Пусковые установки для управляемых снарядов

Существует много самых разнообразных пусковых установок, но все они должны выполнять некоторые общие для всех устройств функции: обеспечивать опору для снаряда, начальное направление полета и наведение снаряда при старте. Отдельные пусковые установки могут служить для монтажа и подъема снаряда, использоваться для хранения и т. д.

Почти все современные управляемые снаряды запускаются или посредством своего основного двигателя, или с помощью комбинации основного двигателя со стартовым двигателем, который служит для увеличения силы тяги при разгоне снаряда. Пусковые установки для таких снарядов могут быть разделены на два класса: установки без направляющих, или «с нулевым разбегом», и установки с направляющими. Последние в свою очередь могут быть разбиты на несколько типов в зависимости от отношения длины направляющих к длине снаряда. В пусковых установках обоих классов необходима точная ориентация направления тяги стартового двигателя по отношению к центру тяжести системы «снаряд + стартовый двигатель», чтобы свести к минимуму отклонения снаряда от заданного курса и угла тангажа. Моменты тангажа, возникающие из-за неправильного направления линии действия тяги, являются обычно более опасными, чем моменты, вызывающие крен и рыскание.

Пусковые установки с направляющими. Пусковые установки с направляющими состоят из основания с прикрепленными к нему несколькими направляющими, которые поддерживают снаряд со стартовым двигателем. Направляющие обеспечивают правильное положение снаряда и направляют его движение в самый начальный момент разгона. Пусковые установки этого класса должны быть подвижными и иметь приспособления для буксировки и подъема. Длина направляющих может варьироваться от нескольких дюймов до десятков метров. Пусковые установки с очень длинными направляющими применялись при пуске ранних образцов управляемых снарядов, однако дальнейший опыт показал, что необходимости в таких направляющих нет. Хотя длина направляющих пусковой установки не лимитируется, минимальная их длина должна обеспечивать полное воспламенение топлива стартового двигателя, для того чтобы он успел развить свою полную мощность.

Влияние принудительного движения снаряда по направляющим на уменьшение его отклонения от заданной траектории полета зависит от отношения времени движения снаряда по направляющим к общему времени неуправляемого полета снаряда со стартовым двигателем. Так как разгон снаряда начинается из состояния покоя и мерилом его является время движения сна-

ряда по направляющим (которое изменяется пропорционально корню квадратному из пройденного расстояния), то относительно короткие направляющие требуют весьма тщательного удержания снаряда на расчетной траектории в начальный период разгона. Очевидно, что при заданной длине направляющих для снарядов, от которых требуется минимальное отклонение от расчетной траектории, выгодно применять для получения требуемого импульса стартовый двигатель с большой тягой, но с малой продолжительностью работы. При определении длины направляющих можно исходить из условия, чтобы пусковое устройство занимало не больше места на земле или корабле, чем снаряд вместе со стартовым двигателем. Такой метод дает в первом приближении довольно хорошие результаты.

Определенная указанным выше способом длина направляющих может быть увеличена или уменьшена в соответствии с требованиями системы наведения и с необходимостью облегчить установку снаряда на пусковое устройство, а также в зависимости от возможных требований к сходу снаряда с направляющих или в целях обеспечения лучшей устойчивости рабочих платформ.

В конструкции должно быть предусмотрено, чтобы снаряд не мог отделяться от направляющих во время движения по ним, так как в противном случае он пострадает от удара при возврате на направляющие.

Простота конструкции пусковой установки с направляющими обеспечивает удобство ремонта и обслуживания. Основные проблемы, которые приходится решать при конструировании, связаны с опрокидывающим моментом и толчком при сходе снаряда с направляющих. Опрокидывающий момент является результатом действия силы тяжести на снаряд, когда его передние опоры покидают направляющие, а задние опоры еще удерживаются последними. Этот момент легко устранить применением отдельных направляющих для передних и для задних опор, компоновав всю конструкцию так, чтобы все опоры отделялись от направляющих одновременно. Однако если угол наклона траектории при сходе снаряда с направляющих отличается от угла самих направляющих относительно горизонта, то происходит внезапное изменение в движении снаряда, вызывающее сильный удар. Обычно этим можно пренебречь, но в некоторых случаях приходится несколько изгибать концы направляющих, чтобы обеспечить плавный переход снаряда от одной траектории к другой.

В силу ограниченности места самолетные пусковые установки имеют чрезвычайно короткие направляющие. Тем не менее даже в этих условиях весьма желательно, чтобы снаряд при пуске проделал некоторый, пусть даже и очень малый путь

по направляющим. Воздушный поток, обтекающий самолет, может сильно отклонить снаряд в момент схода его с направляющих. Это отклонение будет тем меньше, чем больше будет скорость схода снаряда с направляющих.

Пусковые установки «с нулевым разбегом». Сущность пуска «с нулевым разбегом» заключается в том, что снаряд уже в момент начала своего движения отделяется от пусковой установки. Хотя пусковая установка этого типа и ориентирует каким-то образом снаряд при пуске, однако на траекторию полета снаряда это существенно не влияет. Установка «с нулевым разбегом» может быть очень простой, аналогичной пусковому столу снаряда Фау-2, или является более или менее сложным механизмом, который удерживает снаряд до начала его движения, а затем освобождает свободный проход всем частям снаряда, таким, как крылья или управляющие поверхности. Пусковые установки «с нулевым разбегом» могут применяться либо для снарядов, к рассеиванию которых не предъявляется жестких требований, либо тогда, когда автопилот снаряда в состоянии обеспечить управление снарядом на стартовом участке.

Пусковые установки «с нулевым разбегом» имеют следующие преимущества: сравнительно небольшое занимаемое пространство, небольшой вес, простота конструкции основных элементов пусковой установки и устройств для крепления снаряда, а также легкость ремонта повреждений, полученных в боевых условиях (последнее относится к установкам несложной конструкции). Очевидным и существенным недостатком пусковых установок «с нулевым разбегом» является отсутствие управления снарядом на самом начальном этапе его полета, что требует обычно очень точной регулировки направления силы тяги системы «снаряд + стартовый двигатель».

В особых условиях эксплуатации могут возникнуть и другие недостатки. Так, например, при запуске снарядов с корабля отказавший снаряд гораздо легче сбросить за борт с помощью пусковой установки с направляющими, чем при помощи пускового устройства «с нулевым разбегом». При такой пусковой установке трудно также гарантировать, что снаряд с несколькими стартовыми двигателями покинет при пуске палубу корабля, если у него откажет один из стартовых двигателей. Другой пример относится к пуску снаряда с самолета, где при пусковой установке «с нулевым разбегом» снаряд в результате неоднородности воздушного потока может при отделении получить большие отклонения по тангажу, рысканию или крену, достаточные для того, чтобы он мог повредить самолет.

Катапульты. Несмотря на то, что стартовые двигатели не требуют никаких вспомогательных механизмов и очень удобны для разгона снаряда, все же в некоторых случаях применение

катапульта представляется предпочтительным. Катапульта является устройством, которое может быть неоднократно использовано для создания силы, обеспечивающей разгон снаряда. Наиболее существенным различием между катапультой и стартовым двигателем является то, что при использовании катапульти вследствие ее ограниченной длины ускоряющая сила должна быть приложена к снаряду в течение более короткого промежутка времени, чем при разгоне стартовыми двигателями. Поэтому для обеспечения необходимой скорости схода снаряда с катапульти ускоряющие силы должны быть больше, чем при стартовых двигателях. Кроме того, поскольку в момент запуска снаряд находится поблизости от поверхности земли, скорость схода снаряда с катапульти должна быть больше его критической скорости. Большая величина ускорения создает большие напряжения в каркасе и элементах снаряда.

С помощью катапульти можно обеспечить удобный и экономичный запуск снарядов, имеющих малую критическую скорость и очень прочную конструкцию, особенно если снаряд имеет значительные размеры. Это обуславливается большей стоимостью стартовых двигателей по сравнению со стоимостью тележки и топлива, используемых при катапультировании, а также более высокими требованиями, предъявляемыми к производству, хранению и эксплуатации стартовых двигателей по сравнению с требованиями к топливу, применяемому в катапульте. Недостатком катапульти являются большая стоимость ее изготовления и установки, а также возможность повреждения или разрушения в результате боевых действий противника. Что касается темпа стрельбы, то более высокий темп может быть скорее обеспечен при помощи стартовых двигателей и недорогих пусковых установок, чем при использовании катапульти.

Характерным для катапульти, применяемых как для запуска самолетов, так и для запуска снарядов, является наличие цилиндра, в котором расширяющийся газ или пар заставляет двигаться поршень, связанный либо непосредственно, либо через специальное устройство с катапультируемым грузом. Непосредственное соединение поршня с грузом осуществляется через металлический штырь (киль, ползун), который входит в прорезь, имеющуюся в верхней части цилиндра. Чтобы предотвратить чрезмерную утечку рабочего газа при движении поршня вдоль цилиндра, прорезь позади поршня или смыкается, или перекрывается. Рабочее давление в цилиндре и его диаметр ограничиваются конструктивными соображениями, однако практически встречается давление порядка 2000 фунт/дюйм^2 в катапультах с малым диаметром цилиндра.

На рис. 1.14 показана большая катапульта с прорезью вдоль цилиндра, предназначенная для катапультирования снарядов,

аналогичных немецкому самолету-снаряду Фау-1. В первой из семи пороховых рабочих камер, которые видны на левой стороне катапульты, топливо воспламенялось электрически, а в остальных — горячими газами, проникавшими в отверстия, которые образовывались в этих камерах по мере движения поршня вдоль цилиндра. На рисунке видно усиление конструкции цилиндра с целью предотвратить расширение прорези последнего под действием давления газов в цилиндре.

На рис. 1.14, а показан самолет-снаряд «Регулус», установленный на специальной тележке и приготовленный к пуску с паровой катапульты с борта американского корабля «Хэнкок».

Запуск снарядов с помощью основного двигателя. Обычно нетрудно провести различие между маршевым (основным) и стартовым двигателями. Когда мы говорим «двигатель снаряда», то мы имеем в виду как раз первый из них, т. е. маршевый двигатель. Однако есть один тип снарядов, у которых двигатель вряд ли может быть назван маршевым. Это снаряды, которые разгоняются до очень большой скорости и далее летят к цели по инерции по баллистической кривой; представителем их является немецкая ракета Фау-2. К ним же относятся и двигатели авиационных снарядов класса «воздух—воздух». Двигатели таких снарядов в настоящей работе будут рассматриваться как стартовые двигатели, поскольку они выполняют все функции последних.

В свете проведенного выше деления запуск некоторых типов снарядов можно все же осуществить только с помощью двигателя самого снаряда. Если установить такой снаряд на соответствующую площадку или на направляющие, снабдить его шасси или тележкой, оборудовать автоматической системой наведения или системой телеуправления, то можно производить запуск этих снарядов подобно самолету, не прибегая к помощи вспомогательных средств.

Запуск снарядов, предназначенных, в частности, для поражения наземных и подводных целей с самолета, можно успешно осуществить и без каких-либо дополнительных двигательных установок, поскольку в момент пуска уже имеется определенная высота и воздушная скорость. В этом состоит наиболее важное преимущество такого способа пуска.

Вертикальный старт. Снаряды, предназначенные для полета в стратосфере, обычно запускаются вертикально. Для достижения расчетной высоты в этом случае требуется большое количество топлива, что в свою очередь обуславливает большие размеры и вес снаряда. Так как к концу работы двигателя вследствие расхода топлива общий вес снаряда значительно уменьшается, то для поддержания ускорения в необходимых пределах требуется относительно небольшая тяга. Оптимальную траекто-

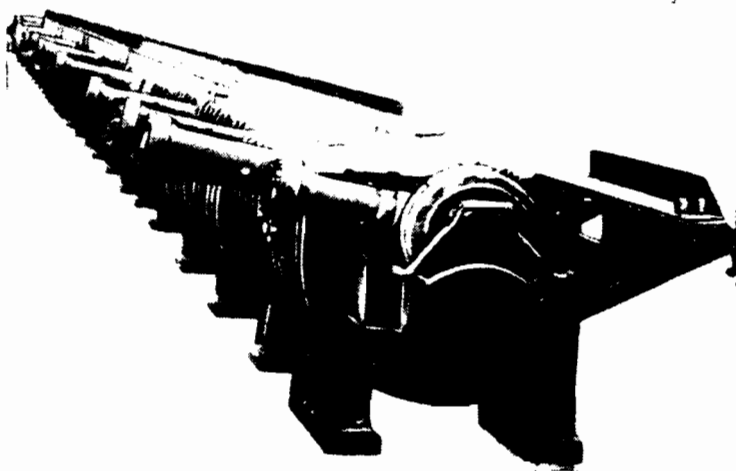


Рис. 1.14. Катапульты с прорезью вдоль цилиндра.

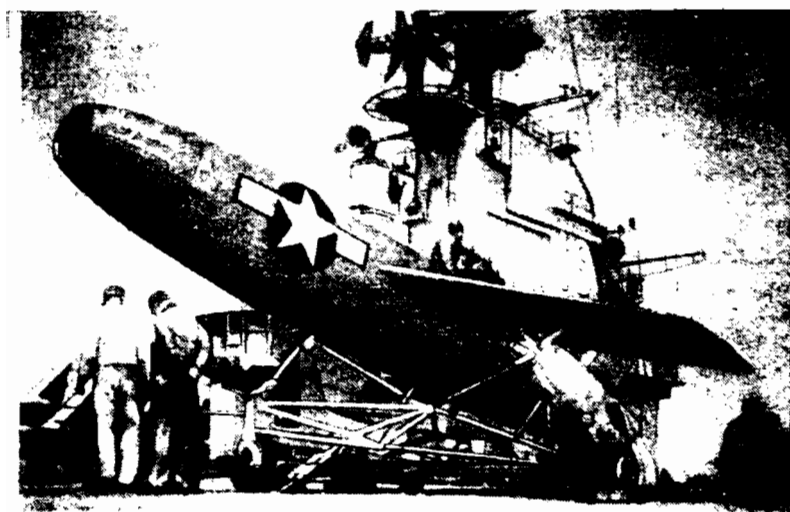


Рис. 1.14, а. Самолет-снаряд „Регулус“ на борту авианосца США „Хэнкок“.

рию снаряда можно получить, если производить пуск с малыми начальными ускорениями и предусмотреть устройства, которые по мере уменьшения веса уменьшали бы и величину тяги (в случае если это является необходимым).

Требования к пусковым установкам для вертикального старта мало отличаются от требований к пусковым установкам с направляющими. Пусковые установки для вертикального старта должны иметь механизм для подъема и установки снаряда в положение для пуска, должны иметь рабочие площадки, оборудование для заправки снаряда топливом, а также другое необходимое наземное оборудование. Очень важно, чтобы струя двигателя при помощи соответствующего отражателя направлялась параллельно поверхности земли с тем, чтобы никакая часть этой струи не могла, отразившись от грунта, повредить снаряд.

1.10. Самолетные пусковые установки

Выше были рассмотрены свойства, которые в той или иной степени присущи всем типам пусковых установок; теперь мы более детально остановимся на самолетных пусковых установках. Наличие большого количества разнообразных реактивных авиационных снарядов, необходимых для удовлетворения весьма широких тактических требований, выдвигает ряд специфических проблем, связанных с пуском снарядов с самолета и с конструкцией самих самолетных пусковых установок. Эти проблемы будут подробно рассмотрены в последующих главах.

Введем следующую классификацию самолетных пусковых установок.

Под *неподвижными* пусковыми установками будем понимать такие, в которых снаряды находятся в неподвижном положении относительно самолета до момента пуска.

Самолетные пусковые установки, которые могут поворачиваться и позволяют выпускать снаряд в различных направлениях относительно линии полета самолета, будем называть *подвижными* пусковыми установками.

Под *убирающимися* пусковыми установками будем понимать такие, которые во время полета убраны в фюзеляж самолета и выпускаются наружу только для пуска снарядов.

Эти определения не являются очень строгими, так как неподвижные или подвижные пусковые установки после того, как выпущен снаряд, могут убираться внутрь фюзеляжа самолета. Мы полагаем, однако, что некоторая неточность в данных определениях не затруднит чтение книги. При необходимости всегда может быть проведено дальнейшее деление каждого типа пусковых установок в зависимости от длины направляющих, количества снарядов, под которое спроектирована пусковая установка,

ее формы (например, обтекаемый контейнер или труба) и, наконец, возможности перезаряжания в воздухе.

Неподвижные самолетные пусковые установки. Неподвижные самолетные пусковые установки по своей конструкции являются наиболее простыми из всех других самолетных пусковых установок. Они состоят обычно из некоторого числа пусковых труб,

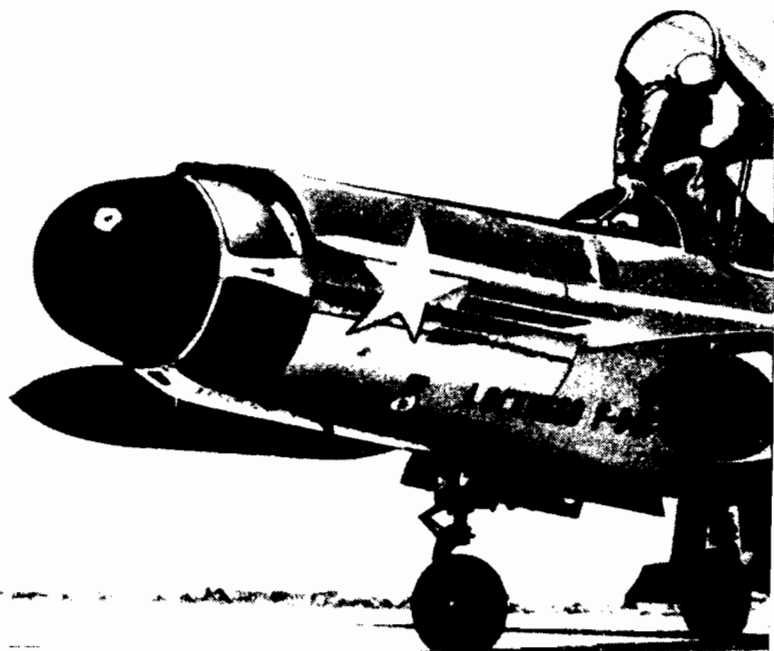


Рис. 1.15. Размещение кассет для запуска снарядов в носовой части истребителя Локхид F-94С „Старфайр“.

направляющих или нескольких захватов. На рис. 1.15—1.17 показаны неподвижные самолетные пусковые установки нескольких типов.

Пусковая установка, изображенная на рис. 1.15, состоит из труб, размещенных в носовой части самолета, и представляет собой пример пусковой установки, полностью скрытой в фюзеляже.

На рис. 1.16 показана пусковая установка в виде контейнера на 12 снарядов. Носовой обтекатель контейнера сделан из хрупкого материала и разрушается при пуске первого снаряда.

На рис. 1.17 показано подвешивание реактивного снаряда на держатель пилонного типа, который может быть использован для подвески как снарядов, так и бомб.

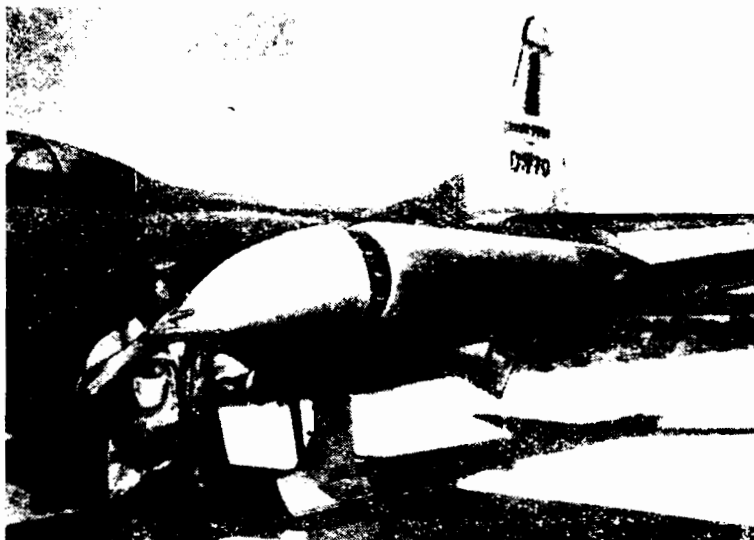


Рис. 1.16. Пусковое устройство, расположенное под крылом самолета.



Рис. 1.17. Пусковое устройство на пилоне под крылом самолета.

Пусковые самолетные установки с направляющими в виде труб, приведенные на предыдущих фотографиях, позволяют управлять движением снаряда во время выстрела, пусковые же установки типа держателей являются устройствами «с нулевым разбегом» и обеспечивают только начальную ориентацию снаряда перед пуском.

Приведенные выше иллюстрации пусковых установок, несмотря на их ограниченное количество, все же показывают, насколько разнообразна конструкция установок. Полностью скрытые в крыле или фюзеляже самолета пусковые установки осуществимы лишь в том случае, когда самолет и снаряды сконструированы как единая система оружия, и применение контейнеров для размещения нескольких реактивных снарядов является очень выгодным. Сложность конструкции самолетных пусковых установок объясняется необходимостью выполнить ряд требований, таких, например, как легкость установки снаряда на пусковое устройство, снабжение энергией от самолетных источников питания до момента пуска снаряда, предохранение снаряда от толчков и вибраций, испытываемых самолетом, выбрасывание отказавших при пуске снарядов и сохранение неиспользованных снарядов при посадке самолета и т. д.

Другие типы неподвижных самолетных пусковых установок являются либо приспособленными бомбодержателями, либо очень похожи на последние. В конструкции некоторых бомбодержателей заранее предусмотрена возможность их использования для двух целей. Действительно, в некоторых случаях, например для пуска планирующих бомб или для сбрасывания снарядов с очень сильной реактивной струей, создающей мощную ударную волну, можно использовать бомбодержатели либо после небольшой переделки, либо вовсе без переделки. При сбрасывании второго из указанных типов снарядов необходимо, чтобы воспламенение двигателя происходило тогда, когда снаряд будет находиться на безопасном расстоянии ниже самолета.

Следующим возможным типом самолетной пусковой установки является катапульта, которая, в частности, может быть использована для пуска снарядов, обладающих сравнительно малой скоростью, в направлении, обратном движению самолета. Катапульта должна обеспечить снаряду достаточное количество движения, которое позволило бы ему быстро набрать расчетную скорость в направлении, обратном движению самолета.

Убирающиеся самолетные пусковые установки. Убирающаяся самолетная пусковая установка во все время полета находится в убранном положении и выпускается наружу только для пуска снарядов; такое устройство установки улучшает летные характеристики самолета.

На рис. 1.18 показана самолетная пусковая установка для неуправляемых реактивных снарядов малого калибра. Она выпускается вниз из фюзеляжа самолета и позволяет осуществить пуск снарядов еще до того, как самолет изменит свой угол атаки, с которым он летел до выдвижения пусковой установки.

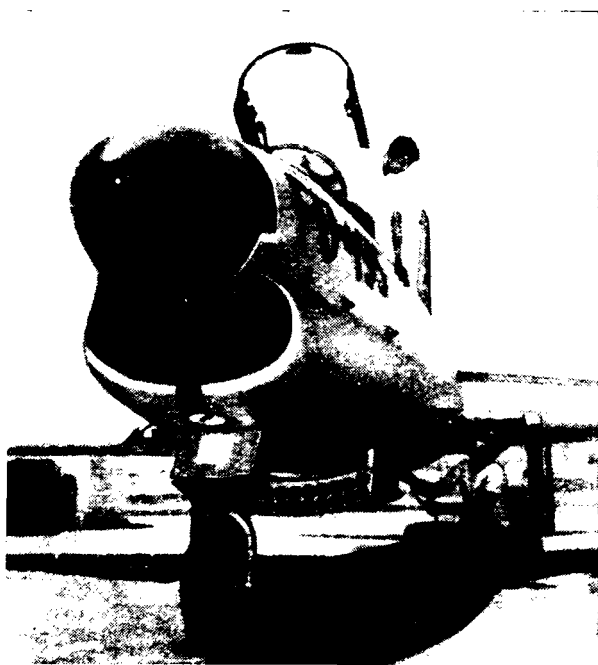


Рис. 1.18. Убирающаяся кассетная пусковая установка.

Для стрельбы реактивными снарядами с самолета могут быть применены также пусковые установки, в основе конструкции которых лежат складные или шарнирные направляющие в виде реек или рельсов. При любых убирающихся пусковых установках возникает ряд дополнительных трудностей, например нужно применять добавочные поперечные крепления в самолете и иметь механизмы для запираания и выпуска пускового устройства; кроме того, при применении таких устройств появляются дополнительные аэродинамические нагрузки, устойчивость и управляемость самолета ухудшаются. Очевидно, что эти трудности должны быть преодолены, если хотят добиться от данной пусковой установки максимальной эффективности.

При пусковых установках, расположенных снаружи самолета, лобовое сопротивление резко возрастает и единственным средством уменьшить его является применение убирающихся пусковых установок. Однако в этом случае возникает не менее серьезная проблема, связанная с влиянием на самолет ударной волны и реактивной струи.

Подвижные самолетные пусковые установки. Для защиты бомбардировщика от атаки противника на пересекающихся курсах часто может возникнуть необходимость иметь подвижные пусковые установки, позволяющие выпускать снаряд под различными углами к направлению полета самолета. Это не значит, что снаряд должен запускаться перпендикулярно к направлению движения самолета — необходимо лишь обеспечить его запуск под сравнительно небольшим углом, что существенно сократит путь снаряда до цели. При пуске снаряда под углом к направлению движения самолета длина направляющих должна **быть весьма значительной** для того, чтобы снаряд получил **большую скорость** и после схода с направляющих не мог **сильно отклониться под действием воздушного потока**.

Насколько оправдано уменьшение времени полета снаряда до встречи с целью, достигаемое за счет усложнения конструкции и увеличения веса подвижного пускового устройства, а также за счет увеличения аэродинамических сил, действующих на снаряд, — это должно являться в каждом конкретном случае предметом тщательного исследования.

Другим вариантом пусковой установки, которая подходит под название «подвижной», является пусковая установка с **изменяемым углом в плоскости тангажа**.

Применение таких пусковых установок ограничивается случаями, когда необходимо обеспечить пуск снаряда в пространство, где поток не возмущен самолетом, что может оказаться весьма существенным для снарядов, сильно отклоняющихся от расчетной траектории при пуске.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПУСКОВЫХ СИСТЕМ

2.1. Введение

В предыдущей главе были даны лишь общие сведения о пуске снарядов, которых, естественно, недостаточно для того, чтобы правильно решить проблему выбора пусковой установки или пусковой системы.

Для освещения этих вопросов необходимо ввести понятие системы¹ и рассмотреть пусковую установку и стартовый двигатель как одну из нескольких составных частей, входящих в данную систему оружия, — комплекс управляемого снаряда. С этой же точки зрения мы можем рассматривать самолет-носитель, корабль или наземную стартовую позицию как другую составную часть этой системы. Каждая составная часть предъявляет в различной мере те или иные требования, которые должны учитываться при проектировании пусковой системы. В частности, довольно жесткие требования могут предъявляться со стороны системы наведения. Точно так же условия пуска будут предъявлять конструктивные требования к другим составным частям системы, и в некоторых случаях взаимодействие между несколькими составными частями может явиться чрезвычайно важным фактором при проектировании. Наконец, на выбор отдельных элементов системы могут оказать определенное — иногда даже решающее — влияние соображения о тактическом назначении данного вида оружия и вопросы транспортировки и снабжения.

Для рассмотрения различных сторон комплекса управляемого снаряда оказывается целесообразным в первую очередь проанализировать основные требования и только после этого обратиться к более детальному изложению вопросов, связанных с пуском снарядов с наземных установок, кораблей и самолетов.

2.2. Выбор способа запуска

Комплекс управляемого снаряда, выбранный для решения определенных тактических задач, будет в значительной степени определять способ пуска и пусковую систему. Другими словами,

¹ Для дальнейшего изучения этого вопроса мы отсылаем читателя к четвертой книге данной серии.

чтобы рассчитать требуемую траекторию и конечную скорость снаряда, должно быть известно, откуда стартует снаряд: с самолета, корабля или с земли; каковы корпус снаряда, система наведения, двигательная установка, боевая часть, скорость снаряда, высота полета и дальность.

Практически выбор способа пуска (пуск с помощью стартового или основного двигателя, катапульты, сбрасывания с самолета) зависит от тактического назначения снаряда. Выбор типа двигателя (двигатель на жидком или твердом топливе), особенно с точки зрения требований к величине тяги и продолжительности ее действия, отчасти зависит от тактического назначения снаряда, однако он зависит также от наличия двигателей необходимого размера и от состояния развития каждого из указанных типов двигателей. Преимущества каждого типа в общих чертах обсуждались в предыдущей главе; детально они рассматриваются во второй книге настоящей серии, в разделе «Теория реактивных двигателей».

При проектировании больших снарядов часто встает вопрос о том, как лучше обеспечить необходимый импульс: при помощи одного стартового двигателя на твердом топливе или при помощи нескольких двигателей, но меньшего размера. Опыт показывает, что, как правило, наименьшие затруднения и наибольшая надежность обеспечиваются при одном стартовом двигателе, однако условия обслуживания, хранения, а также ограниченные возможности снабжения делают выбор очень больших двигателей весьма нежелательным.

Другое соображение заключается в том, что характеристики и надежность могут быть более тщательно исследованы у двигателей небольших и средних размеров, чем у больших, испытание которых сопряжено с огромными затратами.

2.3. Явления, связанные с пуском

Условия пуска. Мы можем описать комплекс управляемого снаряда как систему, состоящую из самолета-носителя, корабельной или наземной стартовой площадки, пускового устройства со всем оборудованием к нему, самого управляемого снаряда и внешней системы наведения (если таковая необходима). В свою очередь управляемые снаряды состоят из следующих основных частей: прочного каркаса с присоединенными к нему несущими и управляющими поверхностями, маршевого двигателя и топливной системы, системы наведения и управления, боевого заряда с взрывателем и предохранительным устройством.

Все составные части системы, а также их вспомогательное оборудование (источники питания, электрореле, баки со

сжатым газом и топливом) тем или иным способом крепятся к корпусу снаряда. Ясно, что при конструировании каждой составной части необходимо учитывать явления, сопровождающие пуск.

Условия пуска характеризуются большими кратковременными и длительными ускорениями, вибрацией, наличием дыма и других продуктов окисления, нагревом, акустическим шумом и ударными волнами. До начала разработки данного снаряда не все числовые значения этих факторов бывают известны — особенно это относится к ударным и вибрационным нагрузкам. Тем не менее учитывать их надо, поскольку недостаточный учет этих явлений на ранних ступенях проектирования может привести к задержке разработки образца, а впоследствии к несчастным случаям с обслуживающим персоналом, к повреждению пусковой установки и снаряда, к вынужденным колебаниям или смещению крыльев и поверхностей управления, к неправильной работе или выходу из строя элементов системы наведения и управления, к неправильной работе расходомеров, к большим изменениям давления в топливных баках и топливных магистралях и т. д. Обычно неисправности возникают в результате повреждения соединений в местах спайки электрических проводов; нередко наблюдаются они и в системе наведения снаряда вследствие микрофонного эффекта в электронных лампах, возникающего из-за механических вибраций электродов.

Важным соображением здесь является то, что при прохождении по конструкции удары и вибрации, как уже говорилось в § 1.4 данной части, могут быть ослаблены или усилены.

Большое ускорение, механический удар и вибрации. Влияние больших ускорений на силовые элементы конструкции снаряда и пусковой установки было рассмотрено в предыдущей главе. Здесь же мы кратко разберем влияние ускорений на другие составные части снарядного комплекса с целью показать взаимосвязь между их конструкцией и выбором пусковой системы.

Как отмечалось выше, большое ускорение, возникающее при разгоне снаряда, может вызвать чрезмерное давление в баках и топливных магистралях, а также неправильную работу пружинных клапанов и других приспособлений. Многие из этих вредных воздействий могут быть уменьшены путем правильного расположения (относительно направления ускорения) клапанов, трубопроводов и других элементов системы, а также путем создания давления в системе, введения специальных устройств в виде перегородок и т. д.

При конструировании систем подачи жидкого топлива и гидравлической системы необходимо все время помнить, что основным фактором, оказывающим влияние на работу системы,

является ускорение, которое возникает при разгоне снаряда и действует по направлению полета снаряда.

Трудности могут также возникнуть в результате больших напряжений, передаваемых на отдельные элементы снаряда или на их крепления, в результате смещения электродов в электронных лампах или в результате нарушения контакта в электрических устройствах. Последний из названных факторов может привести к серьезным нарушениям в работе отдельных элементов системы электронного оборудования, причем эти нарушения носят совершенно случайный характер и могут быть неправильно объяснены малой надежностью системы или другими причинами. Поэтому при анализе неудачных пусков следует всегда иметь в виду изложенные выше соображения.

Другим примером вредного влияния ускорений, возникающих при разгоне снаряда, являются погрешности гироскопов направления, снабженных корректирующим устройством. Гироскопы такого типа, применяемые во многих системах управления, имеют дрейф или уход от заданного направления, вызываемый неточностями изготовления.

Для того чтобы преодолеть эту тенденцию гироскопа, последний снабжается корректирующим устройством — специальным устройством маятникового (несимметричного) типа, — которое под действием силы тяжести непрерывно дает направление вертикали. Во время разгона снаряда маятниковое корректирующее устройство подвергается действию результирующей силы, состоящей из силы тяжести и силы тяги двигателя, вследствие чего маятник отклонится от вертикали и вся система будет определять направление вертикали с ошибкой. Эту погрешность можно устранить, отключая систему коррекции на время разгона снаряда либо выбирая настолько малую скорость прецессии гироскопа под действием системы коррекции, что появляющаяся ошибка будет пренебрежимо мала.

Перегрузка, действующая на такой тип гироскопа, может дать также побочный эффект, вызванный увеличением давления на подшипники карданова подвеса гироскопа. Это приводит к тому, что внешние моменты, вызываемые, в частности, угловыми перемещениями снаряда, передаются на гироскоп, вызывая его прецессию и, соответственно, погрешности в его выходных сигналах.

Передача механических ударов и вибраций отдельным элементам снаряда зависит от материала, из которого изготовлена конструкция, от типа конструкции, прочности ее элементов, типа соединений и от способов крепления элементов к корпусу снаряда. Если в каком-либо элементе имеются условия для резонанса, то существует угроза повреждения конструкции или неправильной работы этого элемента. Неправильная работа может

быть вызвана вибрацией электроконтактов, внутренних элементов электронных ламп или перемещением таких деталей, как конденсаторы, катушки индуктивности и т. д. Опять-таки правильное расположение таких деталей, т. е. с учетом действия сил ускорения, может улучшить условия их работы.

Рассматривая влияние толчков и высокочастотных вибраций, вызываемых стартовыми двигателями, следует всегда помнить, что большие изменения параметров окружающих условий, в частности температуры, могут коренным образом изменить воздействие на звено, соединяющее снаряд и стартовый двигатель.

Ударные волны в атмосфере. Явления, вызываемые в атмосфере работающим реактивным двигателем, обычно бывают двух типов: это постоянные возмущения, которые распространяются со звуковой скоростью («акустический шум»), и ударная волна, которая вследствие повышения температуры, возникающей в результате чрезмерного давления, распространяется в невозмущенной среде со скоростью, превышающей скорость звука. В действительности между этими двумя явлениями нет резкого различия, поскольку скорость распространения в каждом случае является результатом возникающего давления. Зависимость отношения скорости ударной волны от давления описывается уравнением Ранкина — Гюгоньо

$$P = \frac{2\gamma P_0}{\gamma + 1} \left(\frac{V^2}{c^2} - 1 \right), \quad (2.1)$$

где P — избыточное давление, которое представляет собой разницу между давлением на фронте волны и давлением в невозмущенной среде;

P_0 — давление в невозмущенной среде;

γ — отношение удельной теплоемкости воздуха при постоянном давлении к удельной теплоемкости воздуха при постоянном объеме;

c — скорость звука в невозмущенной среде.

Другими словами, V — скорость распространения волны — приближается к c как к пределу, когда P приближается к нулю¹.

Основное вредное влияние акустического шума, который может достигать уровня, превышающего 150 децибел, заключается в том, что оно вызывает механическую вибрацию деталей и элементов конструкции снаряда, а также может вызвать микрофонный эффект в электронных лампах.

¹ Хороший анализ ударных волн дан в книге «The Effects of Atomic Weapons», Los Alamos Scientific Laboratories, New York, 1950.

Другими словами, внешнее воздействие может передаваться каждому телу через воздушную среду точно так же, как и через механическую связь, хотя обычно и не столь эффективно. Было обнаружено, что акустический шум вызывает высокочастотный резонанс элементов электронных ламп и, следовательно, может явиться причиной появления ненормальностей в их работе или почти полного выхода из строя¹. Акустический шум от стартовых двигателей на жидком и твердом топливе особенно опасен для чувствительных элементов, расположенных в хвостовом отсеке снаряда и его оперении. Не следует игнорировать также и вредное влияние акустического шума и ударных волн как на нервную систему, так и на органы слуха человека.

Вероятно, наибольшую неприязнь с этой точки зрения будут доставлять двигатели, которые значительное время работают перед запуском, такие, как турбореактивные, пульсирующие, а в некоторых случаях и жидкостные реактивные двигатели.

Ударные волны, возникающие в результате взрывов, наиболее заметны при запуске двигателей на твердом топливе и при работе пульсирующих воздушно-реактивных двигателей, но они могут также появиться и при работе ЖРД, у которых они наиболее сильны при «жестком запуске». Эти взрывные волны могут оказывать серьезное разрушительное действие. Рис. 2.1 иллюстрирует запись изменения избыточного давления в функции времени для типичной ударной волны, действующей на палубу корабля-носителя.

Нагрев и продукты сгорания. В главе 1 данной части книги коротко говорилось об эрозионном действии реактивной струи и опасности от выбрасываемых частиц, таких, как разрушенные части уплотнителей, частицы расплавленных металлов и несгоревшего топлива. Опасность от таких частиц особенно велика при запуске снарядов с самолета, так как они могут повредить относительно хрупкие части самолета. Кроме этого, повреждения могут быть вызваны нагреванием предметов, находящихся

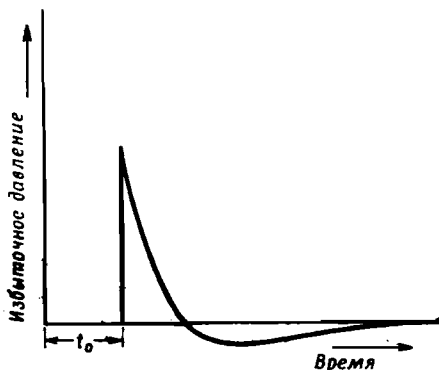


Рис. 2.1. Зависимость давления от времени для ударной волны (t_0 — время, необходимое ударной волне для прохождения от точки взрыва до рассматриваемой точки).

¹ Bird R., The Measurement of Microphony in Valves, *Electronic Engineering* (Great Britain), vol. 23, № 285, November 1951.

на стартовой площадке или самолете-носителе, и динамическим действием на них давления реактивной струи; более того, продукты сгорания стартовых двигателей могут вызывать коррозию или отравление. На сам снаряд продукты сгорания либо совсем не оказывают влияния, либо влияют незначительно, но могут быть опасны для персонала и оборудования, находящегося на стартовой площадке.

Присутствие в газовой струе стартового или маршевого двигателя дыма, состоящего из твердых частиц, нежелательно с различных точек зрения. При запусках с самолета, где применяется оптическая система наведения, дым ухудшает видимость и может даже закрыть цель; при запуске с корабля или с земли он может привлечь внимание противника и помочь ему обнаружить стартовую позицию.

Борьба с нагревом различных предметов истекающими из реактивных двигателей газами может стать проблемой в тех случаях, когда двигатель значительное время работает на пусковой установке. Резиновый защитный слой на воротах ангара подводных лодок, наружная электропроводка, воспламеняющиеся материалы и выступающие резервуары со сжатым воздухом представляют собой объекты, которые могут быть повреждены в результате нагрева от реактивной струи. Тепло, исходящее от стартовых двигателей и распространяемое за счет теплопроводности или излучения, представляет опасность лишь для устройств, смонтированных в самом снаряде. Отдельные части камеры сгорания некоторых стартовых двигателей на твердом топливе в конце периода горения имеют температуру порядка 1000° F (537° C), в силу чего необходимо предусмотреть соответствующую защиту от воздействия такой температуры.

Ошибки и неудачи при пусках. При пусках снарядов всегда могут быть ошибки и неудачи. Возможность их должна быть в значительной мере устранена путем тщательного продумывания всех деталей конструкции и запуска, а также посредством тщательного обучения обслуживающего персонала.

Обычным источником ошибок, особенно в тех снарядах, у которых направление тяги стартового двигателя не совпадает с осью снаряда, является неправильная регулировка направления силы тяги. Это может вызвать чрезмерные угловые перемещения снаряда по тангажу, рысканию и крену, результатом чего является нарушение устойчивости полета снаряда, неправильная работа отдельных элементов или же неспособность системы управления восстановить правильное положение снаряда.

Большие угловые перемещения снаряда могут оказаться особенно опасными в тех случаях, когда в снарядах применяются гироскопы направления, измеряющие углы поворота снаряда. Так, например, если хотя бы одна из карданных рамок коснется

ограничителей, то гироскоп будет вращаться вместе со снарядом и не сможет больше указывать положение снаряда в пространстве.

Другим наиболее распространенным источником ошибок является способ крепления стартовых двигателей. Неправильное положение устройства, крепящего стартовый двигатель к снаряду, может вызвать ударные нагрузки, а слишком прочное закрепление стартового двигателя на снаряде может вызвать заклинивание и воспрепятствовать отделению стартового двигателя от снаряда в конце стартового участка полета.

Хотя инструкция, предусматривающая порядок выполнения операций при пуске, может быть подготовлена очень хорошо, тем не менее ответственный за запуск не должен считать, что все пункты инструкции будут выполняться участниками пуска с одинаковой тщательностью. В условиях предстартовой спешки члены команды всегда могут что-нибудь забыть, например забыть удалить предохранитель инерционного элемента взрывательного устройства, убрать зажимы для замыкания накоротко электрозапала, убрать провода от внешних источников питания, очистить пусковую платформу от разного рода валяющихся инструментов, заменить крепежные болты срезающимися болтами, а также выключить предохранитель цепи пуска.

Нельзя допускать небрежного обращения со стартовым двигателем на твердом топливе во избежание растрескивания пороховых шашек или подвергать их продолжительному действию предельных температур. Более подробно этот вопрос будет рассмотрен ниже при описании требований к хранению и обращению с двигателями на твердом топливе.

2.4. Материальное обеспечение пуска

Огневая и техническая позиции. Огневая и техническая позиции не обязательно должны примыкать друг к другу, так как общее оборудование можно рационально разместить на одной из них.

Подготовка, проверка и пуск управляемого снаряда являются сложной процедурой, требующей значительного количества различного наземного оборудования и разнообразных служб. Обычно огневая позиция располагается поблизости от технической позиции, за исключением тех случаев, когда пуск снарядов осуществляется с подвижных наземных стартовых устройств или с самолета. В последнем случае все приготовления должны осуществляться до взлета самолета, с учетом того, что между взлетом и пуском снаряда может пройти значительное время. Само собой разумеется, что от летчика или от других членов

экипажа самолета нельзя требовать выполнения трудоемких и сложных операций. Поэтому подключение электроэнергии к снаряду, приведение в действие приборов системы наведения, включение зажигания двигателей, управление работой предохранительного устройства боевой части должны осуществляться автоматически или полуавтоматически. Кроме того, важно, чтобы объем и вес оборудования, устанавливаемого на самолете, были сведены к минимуму; электроэнергия, потребная для обогрева снаряда и для работы других электрических и электронных приборов, должна браться от самолетных источников питания в течение всего полета до момента пуска снаряда с целью сохранить к этому моменту весь запас электроэнергии снаряда.

Техническая позиция требует большого количества специального наземного оборудования. В дополнение к помещениям, где происходит окончательная подготовка снаряда перед пуском, необходимы помещения для хранения уже подготовленных к пуску снарядов, мастерские для ремонта механизмов и электронных приборов, склады для хранения боевых зарядов, взрывателей, твердого или жидкого топлива, склады или складские площадки для хранения креплений, отдельных частей двигателей, ручных тележек, вагонеток и т. п. Следует принять меры для обеспечения удобства работы и безопасности технического состава, участвующего в подготовке и пуске снаряда, предусмотреть место для размещения средств связи, приборов наведения и обнаружения цели. Очевидно, что техническая позиция должна быть обеспечена всеми видами коммунальных услуг, а если она оборудуется на суше, то должна иметь запасную электростанцию, которая в случае аварии могла бы полностью обеспечить энергией всех потребителей.

Огневые позиции являются довольно опасными для районов, в которых они расположены, вследствие хранения на них больших запасов взрывчатых материалов, возможности случайного отклонения снаряда от заданной траектории полета, а также опасности падения корпуса использованного стартового двигателя. В силу этого огневые позиции не должны располагаться вблизи крупных населенных пунктов, за исключением случаев, когда к этому вынуждают географические условия, система обнаружения или когда тактические свойства снаряда не позволяют располагать эти позиции далеко от обороняемого населенного пункта.

С другой стороны, необходимо учесть, что размещение огневой позиции в труднодоступной или очень отдаленной местности создает дополнительные затруднения в обслуживании и доставке туда снарядов, стартовых двигателей, топлива и запасных частей.

Хранение и эксплуатация стартовых двигателей. Многие из жидких топлив требуют специальных материалов для их баков, насосов, клапанов и уплотнителей, которые могут быть выбраны только при глубоком знании химических характеристик данного горючего или окислителя. Они могут также потребовать особых условий обращения и заправки, так как известно, что большинство окислителей являются не вполне стойкими, и поэтому их характеристики при хранении ухудшаются или изменяются. В снарядах с ЖРД заправка баков горючим и окислителем производится обычно на пусковом устройстве или на технической позиции. Если применяются баки, в которых должно быть создано давление, то необходимо обеспечить наполнение их инертным газом.

Следует подчеркнуть, что для некоторых видов горючего и окислителя требуется до мелочей отработать весь процесс транспортировки и заправки, что может быть доверено только хорошо натренированному персоналу. Нужно обеспечить его защитной одеждой, предусмотреть пути выхода из опасной зоны и оборудовать позицию устройствами, позволяющими производить немедленное смывание водой пролитых жидкостей и санитарную обработку пострадавших.

Так как твердое топливо является комбинацией горючего с окислителем, то при транспортировке и хранении двигателей, работающих на твердом топливе, необходимо обращаться с ними как со взрывчатыми веществами. Правила безопасности зависят от типа топлива и регламентируются подробно фирмами-изготовителями. Как правило, двигатели на твердом топливе должны храниться на складах со стеллажами и должны предохраняться от резких изменений температур, механических ударов, а также от воздействия электрического тока и электрических полей. При хранении двигатели нельзя складывать в штабель, так как, если последний разрушится, шашки топлива будут повреждены. Если же шашка получит трещину или будет поломана, двигатель при пуске может взорваться, поскольку при увеличении поверхности горения давление в камере возрастает. Степень ухудшения характеристик твердого топлива при хранении зависит от химического состава топлива и от условий хранения. Особое внимание должно быть уделено хранению тех двигателей на твердом топливе, у которых воспламенитель является неотъемлемой частью всего двигателя.

Требования к воспламенителю стартового двигателя на твердом топливе. С целью максимально уменьшить возможность случайного воспламенения химический состав топлива, используемого в стартовых двигателях, подбирается так, чтобы оно было по возможности нечувствительным к внешним воздействиям. Для воспламенения этого топлива обычно используется

заряд, состоящий из черного пороха или металлического порошка, смешанного с окислителем. Зажигание воспламенителя осуществляется большей частью с помощью одного из двух самых обычных устройств. Первое из них — это электрозапал, являющийся по существу электронагревательным элементом, который предназначается для нагревания пороха до его температуры самовоспламенения. Второе устройство, типа петарды, действует на таком же принципе, что и первое, с той разницей, что в нем применяется очень небольшой нагревательный элемент, зажигающий первоначально небольшой заряд, от которого затем воспламеняется основной заряд воспламенителя.

Так как простой электрозапал также может быть использован для воспламенения сперва небольшого заряда, важно установить, что принципиальное отличие между обоими типами разбиаемых устройств заключается в потребном количестве электроэнергии для приведения их в действие. Простой электрозапал обычно потребляет ток силой порядка 10 а, тогда как устройство типа петарды потребляет ток силой всего 1 а или даже меньше. Ввиду этого простой электрозапал более безопасен с точки зрения возможности случайного воспламенения, чем устройство второго типа. С другой стороны, последнее обеспечивает более быстрое и интенсивное воспламенение. Для увеличения надежности воспламенения может быть применено несколько воспламенителей второго типа (с петардой), включенных параллельно без необходимости увеличения силы тока в электроцепи. Как при первом, так и при втором типах воспламенителей важно, чтобы сила тока в цепи была несколько больше минимально потребной для обеспечения надежности зажигания, с тем чтобы скомпенсировать возможные потери в цепи за счет плохих соединений или утечки тока.

Электрическая цепь для включения стартового двигателя должна быть полностью изолирована от других электроцепей и должна отвечать техническим условиям для данной расчетной силы тока. Особые меры должны быть приняты для предупреждения возможной утечки тока: провода, выключатели, соединительные коробки и другая арматура должны быть тщательно подобраны для обеспечения надежной работы при любых неблагоприятных атмосферных условиях. Для проведения предпусковой проверки всего электрооборудования снаряда требуется специальная аппаратура.

Если снаряд и маршевый или стартовый двигатель собраны вместе для хранения в готовом виде до пуска, то важно, чтобы воспламенитель не представлялся в снаряд до тех пор, пока не будет закончена предпусковая проверка всех элементов снаряда. При стартовых двигателях, которые располагаются непосредственно за основным двигателем и имеют воспламенитель

в передней части заряда, указанную выше меру предосторожности принять нельзя, что является весьма нежелательным обстоятельством. Единственно, что можно сделать в этом случае, — это использовать специальные зажимы для замыкания накоротко электрозапала, для чего, однако, требуются соответствующие отверстия в оболочке снаряда.

2.5. Требования к пусковой системе со стороны системы управления

Для того чтобы инженер, занимающийся пусковыми установками, мог получить более или менее ясное представление о требованиях, предъявляемых к пусковым системам со стороны системы управления, в следующем параграфе (§ 2.6), посвященном самолетным устройствам, дается краткое описание наиболее важных способов запуска управляемых снарядов с самолета. Для более полного ознакомления с системами управления и входящими в них приборами мы отсылаем читателя к первой книге данной серии «Управление снарядами»¹.

Какой бы метод управления ни применялся, отклонения снаряда от заданной траектории в процессе пуска могут привести к нежелательным результатам. Это неблагоприятное влияние отклонений возрастает с ростом величины самих отклонений и с увеличением промежутка времени, необходимого системе управления, чтобы начать управление снарядом.

Такие большие отклонения создают опасность того, что система управления может не «захватить» снаряд; во всяком случае, могут возникнуть большие трудности, связанные с быстрыми изменениями направления полета снаряда в процессе «захвата» его системой управления, что может привести к ограничению наименьшей эффективной дальности и к уменьшению максимальной дальности. Смысл ограничения наименьшей эффективной дальности станет ясным, если принять во внимание, что одно из необходимых условий встречи снаряда с целью состоит в том, чтобы переходные процессы снаряда по курсу и высоте успели полностью закончиться до того, как снаряд близко подойдет к цели. Оптимальными условиями пуска являются такие, при которых обеспечивается минимальное отклонение снаряда от требуемой траектории с самого начала участка разгона, даже если до конца этого участка снаряд не получает никаких корректирующих командных сигналов от системы наведения.

¹ Локк А. С., Управление снарядами, перевод с английского, Гостехтеориздат, М., 1957.

Существует несколько методов уменьшения отклонений снаряда после пуска. Так, применялся метод стабилизации снаряда путем его вращения или проворачивания относительно продольной оси, однако этот метод неприменим для многих снарядов. Начальная скорость полета авиационных снарядов, запускаемых с самолета, обычно вполне достаточна для того, чтобы можно было управлять снарядом с помощью аэродинамических управляющих поверхностей, приводимых в действие автопилотом. Для снарядов же, запускаемых с земли, существует метод управления путем изменения направления реактивной струи, осуществляемого также автопилотом. Этот последний метод применялся в немецком снаряде Фау-2.

Системы наведения с точки зрения пуска подразделяются на две категории: *система наведения по лучу* и *система самонаведения*. Систему наведения по лучу мы определим здесь как систему, в которой снаряд направляется все время вдоль линии, соединяющей источник излучения с целью. Обычно это есть линия визирования цели, независимо от того, вырабатываются ли управляющие команды автоматически на самом снаряде (*чистое наведение по лучу*) или на пункте управления с последующей передачей на борт снаряда (*командная система*).

Под системой самонаведения мы здесь понимаем такую систему, в которой снаряд наводится на цель по наиболее выгодному направлению сигналами от аппаратуры, находящейся целиком на борту снаряда. Она включает в себя чувствительный элемент (координатор цели), реагирующий на различные характеристики цели. По этим определениям получается, что система наведения по лучу ничего не знает о цели, в то время как система самонаведения, за немногими исключениями, ничего не знает о том пункте, откуда снаряд начал двигаться. Таким образом, даваемое здесь специфическое определение системы наведения по лучу включает в себя и астронавигационную, и инерциальную системы наведения.

Толчки и удары могут привести к кратковременным нарушениям в работе автопилота или чувствительного элемента системы наведения, а также к тому, что система наведения «упустит», хотя бы на время, цель. Поэтому обычно стремятся сделать так, чтобы подобные удары и толчки не действовали на элементы системы наведения.

Необходимо также помнить, что управление с помощью автопилота особенно важно во время перехода через звуковой барьер, т. е. когда скорость снаряда становится равной или больше скорости звука, поскольку в это время аэродинамическая устойчивость снаряда находится на пределе. Другими словами, необходимо выбрать такой способ пуска и так спроектировать пусковую систему, чтобы величины ударных и вибра-

ционных нагрузок, а также отклонений снаряда от заданной траектории не превышали допустимых значений, определяемых требованиями со стороны системы наведения, с тем чтобы наведение снаряда начиналось как можно раньше.

Системы наведения по лучу. Имеется определенное различие между пуском снарядов, наводимых по лучу, и снарядов, наводимых с помощью команд. Если точка пуска снаряда, снабженного чистой системой наведения по лучу, находится на очень близком расстоянии от источника излучения, то снаряд может быть запущен вдоль траектории, лежащей вблизи оси луча. Если же снаряд на стартовом участке траектории слишком сильно отклонится от оси луча, то он попадет на боковой лепесток диаграммы направленности, что приведет к подаче на снаряд команды обратного знака и — как следствие — к тому, что система наведения «потеряет» снаряд. Данное положение справедливо во всех случаях независимо от промежутка времени между моментом пуска снаряда и моментом его захвата системой наведения.

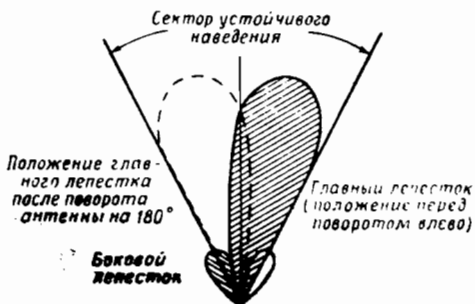


Рис. 2.2. Диаграмма направленности и сектор устойчивого наведения (система наведения по лучу).

Поэтому ширина луча представляет собой границу допустимых отклонений снаряда от заданного направления полета. **Ширина луча** определяется здесь как угол между точками пересечения основного лепестка и боковых лепестков после поворота антенны на 180° (см. рис. 2.2, где эта ширина названа «сектором устойчивого наведения»).

В некоторых случаях для управления лучом можно использовать счетно-решающее устройство, которое обеспечивает расчет будущей точки захвата снаряда и дает возможность произвести пуск снаряда в луч из пункта, не находящегося вблизи источника излучения. В этом случае необходимо, чтобы система наведения начала подавать команды на снаряд лишь после того, как исчезнет угроза потери снаряда вследствие влияния боковых лепестков. Важным фактором при этом становится согласование всех операций по времени; кроме того, необходимо, чтобы отклонения снаряда от требуемой траектории были малы.

На рис. 2.3 изображена схема наведения в луче. Часть траектории снаряда изображена сплошной линией, а часть — пунктирной. Сплошная линия является геометрическим местом точек той части траектории свободного полета снаряда, в преде-

лах которой имеет место захват снаряда системой наведения. Захват может произойти только между точками *A* и *B*. Пунктирными линиями изображены примерные траектории, по которым может полететь снаряд в том случае, если система наведения будет включена в момент, когда снаряд не достиг еще точки *A* или уже прошел точку *B*. Если подача команд начнется

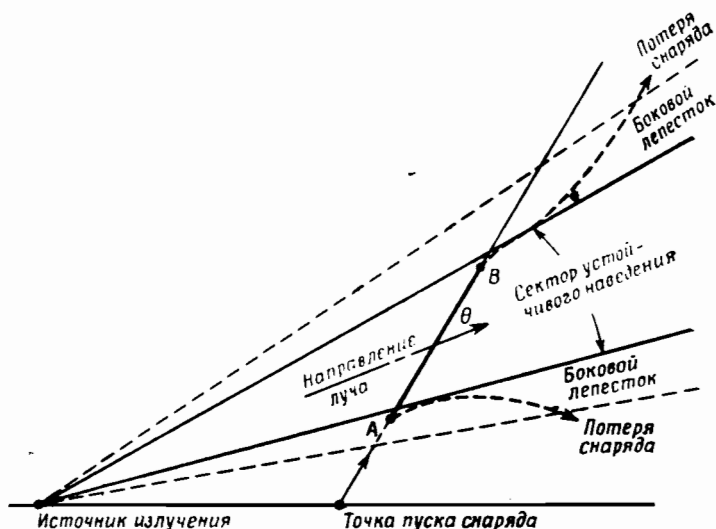


Рис. 2.3. Часть траектории снаряда (*AB*), на которой должна начинаться подача команд для обеспечения успешного захвата (система наведения по лучу).

до того, как снаряд достиг точки *A*, то под влиянием боковых лепестков снаряд будет отходить от луча. Если же команды начнут подаваться после того, как снаряд пройдет точку *B*, то хотя снаряд и будет еще находиться в пределах действия главного лепестка диаграммы направленности, однако реакция снаряда на командные корректирующие сигналы будет уже недостаточно быстрой, чтобы предотвратить вхождение его в зону действия бокового лепестка. В пределах этой зоны снаряд будет получать команды противоположного знака, которые будут увести его из луча.

Очевидно, что при неизменном расстоянии от источника излучения до точки старта расстояние *AB* уменьшается с увеличением угла θ между осью луча и направлением снаряда при пуске, а время, необходимое для того, чтобы снаряд прошел это расстояние, сильно уменьшается, достигая некоторого критического значения при каком-то значении θ , которое в этом случае

является верхней границей допустимых отклонений траектории снаряда. Соответственно, уменьшение угла θ приводит к увеличению расстояния AB , а следовательно, и промежутка времени, в течение которого может произойти захват снаряда. Однако при свободном полете снаряд достигает этого участка позднее. По мере уменьшения угла θ быстро возрастает запаздывание в захвате снаряда системой наведения, что практически определяет нижнюю границу отклонений траектории снаряда.

Максимально допустимые пределы отклонений снаряда при пуске можно увеличить путем использования более широкого луча до момента захвата снаряда с последующим переходом на более узкий луч после того, как переходные процессы снаряда по курсу и высоте до некоторой степени затухнут. Можно обойтись и без такого дополнительного усложнения, если есть какая-либо возможность ограничить отклонения снаряда малыми пределами.

Командная система, как правило, предъявляет менее жесткие требования к отклонениям снаряда от требуемой траектории в процессе пуска. Эта система включает в себя приборы для слежения как за целью, так и за снарядом, а также счетно-решающие устройства для выработки команд в зависимости от дальности (до цели и снаряда) и углового рассогласования между этими двумя направлениями.

Основным фактором, ограничивающим отклонения снаряда, является то обстоятельство, что для захвата снаряда системой наведения необходимо некоторое время, в течение которого ошибки в траектории будут накапливаться. Необходимо, однако, заметить, что время, имеющееся в распоряжении для захвата снаряда и для завершения переходных процессов, очень ограничено лишь в снарядах с малой дальностью стрельбы, таких, как снаряды класса «воздух — воздух». В отличие от чистой системы наведения по лучу командной системе не опасны изменения знаков команды из-за влияния боковых лепестков.

Системы самонаведения. Системы самонаведения также делятся на несколько типов. Чувствительные элементы таких систем могут работать на самом различном принципе (телевизионные, радиолокационные, тепловые, акустические координаторы цели). Существенным является отличие в требованиях, предъявляемых к приборам самонаведения в зависимости от скорости снаряда по отношению к цели. Если цель неподвижна или движется относительно снаряда медленно, то особых трудностей не возникает. Однако если скорость цели примерно равна скорости снаряда, то имеется только три метода наведения. При наведении по методу погони снаряд направляется все время вдоль траектории, касательная к которой совпадает с линией визирова-

ния снаряд — цель или отклоняется от нее на заранее определенный фиксированный угол. При наведении по методу *параллельного сближения* линия визирования цели не изменяет своего направления в пространстве. В случае *пропорционального сближения* скорость поворота снаряда пропорциональна скорости поворота в пространстве линии визирования. Координатор цели осуществляет слежение за целью полунезависимо от маневра снаряда. В первых двух случаях, т. е. при методах погони и параллельного сближения, единственным средством удержания координатора в направлении на цель является маневр снаряда.

Для более детального ознакомления с указанными методами наведения мы отсылаем читателя к книге «Управление снарядами».

При использовании метода погони отклонения снаряда при пуске должны быть достаточно малыми, чтобы координатор не потерял цель до начала работы системы наведения. Это можно легче всего осуществить, если система самонаведения начнет работать сразу же с началом пуска. Если же из-за действия ударных нагрузок координатор цели будет в процессе пуска работать с ошибкой, то необходимо добиваться, чтобы отклонение снаряда при пуске и отклонение от курса, вызванное погрешностями в работе автопилота, в сумме были меньше, чем угол, характеризующий поле зрения координатора цели. Переходные процессы должны завершиться до того, как координатор сможет различить данную цель среди многих других целей.

Для системы самонаведения, работающей по методу параллельного сближения, условия примерно такие же, за исключением того, что отклонения по курсу сказываются не столь пагубно. Если в некоторый момент времени координатор цели начал осуществлять управление, то в дальнейшем необходимо только, чтобы начиная с этого момента цель находилась в поле зрения координатора и на дальности, на которой последний будет в состоянии ее сопровождать. Это зависит от угла зрения координатора, от движения цели и от бокового сноса снаряда, который возникает вследствие отклонений при пуске. То обстоятельство, что направление визирования координатора сохраняется неизменным в пространстве, может явиться громадным преимуществом, когда нужно продолжать слежение за целью в период «ослепления» системы наведения.

При самонаведении по методу пропорционального сближения направление визирования координатора цели в период «ослепления» системы при пуске должно оставаться неизменным. В этом случае требования к отклонениям при пуске приблизительно такие же, как и в случае использования метода параллельного сближения.

2.6. Пуск с самолета

Наряду с большим количеством проблем, связанных только с пуском с самолета, имеется еще целый ряд проблем, общих для всех видов пуска, но особенно важных именно для этого вида.

Одни из этих проблем возникают в связи с движением самолета, не являющегося абсолютно жестким телом, в атмосфере, другие связаны с чувствительностью самолета к повреждениям, третьи — с тактическим назначением самолета и снаряда.

Общие соображения. При проектировании пусковых установок и пусковых систем для самолетов необходимо иметь в виду целый ряд обстоятельств. Такое пусковое устройство невозможно установить, не снижая в какой-то степени качества самолета, однако надо стремиться к тому, чтобы добавление пусковой установки и снаряда не приводило к серьезному ухудшению характеристик самолета. Другими словами, при проектировании самолетных пусковых установок необходимо предусмотреть, чтобы было обеспечено минимальное аэродинамическое сопротивление как при наличии на борту снарядов, так и без них; чтобы установка не оказывала существенного влияния на характеристики устойчивости самолета и имела возможно меньший вес. В то же самое время пусковая установка и пусковая система должны быть спроектированы так, чтобы свести до минимума вредное влияние самолета на характеристики снаряда. Оптимальным является проект, в котором снаряд и самолет рассматриваются как составные части единой системы. Однако в ряде случаев это невозможно, как, например, в случае самолета, спроектированного не только для запуска управляемых снарядов, но и для применения других видов авиационного вооружения.

Тип пусковой установки и место ее расположения до некоторой степени будет определяться системой наведения. Например, если используется система самонаведения, то обычно необходимо, чтобы снаряд мог «видеть» и «захватить» цель еще до момента пуска. Следовательно, в этом случае снаряд не может быть выпущен с неподвижной пусковой установки, расположенной внутри самолета, пока не будут предусмотрены меры для того, чтобы координатор был в состоянии следить за целью. Такой снаряд можно запустить либо с неподвижной пусковой установки, расположенной снаружи самолета, либо с убирающейся пусковой установки.

Если снаряд наводится по лучу, то с точки зрения системы наведения возможен запуск снаряда с установок, расположенных как снаружи, так и внутри самолета, ибо в указанных выше мерах в этом случае нет никакой необходимости.

С другой стороны, отклонения от заданной траектории снаряда, наводимого по лучу, при пуске должны быть меньше, чем у самонаводящегося снаряда, поэтому если последний может запускаться с пусковой установки «с нулевым разбегом», то для запуска первого необходима пусковая установка с рельсовыми направляющими.

На выбор типа и места расположения пусковой установки будет влиять также и задача, для выполнения которой предназначен снаряд. Авиационные снаряды для борьбы с бомбардировщиками имеют сравнительно малые размеры, высокую скорость и небольшую дальность и запускаются прямо по направлению полета истребителя. Естественно, что для таких снарядов могут быть использованы неподвижные пусковые установки. Бомбардировщику же приходится обороняться против большого количества подобных атак с различных направлений, и поэтому может оказаться необходимым применение подвижных пусковых установок (особенно для запуска под большим углом к направлению полета), поскольку оборонительный снаряд имеет ограниченные возможности для совершения быстрого маневра. Может также возникнуть необходимость производить зарядание снарядов во время полета ввиду того, что количество пусковых установок, монтируемых на самолете, будет недостаточно велико.

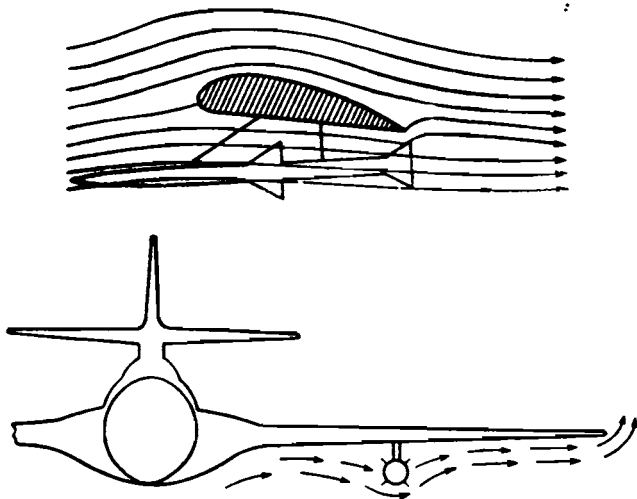
Для запуска снарядов, применяемых бомбардировщиками для отражения атак с хвоста, а также снарядов, предназначенных для борьбы с подводными лодками, могут потребоваться *установки «обратного пуска»*, т. е. установки, позволяющие производить пуск в направлении, противоположном направлению полета самолета. В этом случае перед конструктором снаряда и пусковой установки **возникает ряд проблем**. Некоторые из этих проблем связаны с ограниченностью места в хвостовой части самолета, а одна из проблем, имеющая особую важность для конструктора снаряда, состоит в том, что скорость снаряда во время его полета должна в какой-то момент быть равной нулю.

Другой серьезной проблемой является то, что хвостовое оперение самолета может быть легко повреждено ударной волной и реактивной струей. Если необходимо произвести запуск многих снарядов в направлении, обратном движению самолета, то можно применить небольшую катапульту. Тем самым мы не только ослабим воздействие ударной волны и реактивной струи, но и получим, возможно, выигрыш в весе, так как необходимость в применении стартовых двигателей отпадет.

Снаряды, предназначенные для стрельбы с самолета по наземным целям, могут значительно отличаться друг от друга по размерам в зависимости от тактического назначения снаряда. Снаряды больших размеров, расположенные снаружи самолета,

по-видимому, целесообразнее применять по удаленным целям, поскольку они ухудшают летные характеристики самолета-носителя, что делает его более уязвимым. Для таких снарядов предпочтительнее применять метод простого сбрасывания, поскольку при этом отпадает необходимость в стартовых двигателях и в то же время обеспечивается достаточно быстрое удаление снаряда от самолета-носителя.

Влияние условий обтекания самолета. На рис. 2.4 схематично показано обтекание воздушным потоком самолета, под



Р и с. 2.4. Обтекание снаряда и крыла самолета-носителя воздушным потоком.

крылом которого размещен снаряд. Очевидно, что во время нахождения снаряда на пусковой установке каждая из плоскостей снаряда, создающая подъемную силу, будет расположена под различными углами атаки по отношению к потоку. Как только снаряд покинет установку и станет свободным, он начнет реагировать на действующие на него аэродинамические силы, в результате чего будет стремиться отклониться от заданной траектории и от заданного положения. На характер этой реакции снаряда будет влиять ряд факторов, в том числе: 1) наличие системы управления или наведения, которая работала бы с самого начала пуска; 2) эффективность несущих и управляющих поверхностей при скорости пуска. Из-за того, что снаряд под действием возмущающих аэродинамических сил стремится отклониться от требуемой траектории и принять новое направление, возникает ряд нежелательных явлений. Одним из них является опасность повреждения снаряда или самолета вследствие

значительных отклонений снаряда. Он может, например, повернуться и ударить по самолету или развернуться так, что реактивная струя будет частично воздействовать на крыло или фюзеляж самолета. Другое нежелательное явление состоит в том, что отклонения снаряда от требуемой траектории могут исключить всякую возможность успешного наведения снаряда на цель. Это может произойти и с наводимым по лучу снарядом, который должен войти и в дальнейшем оставаться в луче радиолокатора, или с самонаводящимся снарядом, который должен удерживать цель в пределах максимального угла зрения чувствительного элемента. Проблема больших отклонений усугубляется еще и тем, что величины этих отклонений от пуска к пуску могут меняться. Изменения условий полета, особенно углов атаки, приведут к изменению величины, а может быть, даже и направления этих отклонений.

В предыдущих рассуждениях предполагалось, что пуск снаряда осуществляется по направлению полета самолета-носителя. Проблема становится, очевидно, значительно более трудной, если допустить, что нужно применить подвижную пусковую установку.

В результате того, что приходится запускать снаряд с подвижной установки в любом направлении, в том числе и близком к 90° по отношению к курсу самолета, оказывается, что необходимы новые принципы проектирования снарядов. С точки зрения как аэродинамики, так и конструкции обычные снаряды совершенно непригодны для пуска при углах атаки, близких к 90° . Если снаряд обладает «флюгерной» устойчивостью, то он стремится расположиться вдоль потока, поэтому и задача пуска снаряда в перпендикулярном к курсу самолета направлении становится практически невыполнимой. На аэродинамических поверхностях будет происходить срыв потока, вследствие чего вполне вероятно, что возникающие при этом нагрузки будут значительно выше расчетных, особенно при очень высокой скорости пуска.

Применяемый для этих целей снаряд должен был бы иметь форму сферы с регулированием направления тяги двигателя. Хотя с других точек зрения такая конструкция снаряда, очевидно, не является приемлемой, она показывает, как можно подходить к проектированию снаряда, чтобы последний удовлетворял требованиям, предъявляемым к нему при пуске в боковом направлении. Возможны также и другие методы решения этой проблемы, однако обсуждение их не входит в задачу данной главы.

С проблемой, несколько отличной в своей основе от только что изложенной, встретились в Германии при сбрасывании снарядов Фау-1 с самолетов. Снаряд был расположен на самолете

в таком месте, что вращающийся поток воздуха позади пропеллеров заставлял снаряд после его отделения от самолета поворачиваться через крыло. В некоторых случаях этот вращающийся момент был настолько велик, что снаряд переворачивался «на спину» и в таком положении продолжал лететь. Проблема была разрешена следующим образом: в момент отделения снаряда одному из крыльев посредством спиральной пружины сообщался толчок вниз.

При пуске снарядов путем их сбрасывания со скоростных самолетов может возникнуть и другая проблема, связанная с местными воздушными потоками. Так, при сбрасывании обычных бомб турбулентность потока была в некоторых случаях настолько значительной, что бомба после ее освобождения ударяла по различным частям бомбового отсека.

Влияние маневра самолета. Выше было отмечено, что вследствие **изменения условий полета** происходят изменения в неоднородном **воздушном потоке**, которые могут привести к тому, что **величины отклонений снаряда** при каждом пуске будут различны. Необходимо **учитывать еще один фактор**, заключающийся в **изменении нагрузки, действующей на пусковую установку со стороны снаряда и самолета при маневре** последнего. Это обстоятельство может быть одним из **наиболее важных** в смысле условий нагружения, которые **следует учитывать** при проектировании пусковой установки.

Влияние маневра самолета или установившихся условий полета (влияние этих условий не так очевидно) заключается в том, что в полете направление линии прицеливания будет иным, чем на земле. Если пусковая установка расположена на крыле, то из-за воздействия воздушного потока и вызываемого им изгиба и кручения крыла пусковая установка будет перемещаться относительно фюзеляжа. Нагрузки, действующие непосредственно на пусковую установку, могут также вызвать смещение снаряда относительно его первоначального расположения на крыле. При **использовании систем наведения, требующих тщательной наводки пусковой установки с помощью прицела, расположенного в кабине летчика, а также в случае применения некоторых снарядов, наводимых по лучу, необходимо** определить средние отклонения линии прицеливания для различных условий обтекания и **учитывать их** при регулировке пусковой установки на земле. Можно также применить метод введения поправок в направление линии прицеливания в процессе полета.

Влияние маневра самолета сказывается и на динамике процесса наведения; правда, это должно беспокоить прежде всего инженера — специалиста по системам наведения, а не конструктора пусковой установки. Если система наведения такова, что

для управления движением снаряда после схода с пусковой установки необходимо подавать команды с самолета-носителя, то в таком случае маневр самолета после пуска снаряда ограничен. Например, если применяется система наведения по лучу, то маневр самолета ограничен требованием, чтобы снаряд мог оставаться все время в луче, даже если последний на мгновение отклонился от цели.

Наконец, если пуск производится в момент выхода самолета из пике, при капотировании, скольжении, развороте или крене, то это приводит к отклонению направления полета снаряда от направления, которое он имел в момент пуска, вследствие того, что самолет при указанных маневрах сообщает снаряду угловые или линейные поперечные ускорения. Влияние некоторых из указанных маневров показано на рис. 2.5. Степень отклонения снаряда будет зависеть от вида применяемой системы наведения, от характеристик флюгерной устойчивости снаряда и от скорости маневра.

Обеспечение безопасности. Большинство проблем, касающихся обеспечения безопасности при пуске с самолета, по своему характеру (но не по степени важности) сходны с проблемами, встречающимися при пуске с наземных или корабельных установок. Если учесть, что экипаж самолета отделен от снаряда лишь незначительной преградой, а сам самолет сравнительно непрѣчен, то станет ясно, почему при запуске снарядов с самолетов приходится принимать такие меры безопасности, которые не нужны при пуске с наземных пусковых установок.

Прежде всего опасность исходит от двигателя, используемого для пуска снаряда. Если применяется двигатель на твердом топливе, то вполне возможно, что он может взорваться. Степень этой опасности почти целиком зависит от обращения с двигателем и от условий его хранения после получения с завода. Небрежное обращение, сильные толчки и удары при транспортировке или хранение при очень низкой либо очень высокой температуре могут привести к растрескиванию топливных шашек и, как результат этого, к взрыву заряда во время его воспламенения.

По всей вероятности, взрыв произойдет сразу же после воспламенения заряда, хотя не исключено, что он может произойти и в любой другой момент, вплоть до момента выгорания топлива. Несомненно, что взрыв непосредственно после воспламенения заряда приведет к повреждению самолета, причем степень этого повреждения предсказать весьма трудно. Обычно наблюдаются довольно слабые взрывы двигателей. Если взрыв происходит впереди самолета, создается угроза того, что самолет встретится с осколками снаряда или двигателя и получит повреждение.

До известной степени аналогичная опасность возникает в случае, когда для запуска снарядов применяется отделяющийся стартовый двигатель. Возможно, что этот двигатель окажется неустойчивым и начнет кувыркаться, поэтому не исключена возможность, что он может попасть на траекторию полета

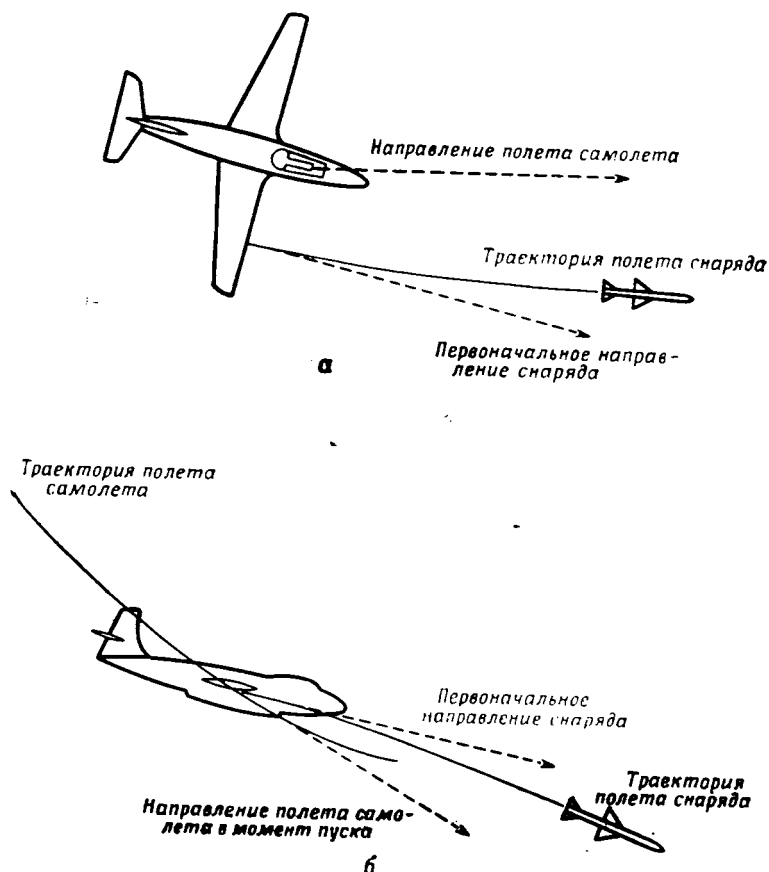


Рис. 25. Влияние маневра самолета на направление полета снаряда.

самолета. Эта проблема является особенно острой в случае применения нескольких стартовых двигателей, а также в случае залповой стрельбы или стрельбы очередями. О других опасностях, возникающих при нормальной работе реактивных двигателей и связанных с воздействием ударной волны, с нагревом и динамическим давлением реактивной струи, а также с тем, что в струе могут содержаться частицы металла или несгоревшего топлива, говорилось выше. Были рассмотрены и вопросы,

касающиеся опасного действия пламени жидкостных и воздушно-реактивных двигателей и воздействия теплоизлучения.

К опасностям, возникающим при отклонениях снаряда от заданной траектории за счет влияния неоднородности потока вокруг снаряда, установленного под крылом самолета, следует добавить то, что некоторые снаряды после пуска могут столкнуться с самолетом-носителем. Необходимо помнить, что абсолютная скорость снаряда после его отделения от самолета достаточно высока, и на него воздействуют весьма значительные аэродинамические силы. В то же время относительная скорость самолета-носителя и снаряда на первых нескольких футах полета снаряда сравнительно низка, так что имеется некоторый промежуток времени, в течение которого может произойти столкновение снаряда с самолетом. Другой причиной возможного столкновения снаряда с самолетом может явиться выход из строя системы управления или нарушение ее работы.

Наконец, существует опасность повреждения корпуса снаряда в процессе пуска. Наиболее вероятно, что такого рода повреждения могут возникнуть в конце стартового участка траектории, когда скорость и продольные ускорения достигают максимальной величины, поэтому возможность столкновения самолета с осколками снаряда мала.

Применение пусковых установок управляемых снарядов для других видов оружия. Иногда конструктор пусковой установки сталкивается с требованием, чтобы пусковую установку можно было применять и для других видов оружия (например, неуправляемых ракет, бомб), а также чтобы с помощью одной пусковой установки можно было запускать несколько различных снарядов. За исключением случая простого сбрасывания снарядов, когда пусковая установка представляет собой, по сути дела, бомбосбрасыватель, такого рода требование почти всегда значительно осложняет проектирование пусковой установки. Если допустить, что для получения оптимальной конструкции необходимо рассматривать самолет и снаряд как составные части единой системы оружия, то трудно оправдать требование, чтобы пусковая установка могла быть применена для нескольких видов оружия. Несомненно, что приспособить установку для запуска простых по конструкции снарядов не представляет особого труда. Однако для более сложных снарядов необходимо разместить на самолете вспомогательное оборудование, такое, как радиолокаторы, счетно-решающие устройства и другие составные элементы систем наведения; все это приводит к тому, что с самолета уже нельзя производить запуск снарядов других типов, а для применения обычного вооружения он становится совершенно непригодным.

2.7. Пуск с корабля

Проблемы, связанные с пуском управляемых снарядов с кораблей, решаются различным образом в зависимости не только от типа снаряда, но и от типа корабля. С небольших надводных кораблей без существенной переделки можно производить запуск весьма ограниченного круга снарядов.

Каждый из типов снарядов требует соответствующего места для размещения оборудования системы наведения для проведения предстартовой подготовки и контрольных операций, места для пусковой установки, специальных помещений для хранения топлива, средств для транспортировки снарядов по кораблю. Удовлетворение этих требований при большом разнообразии снарядов сильно затрудняет выполнение кораблем задачи, для которой он предназначен. Для проектирования оптимальной системы оружия, очевидно, будет необходимо, чтобы небольшие корабли, как и самолеты, были специально сконструированы с учетом запуска снарядов определенного типа.

Килевая или бортовая качка, если она не превышает допустимых пределов, не создает больших трудностей для запуска управляемых снарядов. Пусковые установки для дальнобойных и других снарядов, допускающих небольшие отклонения снаряда в момент пуска, могут быть по конструкции сравнительно простыми и крепиться непосредственно к самой палубе. Однако иногда, особенно при запуске зенитных снарядов, может оказаться необходимым применять поворотные пусковые установки и, возможно, даже монтировать их на стабилизированной платформе с целью значительно уменьшить корректировку снаряда в процессе полета.

Монтаж пусковых установок. Как было сказано ранее, большим преимуществом пусковых установок «с нулевым разбегом» и пусковых установок с короткими направляющими является то, что они требуют мало места для своего размещения. Подготовка базы для удобного монтажа не представляет трудностей (исключая снаряды с вертикальным стартом), поскольку силы реакции пренебрежимо малы. Следовательно, отпадает надобность в массивных фундаментах, и зачастую оказывается возможным применение передвижных пусковых установок.

Иногда весьма желательно, чтобы пусковую установку можно было перемещать, так как в этом случае установку снаряда на пусковое устройство можно производить в одном месте, а сам пуск — в другом. Пусковые установки с короткими направляющими или «с нулевым разбегом» нетрудно спроектировать так, чтобы они почти не выступали над палубой, сделав их складными или убирающимися в соответствующие люки в палубе. Передвижные или убирающиеся пусковые установки

особенно необходимы при запуске снарядов с палубы обычного авианосца, которая должна быть свободна от всяких посторонних предметов, препятствующих взлету и посадке самолетов.

Пространство палубы, находящееся позади пусковой установки, требует защиты от действия реактивной струи. Это можно лучше всего осуществить путем установки отражателей. В одной из конструкций отражателя применялись каскадно подвешенные пластинки, смонтированные на прямоугольной раме. Рама устанавливалась на шарнирах, так что ее можно было опускать вниз, в люк палубы.

Иногда может оказаться необходимым использовать в течение длительного времени корабельную установку в качестве хранилища для подготовленного к пуску снаряда. Поэтому нужно обеспечить доступ к снаряду, поскольку некоторые подготовительные операции, такие, как установка аккумуляторных батарей, выполняются совсем незадолго до пуска. Точно так же следует предусмотреть возможность предстартовой проверки элементов снаряда. Должны быть предусмотрены и специальные люки для подсоединения системы питания и проверки оборудования и места для рабочих площадок.

Установка снаряда в пазы пускового устройства с короткими направляющими, а также на опорные точки пусковой установки с нулевым разбегом требует большой точности.

Разработка снаряда для запуска с корабля ведется на суше, где, как правило, широко применяются краны и другое подъемно-транспортное оборудование. Слишком часто не принимаются во внимание особенности условий пуска с корабля, где очень важна экономия пространства, а ограниченные проходы и рабочие площади в совокупности с движением корабля создают большие трудности для пуска. Для того чтобы подвезти снаряд вплотную к пусковой установке и, если нужно, поднять его, можно разработать специальные тележки. Они могут иметь направляющие для автоматической установки снаряда в нужное положение при перегрузке на пусковую установку. Если требуется обеспечить высокий темп огня, то следует тщательно продумать вопрос о подаче снарядов на пусковую установку и спроектировать соответствующее оборудование.

Монтаж катапульта. Монтаж катапульта на борту корабля для запуска снарядов связан с решением многих вопросов. Необходимость сообщить снаряду определенное ускорение заставляет применять катапульты с длинными направляющими или комбинацию сравнительно короткой катапульты со вспомогательным стартовым двигателем. Очевидно, что единственным преимуществом использования такого комбинированного устройства по сравнению с применением для запуска одного большого стартового двигателя будет являться меньшая потребная величина

импульса двигателя. Если брать стоимость на величину единичного импульса, то надо сказать, что небольшие двигатели гораздо экономичнее крупных. Если бы можно было использовать для запуска с катапульт стандартные авиационные стартовые двигатели, проблема снабжения двигателями была бы полностью разрешена, а экономия средств получилась бы весьма значительной.

Наряду с этими преимуществами имеется и ряд недостатков. Например, усложняются вопросы материально-технического обеспечения, поскольку приходится снабжать не только элементами стартовых двигателей, но и оборудованием для эксплуатации и ремонта катапульт. Кроме того, возникает ряд трудностей технического порядка, связанных с использованием двигателей в комбинации с катапультной.

Если предположить, что для запуска требуется мощная, **большая катапульта**, то возникает необходимость решить **проблему ее монтажа**. По вполне понятным причинам желательно применять такие **устройства**, которые не выступали бы над палубой, то есть **цилиндр катапульти** должен быть утоплен в люке палубы. Чтобы обеспечить **прямое движение** снаряда, катапульта должна быть **изолирована от воздействия** растягивающих, сжимающих и изгибающих **усилий со стороны палубы** с помощью «поплавковых» устройств. В казенной части мощной катапульти могут возникнуть большие реактивные нагрузки, поэтому необходимо обратить особое внимание на разработку амортизаторов, предохраняющих корпус корабля от воздействия этих нагрузок.

Все изложенное выше убедительно доказывает, что установка катапульти на существующие корабли требует их значительной переделки. Принимая во внимание требования к проектированию и монтажу катапульт, малый темп стрельбы, а также возможность быстрого вывода противником катапульт из строя, мы приходим к **окончательному выводу, что катапульти, монтируемые на кораблях, лучше всего подходят для запуска дальнобойных снарядов средних и больших размеров, снабженных аэродинамическими поверхностями.**

Запуск с кораблей. Идеальным кораблем для запуска управляемых снарядов является авианосец, имеющий большую, не заставленную никакими препятствиями взлетную палубу, ангарную палубу для хранения самолетов и большие скоростные подъемники. Устанавливаемые в настоящее время на авианосцах мощные катапульти могут быть использованы для запуска как пилотируемых самолетов, так и подобных самолету управляемых снарядов. Кроме того, авианосцы служат базой, полностью обеспечивающей применение снарядов непосредственно с корабля или с самолетов. На нем можно легко устроить

площадку для ремонта, монтажа и обслуживания управляемых снарядов, а также той части системы наведения, которая расположена на борту. На авианосце нетрудно также обеспечить выполнение особых требований к хранению топлива и очень легко можно потушить пожар или промыть палубу. Передвижные пусковые установки могут быть полностью подготовлены к запуску на ангарной палубе, а затем быстро доставлены на взлетную палубу. Неподвижные установки монтировать на взлетной палубе нельзя; исключения составляют авианосцы со скошенной палубой, но и на них пусковые установки не должны мешать взлету и посадке самолетов. С авианосцев вполне возможно производить вертикальный запуск очень больших снарядов. Пусковые установки для небольших снарядов класса «корабль — воздух» могут быть размещены на кормовой части корабля, где в настоящее время размещаются обычные орудия.

Вооружение управляемыми снарядами линкора может значительно увеличить его возможности борьбы с береговыми объектами противника и повысить эффективность его противовоздушной обороны. На линкоре можно найти достаточно места, чтобы разместить пусковые установки любых типов, особенно если заменить ими крупнокалиберные орудия, применяемые на линкорах в настоящее время. Имеющиеся на кораблях этого класса склады боеприпасов, а также подъемно-транспортное оборудование могут быть приспособлены для хранения управляемых снарядов и для подачи их к пусковым установкам. Хотя линкор труднее приспособить для запуска управляемых снарядов, чем авианосец, однако эти трудности не являются непреодолимыми, ибо на линкоре всегда можно найти место для подготовки и предстартовой проверки снаряда, а также для размещения тех элементов системы наведения, которые должны находиться на борту корабля.

Пусковые установки на подводных лодках. Запуск управляемых снарядов с подводной лодки, несомненно, никогда не будет столь эффективным, как с больших, хорошо оборудованных стартовых позиций, находящихся как на суше, так и на борту крупных кораблей. К трудностям, возникающим при запуске снарядов с больших стартовых площадок, здесь добавляется еще целый ряд других, связанных с особенностью конструкции подводной лодки и условиями ее боевого применения. Для хранения и подготовки снарядов на лодке может быть отведено лишь ограниченное место, а перемещение больших снарядов по узкой палубе является нелегким делом. И все же есть все основания полагать, что, несмотря на все эти трудности, подводная лодка, вооруженная управляемыми снарядами, может стать весьма эффективным боевым средством. Тактические

соображения могут потребовать, чтобы пуск был произведен в условиях ограниченной видимости немедленно после всплытия лодки на поверхность; в этом случае вся разработка конструкции пусковой системы и оборудования для установки на пусковое устройство снаряда должна идти с учетом этих условий.

Одним из очевидных преимуществ подводной лодки является ее способность подойти незамеченной на очень близкое расстояние к цели. Отсюда основное назначение этого боевого корабля состоит в том, чтобы проникнуть далеко во вражеские воды и внезапно атаковать торговые суда, военные корабли и береговые сооружения противника по принципу «ударь и убегай». Применение управляемых снарядов, имеющих среднюю дальность стрельбы, скажем, от 100 до 500 миль, позволит подводной лодке лучше всего выполнить эту задачу, не подвергаясь опасности быть обнаруженной, и даст ей возможность поражать даже удаленные от берега цели.

При оснащении подводной лодки управляемыми снарядами средней дальности действия возникает много проблем. Запуск снарядов с подводной лодки в подводном положении связан прежде всего с размещением хранилищ для снарядов. Как хорошо известно, внутри подводной лодки нет свободного места, а отверстия в корпусе должны быть немногочисленными и небольшими по размеру. Поэтому одно из возможных решений состоит в том, чтобы устроить на палубе лодки водонепроницаемый ангар, а за ним расположить пусковую установку. Правда, это решение обладает двумя недостатками: оно приводит к уменьшению метацентрической высоты и к сильному увеличению гидродинамического сопротивления при движении лодки под водой. Ангар мог бы сообщаться с лодкой специальным люком, чтобы предстартовая подготовка и проверка снаряда производились до всплытия лодки.

Когда лодка всплыла, противник может ее легко обнаружить и подвергнуть атаке. Следовательно, необходимо, чтобы все операции, связанные с подъемом пускового устройства, установкой на нем снаряда и с самим пуском были завершены очень быстро. Поскольку может случиться, что все это придется делать в темноте, без всякого освещения, то требуется, чтобы подготовка снаряда к пуску производилась без участия экипажа лодки.

Для этого нужно так спроектировать снарядный комплекс, чтобы с помощью специальных устройств после открытия ворот ангара пусковая установка выдвигалась, направляющие опускались или поднимались через открытые ворота при установке их в нужное положение и чтобы снаряд можно было выдвинуть из ангара и поставить на пусковую установку.

Перед пуском снаряда необходимо, по-видимому, закрыть ворота ангара, чтобы предохранить его от действия струи и ударной волны.

Для защиты водонепроницаемых прокладок ворот ангара от воспламенения можно предусмотреть специальные дефлекторы с целью отражения реактивной струи двигателя.

Весьма возможно, что снаряды, предназначенные для стрельбы с подводных лодок, будут либо баллистического типа, либо будут обладать аэродинамическими поверхностями для создания подъемной силы и выпускаться под небольшими углами возвышения. В последнем случае вполне вероятно, что в качестве маршевого двигателя снаряд будет иметь какой-либо из воздушно-реактивных двигателей. В качестве стартового двигателя при этих условиях лучше всего выбрать двигателя на твердом топливе. Они просты в обращении, не предъявляют жестких требований к условиям хранения, а для их воспламенения требуется только соответствующая электрическая цепь и выключатель. Для того чтобы уменьшить, насколько это возможно, длину пусковой системы, могут быть применены одинарные или двойные стартовые двигатели с наклонным соплом, монтируемые либо под снарядом, либо на нижней его части.

Путем тщательной разработки конструкции можно сделать так, чтобы эти двигатели служили одновременно и салазками для поддержания снаряда на пусковой установке.

2.8. Пуск с наземных стартовых позиций

Запуск снарядов с наземных стартовых позиций аналогичен запуску с крупных кораблей, с той только разницей, что, как правило, производить его гораздо проще. При запуске с наземных позиций с целью получения заданного темпа огня можно установить сколько угодно пусковых установок; кроме того, подготовка снаряда к пуску и его транспортировка могут производиться в более легких условиях, чем на борту корабля.

Вопросы, на которых мы сейчас остановимся, касаются главным образом правильного размещения хранилищ и рабочих площадок по отношению к стартовой позиции и станциям системы наведения, организации связи и взаимодействия между несколькими стартовыми позициями и пунктами их снабжения, а также принятия мер по обеспечению безопасности самой стартовой позиции и окружающей местности. Обычно решение этих проблем не вызывает технических трудностей, и многие из них не входят в круг вопросов, связанных непосредственно с пуском.

Тактические соображения. Для удобства рассмотрения наземные стартовые позиции можно разбить на три вида: *стационарные позиции* для обороны важных объектов от бомбардиро-

вочной авиации; *временные позиции*, организуемые в зоне боевых действий войск для целей ПВО или для стрельбы по вражеским наземным целям; *постоянные позиции*, предназначенные для запуска очень больших снарядов.

Чтобы организовать оборону крупного города от атак бомбардировщиков с любого направления и в то же время свести до минимума количество снарядов, запускаемых над городом, необходимо окружить его сетью стартовых позиций. На рис. 2.6 показана фотография такой позиции снарядов «Найк», состоящих на вооружении армии США. Управление огнем батарей

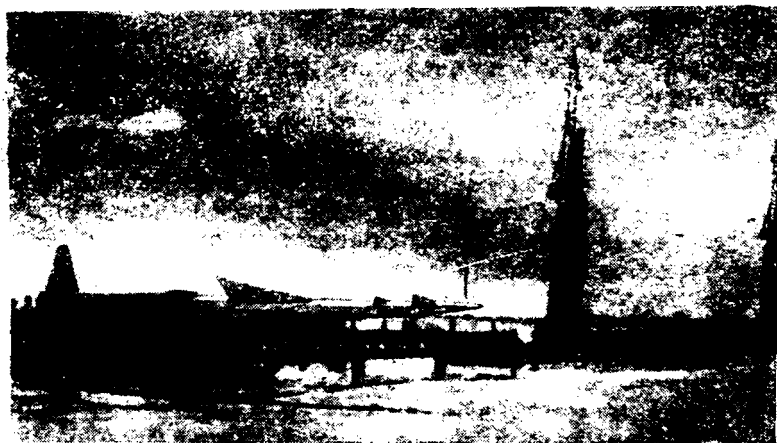


Рис. 2.6. Стартовая позиция снарядов «Найк».

зенитных управляемых снарядов, расположенных на этих позициях, должно быть централизовано. В некоторых густонаселенных районах можно сделать так, чтобы сеть стартовых позиций окружала не один, а несколько городов.

Нет никакой нужды иметь на каждой стартовой позиции большое количество вспомогательного оборудования самого различного назначения, поскольку до известной степени его использование может быть организовано в централизованном порядке. Однако необходимо, чтобы на каждой позиции всегда имелось значительное количество готовых к пуску снарядов, а это, учитывая сложность управляемых снарядов, означает, что там должно быть соответствующее оборудование для периодической проверки элементов снарядного комплекса и замены элементов, вышедших из строя или работающих недостаточно хорошо.

Снаряды среднего радиуса действия порядка нескольких сотен миль обещают быть весьма эффективным средством

поражения вражеских целей, находящихся далеко за линией фронта. Вследствие такой дальности стрельбы стартовые позиции этих снарядов могут располагаться в тылу своих войск и тем не менее обеспечивать поражение в достаточно большом секторе. Однако для наиболее эффективного применения таких снарядов требуется, чтобы пусковые установки были подвижными и имели простую и прочную конструкцию. Естественно, что конструкция снарядов для запуска с таких установок также должна быть простой и прочной. Было бы непрактично иметь для подвижной системы сложное и громоздкое контрольно-пусковое оборудование; следовательно, такие снаряды должны быть сконструированы так, чтобы после подготовки к пуску их можно было транспортировать на значительные расстояния. По этой же причине конструкция пусковой установки не должна требовать регулировки направления силы тяги стартового двигателя вручную непосредственно перед запуском. Если регулировка направления силы тяги не обеспечивается какими-то методами автоматического управления газовой струей, то пусковая система должна позволять запуск с большими отклонениями направления силы тяги. Особое внимание следует обратить на проектирование оборудования для обращения со снарядом и для его установки на пусковое устройство, так как в боевых условиях, возможно, придется часто действовать на неудобной, пересеченной местности и в сложных метеорологических условиях.

Основными требованиями к снаряду, предназначенному для стрельбы по дальним наземным целям важного значения, являются достижение большой дальности и очень высокой скорости полета. Поскольку для удовлетворения этих требований снаряду приходится брать много топлива, а кроме того, он должен доставить к цели боевой заряд соответствующих размеров, то снаряд получается очень большим. Для этих снарядов применяются особые пусковые установки: они должны поднимать снаряд в вертикальное положение и иметь специальные рабочие площадки вдоль снаряда. После подъема снаряда необходимо произвести одну из основных операций по подготовке снаряда к пуску — заправку топливом. Остальные подготовительные операции, относящиеся к другим элементам снарядного комплекса, в принципе не отличаются от рассмотренных ранее в этой главе для других пусковых систем.

В предыдущей главе было отмечено, что, исходя из практических соображений, для больших снарядов применяются только жидкие горючие и окислители. Хранение же и заправка больших количеств жидкого топлива сопряжены с многими трудностями. Частично мы уже касались этого вопроса в предыдущей главе и в разделе «Теория реактивных двигателей» второй книги настоящей серии.

Проблема материально-технического обеспечения. С точки зрения обеспечения непосредственно самого пуска, указанная проблема состоит главным образом в снабжении стартовыми двигателями, топливами, горючими и окислителями. Для некоторых снарядов могут потребоваться тележки для стартовых двигателей, а также может возникнуть необходимость в запасных частях для пусковых установок и вспомогательного оборудования.

Стандартные топлива, такие, как керосин или спирт, не представляют никаких особых трудностей с точки зрения их производства и транспортировки. Достаточно сказать, что для перевозки этого топлива могут быть использованы даже сами снарядные баки.

С точки зрения материально-технического обеспечения жидкие топлива обладают рядом преимуществ по сравнению с твердыми топливами. Стоимость их производства сравнительно невысока, заводов-изготовителей много, а снабжение основными материалами, необходимыми для производства жидких топлив, не представляет никаких трудностей. Но баки или покрытие баков для многих жидкостей должны изготавливаться из особых материалов; в некоторых случаях при повторном использовании баков и резервуаров для хранения их нужно предварительно промыть и соответственно обработать. Ввиду того что многие из компонентов жидких топлив очень опасны, при обращении с ними необходимо принимать особые меры предосторожности. Необходимо, однако, заметить, что можно разработать такой двигатель (по крайней мере небольших размеров), который заправлялся бы горючим и окислителем в процессе его производства, и тем самым облегчить решение проблем, связанных с перевозкой, хранением и заправкой топлива. Некоторые виды топлива, типичным представителем которых является концентрированная перекись водорода, настолько химически активны, что их необходимо тщательно предохранять от попадания пыли, щепок и т. п. Кроме того, многие окислители вследствие их малой химической стойкости очень быстро портятся в процессе хранения и поэтому требуют периодической проверки.

Жидкие однокомпонентные топлива, как правило, не создают таких больших трудностей, как окислители. Некоторые из них токсичны, но это в известной степени свойственно всем топливам¹. Поэтому для обеспечения безопасности при обращении с жидкими топливами необходимо иметь специальное оборудование и защитную одежду. В задачу органов материально-

¹ Krop S., The Toxicity and Health Hazards of Rocket Propellants, Jet Propulsion, vol. 24, № 4, July—August 1954.

технического обеспечения будет входить также удаление разложившихся окислителей.

Металлические части жидкостных двигателей, трубопроводы, крепления, клапаны — все они являются механическими частями и с точки зрения изготовления и снабжения трудностей не вызывают. Однако многие из них должны быть изготовлены из нержавеющей стали или специальных сплавов, а насосы, работающие на использовании горячих газов — из жаропрочных сплавов.

Большинство проблем материально-технического обеспечения, касающихся стартовых двигателей на твердом топливе, связано со сложностью выполнения технических условий при изготовлении твердых топлив.

Для выполнения тщательно контролируемых процессов смешения, желатинизации, формования и т. п. необходимы специализированные предприятия и опытный персонал. Поскольку во время войны требуется громадное количество стартовых двигателей на твердом топливе для пилотируемых самолетов, то для того, чтобы удовлетворить потребность в таких двигателях и для управляемых снарядов, приходится преодолевать немало трудностей. Производство металлических частей стартовых двигателей на твердом топливе будет, по-видимому, менее затруднительным, чем производство камер сгорания и насосов для жидкостных реактивных двигателей, однако потребует большего количества стали на каждую фунто-секунду импульса.

ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Основные обозначения, принятые в данной главе

- W — вес снаряда со стартовым двигателем в момент пуска, фунты.
 F — сила тяги, фунты.
 P_0 — номинальная тяга, фунты.
 F_y — вертикальная составляющая тяги, фунты.
 F_H — горизонтальная составляющая тяги, фунты.
 T — часть тяги стартового двигателя, необходимая для преодоления квазистатических продольных сил, действующих в процессе пуска, фунты.
 F_x — проекция всех сил на ось x , фунты.
 F_y — проекция всех сил на ось y , фунты.
 F_z — проекция всех сил на ось z , фунты.
 L — подъемная сила, фунты.
 C — боковая аэродинамическая сила, фунты.
 D — сила лобового сопротивления, фунты.
 N — момент крена, возникающий вследствие неоднородности воздушного потока вокруг крыла самолета, фунт·дюйм.
 C_L — коэффициент подъемной силы.
 $C_{L_{\max}}$ — максимальный коэффициент подъемной силы.
 C_D — коэффициент лобового сопротивления.
 C_M — коэффициент момента тангажа.
 V — скорость, фут/сек.
 V_L — скорость в конце участка разгона, фут/сек.
 S — площадь крыла, фут².
 M — масса, фунт·сек²/фут.
 ρ — массовая плотность воздуха, фунт·сек²/фут⁴.
 q — скоростной напор $= \frac{1}{2} \rho V^2$, фунт/фут².
 g — ускорение силы тяжести, фут/сек².
 a — ускорение, фут/сек².
 $\ddot{\theta}$ — угловое ускорение по тангажу, рад/сек².
 $\ddot{\psi}$ — ускорение рыскания, рад/сек².
 $\ddot{\varphi}$ — ускорение крена, рад/сек².
 t — время, секунды.
 α — угол атаки, градусы.

- β — угол скольжения, градусы.
 γ — угол между касательной к траектории полета и поверхностью земли, градусы.
 φ — угол крена, градусы.
 δ — угол между направлением тяги и продольной осью снаряда, градусы.
 I — момент инерции, *фунт · дюйм · сек²*.
 I — импульс, *фунт · сек*.
 r — радиус корпуса снаряда, дюймы.
 b — расстояние между передней и задней точками опоры снаряда на самолетной пусковой установке, дюймы.
 c — расстояние от передней точки опоры до центра тяжести снаряда, дюймы.
 d — расстояние между точками задних опор, в действительности воспринимающими вертикальную нагрузку, дюймы.
 h — расстояние от продольной оси снаряда до действительной точки приложения боковой силы к опорам, дюймы.
 p — расстояние от центра тяжести снаряда до центра давления, измеренное вдоль продольной оси, дюймы.
 R — реакции опор, в дальнейшем обозначаемые индексами, фунты.
 n — перегрузка в направлении, отмеченном соответствующим индексом.

Нижние индексы

- M — снаряд.
 B — ускоритель.
 f — передняя опора.
 a — задняя опора.
 x — направление вдоль продольной оси (оси x).
 y — направление вдоль горизонтальной боковой оси (оси y).
 z — направление вдоль вертикальной оси (оси z).

Верхние индексы

- l — левая опора.
 r — правая опора.

Пример

K_{az}^l — вертикальная реакция на левую заднюю опору.

3.1. Введение

Разработка пусковой системы управляемого снаряда производится на основе изучения движения снаряда по пусковой установке и его полета со стартовым двигателем. Кроме того, для многих типов снарядов конструктор пусковых систем должен

учитывать еще так называемый период ввода снаряда на траекторию, т. е. процесс перевода снаряда из положения, которое он занимал при движении по направляющим, в требуемое положение, необходимое для полета по заданной траектории.

Траектория снаряда в процессе пуска, равно как и его положение в конце участка разгона, определяются начальным положением снаряда в момент пуска, а также внешними и внутренними силами, точнее, их величиной, направлением и моментами, которые они создают относительно центра тяжести снаряда. Даже если пренебречь случайными изменениями, все равно нужно сказать, что средние значения действующих сил изменяются во времени, так же как изменяется и положение центра тяжести пусковой системы. Кроме того, конструктор должен учесть влияние окружающих условий, рассмотренных в предыдущих главах, и трудности, которые могут встретиться при применении стартовых двигателей и при подготовке снаряда к пуску.

Наибольшее влияние на движение снаряда при пуске, особенно на начальном участке, оказывает направление и величина тяги и создаваемый ею момент относительно центра тяжести, поэтому вначале будут рассмотрены методы определения центра тяжести снаряда и методы регулирования направления тяги по отношению к центру тяжести. Затем мы более детально остановимся на факторах, которые необходимо учитывать при проектировании корабельных и наземных пусковых установок, а также пусковых систем. В заключение будут рассмотрены основные расчетные параметры самолетных пусковых установок и компоновка снаряда вместе с пусковой установкой.

3.2. Основные требования

При проектировании любого механизма необходимо учитывать ряд основных требований. Поэтому прежде чем перейти к конкретным вопросам проектирования, мы остановимся на некоторых наиболее важных требованиях, предъявляемых к пусковым установкам и пусковым схемам. К ним относятся: соответствие расчетным тактико-техническим характеристикам; совместимость, т. е. соответствие пусковой установки данному снаряду и транспортному средству, несущему пусковую установку, или данному виду стартовой позиции; надежность действия; удобство в эксплуатации; безопасность; приспособляемость для других видов применения и приемлемая стоимость.

Взаимозависимость этих требований достаточно очевидна, и одной из главных задач конструктора является достижение более или менее удовлетворительного компромисса между ними. Выполнить это он сможет лишь при условии тщательного изуче-

ния всего комплекса управляемого снаряда и методов его применения, а также всех возможных способов решения поставленной перед ним частной задачи по обеспечению запуска.

Соответствие расчетным тактико-техническим характеристикам. Это, по-видимому, одно из первых требований, с которым приходится встречаться конструктору, когда он приступает к выполнению задачи. Разрабатываемый им элемент системы должен удовлетворять специальным требованиям или выполнять какую-то специфическую задачу. В противном случае конструкция будет признана неудовлетворительной или получит ограниченное применение.

Именно в данной области компромисс должен быть сведен к минимуму, поскольку успешное выполнение определенной боевой задачи будет зависеть от удачного запуска снаряда при данных условиях тактической обстановки. Однако при запуске не должно происходить ухудшения характеристик отдельных элементов снарядного комплекса, которое могло бы помешать снаряду выполнить свою задачу.

Совместимость. Мерой совместимости пусковой установки или пусковой системы является степень ограничений, накладываемых со стороны пусковой установки или пусковой системы на действия снаряда, корабля или самолета-носителя. Это положение можно пояснить простым примером: если две различные конструкции установки, предназначенной для пуска данного снаряда, одинаково эффективно могут выполнить свои функции, но одна из них требует большего палубного пространства, чем другая, то первая меньше подходит для применения на корабле.

Надежность. Надежность характеризует способность системы правильно функционировать при определенных заданных условиях применения. **Требование надежности** особенно важно для всех составных элементов управляемых снарядов, поскольку неправильное функционирование или отказ в работе любого отдельного элемента во время полета уже нельзя компенсировать разумными действиями или искусством человека-оператора. Даже такому сложному аппарату, как самолет, в случае отказа в работе одной из составных частей можно обеспечить безопасную посадку; для снаряда же это невозможно, и поэтому его степень надежности должна быть еще выше, чем у самолета. Более того, должна быть уверенность, что снаряд с большой степенью вероятности будет действовать так, как это требуется в любых условиях боевого применения, для которых он спроектирован.

Удобство в эксплуатации. Это одно из требований, которое часто незаслуженно относят к разряду второстепенных. Для удовлетворения его необходимо, чтобы конструкция была простой, без лишних деталей и элементов, чтобы безопасность обслужи-

вающего персонала обеспечивалась с достаточной степенью надежности, чтобы был удобный доступ к ненадежным частям конструкции и всюду, где это возможно, применялись стандартные детали. Сюда же относятся простота технического обслуживания, монтажа и регулировки, удобство установки снарядов на пусковое устройство, легкость их заправки и т. п.

Безопасность. Взрывчатые вещества и высококалорийные топлива весьма опасны при хранении, обращении и применении. Однако если необходимо получить оптимальную систему оружия, то приходится идти на некоторый риск, т. е. использовать такие вещества, которые в какой-то степени будут представлять опасность для обслуживающего персонала. Указанное обстоятельство, конечно, ни в коей мере не означает, что проектировщик не должен стремиться сделать эту опасность минимальной.

Очевидно, что требование обеспечения удобства в эксплуатации неразрывно связано с безопасностью, точно так же, как и все другие требования связаны между собой. Конструкция, которая обладает высокими качествами во всех остальных отношениях, будет в то же время удовлетворять и требованиям безопасности.

Приспособляемость. К самолетным пусковым установкам часто предъявляется требование, чтобы их можно было приспособить к различным типам самолетов или же для транспортировки других видов вооружения, а также баков с горючим. Первое из этих требований можно обычно выполнить без особого труда, выполнение же второго зачастую приводит к серьезным противоречиям с другими требованиями.

Стоимость. Некоторые конструкторы иногда считают, что при разработке военной техники стоимость не имеет большого значения; на самом деле важность учета стоимости сразу же становится очевидной, как только мы начинаем выражать ее в затратах человеческого труда и материалов. Людские и материальные резервы ограничены, особенно во время войны, поэтому первейшей обязанностью инженеров является учет этого обстоятельства, без снижения, однако, общей эффективности разрабатываемых ими систем оружия.

3.3. Определение центра тяжести

Определение путем расчетов и взвешивания. В процессе разработки управляемого снаряда обычно составляется перечень элементов каждого опытного образца, где указывается их вес и расположение. Поскольку корпус снаряда обычно симметричен относительно вертикальной плоскости, проходящей через продольную ось, то расположение элементов должно быть таким, чтобы центр тяжести снаряда лежал в этой плоскости.

Используя указанные перечни, можно рассчитать положение центра тяжести для различных состояний снаряда, т. е. для незаправленного снаряда, готового к старту, находящегося в полете, падающего на землю и т. д. Чтобы избежать больших ошибок, полезно проверить расчеты графически. Однако наиболее надежная проверка расчетного положения центра тяжести может быть произведена лишь путем измерений на полностью собранном снаряде. Такую процедуру следует проделать с несколькими опытными образцами.

Положение центра тяжести можно определить обычными методами, принятыми для самолетов. Для поддержания снаряда в определенном, заранее известном положении применяются двое или более весов, и положение центра тяжести определяется путем подсчета моментов относительно некоторой выбранной точки. Если это проделать для снаряда, находящегося в горизонтальном положении, то можно определить лишь положение центра тяжести на продольной оси. Проводя это взвешивание при двух резко различных наклонах снаряда к горизонту, можно определить положение центра тяжести и в вертикальной плоскости. С этой целью необходимо для каждого из положений снаряда определить плечо момента, создаваемого силой тяжести, и спроектировать его на горизонтальную плоскость, причем вертикальные линии, с помощью которых определяется проекция, должны оставлять след на боковой поверхности снаряда. Точка пересечения двух таких следов и определит положение центра тяжести в вертикальной плоскости.

Аналогичным образом путем взвешивания можно определить и положение центра тяжести стартового двигателя; результаты могут быть использованы для расчетов по определению центра тяжести системы «снаряд + стартовый двигатель».

После того как получены некоторые опытные данные, можно обычно установить средние величины, характеризующие положение центра тяжести для каждого блока стартового двигателя, поскольку в процессе производства обеспечивается малый допуск на веса составных частей и распределение их масс.

Как правило, это положение справедливо и для случая, когда применяются жидкостные стартовые двигатели, если количество горючего и окислителя в снарядах не изменяется.

Данный метод определения центра тяжести комбинированной системы «снаряд + стартовый двигатель» весьма неудобен и содержит большое количество источников ошибок. Поэтому он подходит лишь для экспериментальных работ, проводимых над небольшим количеством крупных снарядов.

Определение центра тяжести путем подвешивания. Для снарядов малых или средних размеров положение центра тяжести

находят следующим образом. Взвешивая снаряд в горизонтальном положении, определяют сечение, перпендикулярное продольной оси, в котором лежит центр тяжести. Положение центра тяжести в найденном сечении можно определить, подвешивая снаряд за носовую или хвостовую часть. Пересечение вертикальной линии, проведенной из точки подвеса, с найденным сечением и даст положение центра тяжести.

Если подвесить снаряд за какую-нибудь точку или за концы оси, параллельной оси y , так чтобы угол крена был равен нулю, то снаряд займет какое-то устойчивое положение под некоторым углом к горизонту. При таком положении снаряда с помощью инклинометра или какого-либо другого подходящего прибора на специальном планшете, прикрепленном к боковой части фюзеляжа, можно прочертить вертикальную линию, проходящую через точку подвеса. Затем необходимо проделать то же самое еще раз, подвешивая снаряд за другую точку. Пересечение этих двух линий и определит положение центра тяжести на продольной оси. На рис. 3.1 показан вид снаряда сбоку и положение его центра тяжести, определенное последовательным подвешиванием снаряда к двум различным точкам A и B .

Определение центра тяжести другими методами. Для определения центра тяжести можно использовать регулируемые опоры (рис. 3.1, б) — две стойки, к которым крепятся перемещаемые шарикоподшипники. Снаряд будет стремиться повернуться в подшипниках до тех пор, пока они не будут установлены в положение, при котором их ось вращения будет проходить через центр тяжести. При этом условии снаряд, наклоненный влево или вправо, останется в таком положении, т. е. будет находиться в состоянии безразличного равновесия.

Другой метод состоит в том, что к снаряду неоднократно прикладывается сила, причем направление действия этой силы все время меняется, пока, наконец, снаряд под ее воздействием не перестанет поворачиваться. Это соответствует случаю, когда линия действия силы проходит через центр тяжести.

Каждый метод определения центра тяжести имеет источники ошибок (ошибки отсчета, ошибки, вызванные тем, что деформации снаряда во время определения центра тяжести могут отличаться от деформаций во время нахождения снаряда на пусковой установке или в полете, ошибки от трения в подшипниках или из-за смещения центра тяжести, происходящего под действием самого испытательного оборудования и т. д.). При массовом производстве разница в положении центра тяжести снарядов невелика. Правильно спроектированные пусковые системы и пусковые установки, предназначенные для этих снарядов, могут упростить или даже сделать ненужной регулировку направления силы тяги перед пуском. Обычно это имеет место

в снарядах, в которых стартовый двигатель расположен непосредственно за снарядом.

Определение положения центра тяжести в поперечной плоскости. Обычно можно считать, что центр тяжести снаряда лежит в вертикальной плоскости симметрии, однако иногда возникает необходимость в более точном определении положения центра тяжести, особенно в случае больших и недостаточно устойчивых по рысканию снарядов. Для определения положения центра тяжести в поперечной плоскости можно также применить метод взвешивания, как это делалось при определении положения центра тяжести на продольной оси, используя, однако, вместо двух трое или четверо весов. Другой метод состоит в балансировке снаряда на двух ножевых опорах, как показано на рис. 3.1, в. Третий метод заключается в подвешивании снаряда за соответствующие точки, расположенные в вертикальной плоскости симметрии.

Для определения положения центра тяжести в поперечном направлении при любом из двух последних методов данные инклинометров, измеряющих угол между плоскостью симметрии снаряда и вертикальной плоскостью, можно сочетать с данными о расположении точек подвеса и о положении центра тяжести в вертикальной плоскости.

Точка наводки. К точности регулировки направления силы тяги обычно предъявляются жесткие требования. Тем не менее условие, которое необходимо выполнить, формулируется весьма просто: ось сопла стартового двигателя должна проходить через определенную точку наводки с соответствующим допуском. Положение точки наводки рассчитывается на основе величины момента относительно центра тяжести, необходимого для обеспечения требуемой траектории и требуемого положения снаряда в период его разгона.

Таким образом, в результате расчета получается вполне определенное положение точки наводки относительно начального расположения центра тяжести системы «снаряд + стартовый двигатель».

На практике часто бывает, что точка наводки не совпадает с центром тяжести системы «снаряд + стартовый двигатель». Так происходит, например, когда один или несколько стартовых двигателей монтируются внизу или по бокам снаряда, вследствие чего по мере выгорания топлива центр тяжести смещается по отношению к равнодействующей силе тяги. В этом случае точка наводки будет расположена где-то посередине между крайними положениями центра тяжести. Эта точка не совпадает с центром тяжести также и тогда, когда маршевый двигатель работает во время разгона и направление его тяги таково, что она создает момент относительно центра тяжести. В этом слу-

чае необходимо так ориентировать силу тяги стартового двигателя, чтобы создаваемый ею момент был направлен противоположно моменту от тяги маршевого двигателя.

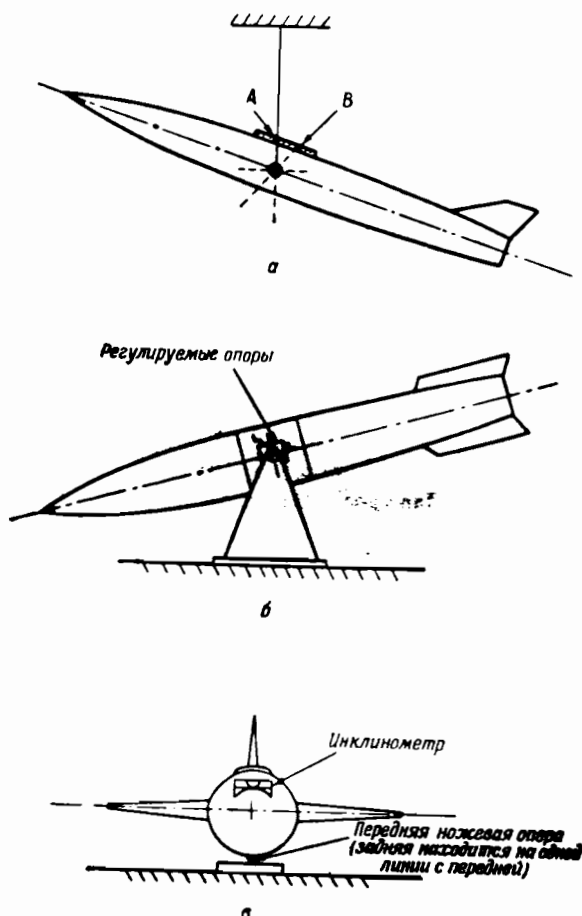


Рис. 3.1. Методы определения центра тяжести.

а — путем последовательного подвешивания к точкам *А* и *В*;
б — посредством перемещения подшипников до достижения равновесия; *в* — путем балансировки на ножевых опорах.

Этот случай схематически показан на рис. 3.2, причем, как это обычно бывает, тяга стартового двигателя больше, чем тяга маршевого двигателя.

Наконец, под действием тяги конструкция блока стартового двигателя может деформироваться, так что для компенсации этого фактора потребуется создать постоянное плечо силы тяги.

Могут, конечно, встретиться такие конструкции снарядов, в которых в период старта имеют место все указанные выше условия, поэтому регулировка направления силы тяги должна производиться так, чтобы был достигнут компромисс между всеми требованиями, предъявляемыми при этих условиях.

Может возникнуть и ряд других условий, при которых линия действия тяги не будет проходить через центр тяжести, особенно у больших снарядов типа «земля-земля». Если снаряд на пусковой установке занимает горизонтальное положение или расположен под небольшим углом к горизонту, то может оказаться необходимым, чтобы в процессе набора высоты угол тангажа увеличивался. Этого можно добиться с помощью изогнутых направляющих, которые заставляют снаряд **увеличивать** угол тангажа по мере его продвижения-вперед.

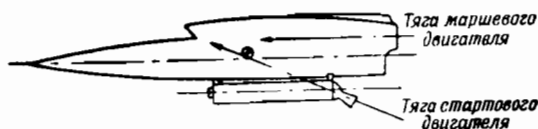


Рис. 3.2. Для достижения равновесия момент от стартового двигателя направлен противоположно моменту маршевого двигателя.

Если ограничить длину направляющих некоторыми разумными пределами, то может случиться, что скорость изменения угла тангажа будет очень большой. Поэтому в период разгона необходимо создать относительно центра тяжести момент, который был бы противоположен моменту количества движения, сообщенному снаряду во время его движения по направляющим. Если же скорость изменения угла тангажа мала, то ее можно создать с помощью момента от стартовых двигателей, которому в дальнейшем, по мере возрастания скорости, будет противодействовать момент, создаваемый аэродинамическими управляющими поверхностями.

3.4. Регулировка направления силы тяги стартового двигателя

Общие соображения. Применяемая обычно система «снаряд + стартовый двигатель» является весьма неустойчивой; ее можно сравнить с автомобилем, у которого задние ведущие колеса работают, а передние скользят. Под действием тяги система приобретает линейные и угловые ускорения. Последние могут быть созданы преднамеренно, как об этом говорилось в предыдущем параграфе, но в ряде случаев могут возникнуть и без постороннего вмешательства — например, когда отсутствуют

направляющие, которые ограничивали бы угловые перемещения или когда снаряд неуправляем. Оставляя в стороне случай изогнутых направляющих, можно считать, что *величина сообщаемого углового ускорения будет определяться суммой моментов, создаваемых тягой стартового и маршевого двигателей относительно центра тяжести системы «снаряд + стартовый двигатель», и моментом инерции системы.* Плечо момента, создаваемого результирующей силой тяги относительно начального положения центра тяжести, определяется как величина смещения, которое имеет место.

В начале участка разгона запускаемого с земли снаряда аэродинамические силы пренебрежимо малы, поэтому снаряд реагирует на приложение силы тяги как твердое тело, имеющее данную массу и данный момент инерции. Лишь в конце участка разгона аэродинамические управляющие силы становятся достаточными, чтобы скомпенсировать влияние сравнительно небольшого смещения силы тяги. Для снаряда, двигающегося на всем участке разгона по направляющим, очевидно, нет необходимости в точной регулировке направления силы тяги (кстати, такая схема запуска вряд ли осуществима для снарядов, имеющих большую нагрузку на крыло). Наоборот, при пусках с установок «с нулевым разбегом» следует самым тщательным образом регулировать направление силы тяги. Установки с короткими направляющими занимают промежуточное положение между этими двумя крайностями (см. § 1.9 данной части).

В основе всех методов регулировки направления тяги лежит то обстоятельство, что в правильно сконструированном круглом сопле направление истечения определяется только направлением оси сопла. Это утверждение предполагает, что как в самом сопле, так и непосредственно позади него на пути движения струи нет никаких препятствий, которые могли бы вызвать возмущение потока; даже небольшие шероховатости на отдельных участках сопла могут вызвать в сверхзвуковом потоке появление ударных волн, изменяющих распределение давления в сопле. Указанное утверждение справедливо и в том случае, если ось сопла составляет большой угол с осью камеры стартового двигателя, как, например, в двигателе с наклонным соплом (рис. 3.2).

Допустимое смещение. Допустимое смещение направления тяги определяется как максимально допустимая величина плеча момента, создаваемого результирующей тягой стартового и маршевого двигателей относительно центра тяжести.

Факторы, устанавливающие предельные значения смещения, могут быть самыми различными; к ним относятся ограниченная возможность автопилота по возвращению снаряда на заданную траекторию, критические углы атаки крыла и оперения, зазор

между снарядом (на пусковой установке) и землей и т. д. Величина допустимого смещения различна для каждого типа снаряда и определяется многочисленными параметрами, такими, как момент инерции системы «снаряд + стартовый двигатель», величина тяги стартового двигателя и время горения заряда, длина направляющих пусковой установки, эффективность управления снарядом на малых скоростях, а также аэродинамические характеристики крыла.

Предельные значения смещения должны быть рассчитаны как вверх, так и вниз от центра тяжести. Рассчитанные таким образом величины в большинстве случаев отличаются друг от друга, и в качестве точки наводки, как правило, выбирается точка, находящаяся посередине между этими пределами.

Величины допустимых смещений тяги приняты выражать в дюймах. Даже для очень больших снарядов со сравнительно небольшими ускорениями они обычно не превышают 2 дюймов.

Возможные смещения. Возможным смещением называется плечо момента результирующей тяги относительно центра тяжести системы «снаряд + стартовый двигатель», которое получается из арифметической суммы всех ошибок, неточностей и отклонений, возникающих при сборке системы «снаряд + стартовый двигатель» в период подготовки к пуску, а также деформаций в результате действия тяги стартового двигателя.

Каждый метод, применяемый для определения центра тяжести системы «снаряд + стартовый двигатель», имеет ряд погрешностей, таких, как ошибки от трения в подшипниках, ошибки отсчета и ошибки зажимных приспособлений. Точно так же любому методу регулировки направления силы тяги по отношению к центру тяжести будут свойственны определенные погрешности: погрешности установки переходной муфты для сопла, ошибки оптического визирования и ошибки нанесения точки на планшет. Могут также возникнуть и другие ошибки в регулировке линии действия тяги относительно ее требуемого положения вследствие деформаций фюзеляжа, из-за допусков на крепление и смещение стартовых двигателей. Кроме того, сама тяга двигателя может изменяться. Очевидно, что сумма всех этих ошибок, отклонений и деформаций, так же как и ошибка человека-оператора, возрастает по мере усложнения системы.

Запас регулировки. Запас регулировки представляет собой величину, показывающую, на сколько допустимое смещение больше возможного смещения. Этот важный параметр является показателем безопасности пуска, который должен быть установлен для каждого вида системы «снаряд + стартовый двигатель + пусковая установка». Особенно он важен для предварительной оценки в процессе проектирования. Интересно отметить, что для снарядов, запускаемых с земли с помощью стартовых

двигателей, расположенных под снарядом, применение коротких направляющих может удвоить запас регулировки по сравнению со случаем, когда используется установка «с нулевым разбегом».

Оптическая регулировка. Поскольку точка наводки в действительности находится внутри снаряда, видеть ее нельзя; следовательно, это препятствие надо как-то обойти. Во многих случаях можно определить плоскость, в которой лежит ось сопла и вертикальная или горизонтальная проекция точки наводки. В этой плоскости мы можем выбрать удобную линию, параллельную оси сопла, и принять ее за ось оптического визира, прикрепляемого к соплу стартового двигателя.

Рис. 3.3 представляет собой фотографию такого прибора, фиксирующие детали которого точно соответствуют диаметрам сопла вблизи критического сечения и у среза. Изготавливается он **очень точно**, так что оптическая ось параллельна оси сопла. Таким образом мы получаем новую точку наводки, смещенную относительно **реальной точки** на такую же величину, на которую **оптическая ось смещена относительно оси сопла**.

Соответствующим **выбором величины смещения** можно добиться того, что **новая точка наводки будет находиться** вне корпуса снаряда и может быть **отмечена на каком-либо удобном планшете**. Направление оси сопла регулируется теперь до тех пор, пока линия визирования не пройдет через новую точку. В случае регулируемого сопла эта процедура выполняется легко, в противном случае необходимо перемещать весь стартовый двигатель.

При использовании этого метода принято вначале тщательно отгоризонтировать продольную и поперечную оси снаряда, а затем спроектировать точку наводки на вертикальную плоскость в ее новое положение. Оптический прибор получает аналогичное горизонтальное перемещение линии визирования путем использования пузырькового уровня, помещенного на поворотном кронштейне.

Очевидно, что вместо оптического визира можно применить какой-либо источник света, направляющий луч на планшет.

Другие методы регулировки. Первые из описанных методов определения положения центра тяжести системы «снаряд + стартовый двигатель» и оптический метод регулировки направления тяги требуют большого количества операций и трудоемких вычислений. Чем больше число операций и объем вычислительных работ, тем больше возможностей для ошибок в расчетах и погрешностей измерения. Необходимо подчеркнуть, что единственным оправданием для производства взвешивания и балансировки служит то, что эти операции являются первыми шагами в регулировке направления силы тяги, хотя часто этой же

цели можно добиться и более простыми методами. Весьма убедительным примером в этом отношении является небольшой снаряд, разрабатывавшийся в ранний период развития ракетной техники в Германии. Этот снаряд имел стартовый двигатель на твердом топливе с регулируемым соплом. В этом случае точка наводки совпадала с центром тяжести системы «снаряд + стартовый двигатель». Вся пусковая система подвешивалась на



Р и с. 3.3. Оптический прибор для регулировки направления тяги.

стержне, прикрепляемом к специальному зажимному приспособлению, которое с большой точностью было установлено в конической части сопла.

Сферическая муфта, в которой монтировалось сопло, несколько ослаблялась, а затем после некоторого постукивания (для уменьшения трения) опять затягивалась в полностью отрегулированном положении. Применение этого простого метода гарантировало, что центр тяжести был расположен на оси сопла. Для больших снарядов этот метод едва ли применим, однако его простота и надежность могут служить идеалом, к которому следует стремиться при разработке других методов.

Хорошо, если при разработке приборов для определения центра тяжести учитываются возможности использования их и

для регулировки направления тяги. В качестве примера можно привести рассмотренный выше способ, где центр тяжести определяется как точка пересечения двух линий, прочерченных на расположенных по обеим сторонам корпуса снаряда планшетах. Точка пересечения, скорректированная на величину смещения точки наводки относительно центра тяжести, может быть отмечена двумя магнитными «рейтерами», перемещаемыми по планшетах.

Эти рейтеры можно использовать также в качестве точек наводки для двух оптических визиров, прикрепленных к вставляемой в сопло переходной муфте. Тем самым мы определим положение плоскости, проходящей через ось сопла и через метки на планшетах. Несмотря на то, что этот метод требует проведения трех операций, он все-таки очень прост и не требует никаких расчетов.

Если для определения центра тяжести применяется метод нахождения положения безразличного равновесия (рис. 3.1, б), то те же самые устройства можно использовать и для регулировки направления тяги. В этом случае точками наводки для оптических визиров будут служить концы оси, укрепленной в шариковых подшипниках. Если же стартовый двигатель снаряда имеет регулируемое сопло, можно прикладывать к снаряду силу через специальную муфту, вставляемую в сопло, и регулировать положение сопла до тех пор, пока вращение снаряда относительно оси под действием этой силы не прекратится.

Были разработаны также различные устройства и способы для регулирования направления реактивной струи, а следовательно, и направления тяги реактивных двигателей. Такие устройства следует применять в любом снаряде, где регулировка направления тяги иными способами при подготовке к пуску затруднительна и отнимает много времени, а также в тех случаях, когда при достижимых точностях регулировки линии тяги отклонения снаряда от заданной траектории остаются все же неприемлемо большими.

При применении подобного устройства, управляемого простым автопилотом, нет необходимости определять положение центра тяжести или проводить регулировку направления тяги перед пуском. Однако оно приведет к дополнительному усложнению пусковой системы, к некоторому увеличению веса, а также несколько уменьшит величину импульса, так что на практике его можно использовать лишь для снарядов средних и больших размеров. Однако именно эти снаряды требуют применения таких устройств еще и по другим причинам, например для того, чтобы нейтрализовать действие сильного бокового ветра в процессе пуска.

3.5. Применение стартовых двигателей

В данном параграфе обсуждаются некоторые общие вопросы, касающиеся расположения стартового двигателя на снаряде, причем отдельные положения иллюстрируются на примере гипотетического снаряда. Надеемся, что читатель получит известное представление о принципах проектирования и о том, как решаются проблемы пуска, возникающие в связи с применением стартовых двигателей.

Размещение стартового двигателя на снаряде. Существуют различные способы размещения стартовых двигателей на снаряде. Для снаряда, запускаемого с земли с одним стартовым двигателем на твердом топливе, можно указать по крайней мере четыре различных способа расположения стартового двигателя на снаряде и четыре способа запуска последнего. На рис. 3.4 и 3.5 приведены эти способы размещения и схемы сил, действующие на снаряд в момент старта.

а) **Стартовый двигатель** расположен непосредственно за снарядом на продолжении его продольной оси. Запуск производится с небольшим углом наклона траектории снаряда к горизонту и с постоянным углом тангажа.

б) Стартовый двигатель расположен под снарядом. Запуск производится при небольшом угле наклона траектории снаряда к горизонту и с постоянным углом тангажа.

в) Стартовый двигатель расположен под снарядом. Запуск производится при большом угле наклона траектории снаряда к горизонту с увеличивающимся углом тангажа.

г) Стартовый двигатель расположен за снарядом на продолжении его продольной оси. Запуск вертикальный или близкий к вертикальному с уменьшающимся углом тангажа.

Хотя возможны все приведенные варианты пусковых систем, однако каждая из них существенно отличается от другой, например требуемой величиной импульса и прочностью корпуса снаряда, конструкцией пусковой установки, характером эксплуатации, способом отделения стартового двигателя от снаряда после окончания его работы, а также рядом особенностей, связанных с конкретной системой наведения. Наиболее рациональным размещением стартового двигателя на снаряде часто является второй вариант.

При первом варианте расположения применяется стартовый двигатель с прямым соплом, ось которого совпадает с продольной осью снаряда. Такое расположение стартового двигателя тандемом позволяет производить регулировку направления тяги стартового двигателя с меньшей тщательностью в силу того, что снаряд, стартовый двигатель и его сопло имеют форму тел вращения, а также в силу большого момента инерции всей системы.

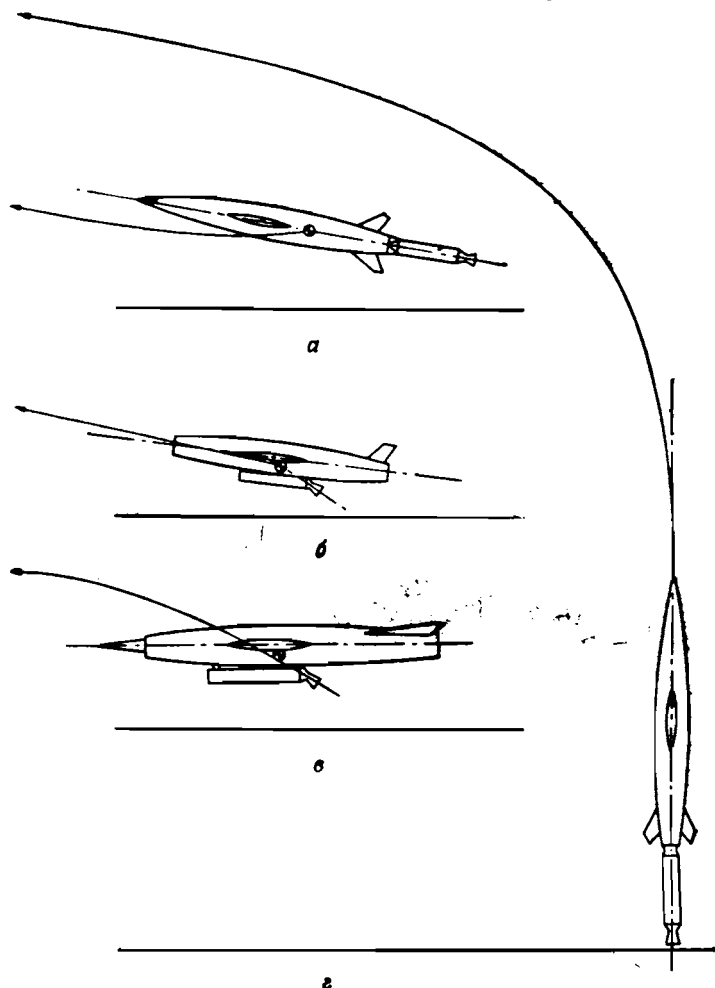


Рис. 3.4. Возможные способы монтажа стартового двигателя на снарядах, запускаемых с наземных установок (с одним стартовым двигателем).

a — расположение стартового двигателя за снарядом (небольшой угол наклона траектории, постоянный угол тангажа); *б* — расположение стартового двигателя под снарядом (небольшой угол наклона траектории, постоянный угол тангажа); *в* — расположение стартового двигателя под снарядом (большой угол наклона траектории, увеличивающийся угол тангажа); *г* — расположение стартового двигателя за снарядом (вертикальный или почти вертикальный старт с уменьшающимся углом тангажа).

Однако в этом случае для обеспечения движения снаряда по требуемой траектории необходимо создать достаточно большой угол возвышения пусковой установки, с тем чтобы вертикальная составляющая тяги уравновесила вес всей системы «снаряд + стартовый двигатель», как это показано на рис. 3.4, *a* и 3.5, *a*.

Очевидно, что такой способ можно применять только для снарядов, имеющих при пуске большое ускорение, поскольку иначе не удастся обеспечить приемлемые пределы изменения углов атаки крыла снаряда. Траектория снаряда в момент пуска выгнута книзу, а угол атаки крыла все время положительный. Последнее обстоятельство может явиться причиной крена снаряда, если запуск производится при боковом ветре. Рассматриваемый

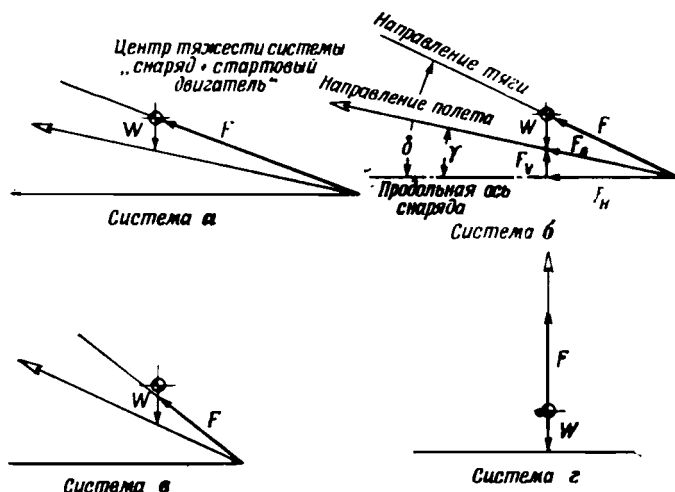


Рис. 3.5. Схема сил для случаев расположения стартового двигателя, показанных на рис. 3.4 (светлые стрелки показывают направление касательной к траектории, темные стрелки означают силы).

способ размещения стартового двигателя имеет тот недостаток, что через хвостовой отсек снаряда передаются большие усилия; кроме того, реактивная струя маршевого двигателя может воздействовать на носовую часть стартового двигателя. На элемент, соединяющий стартовый двигатель со снарядом, действуют изгибающие моменты, вследствие чего стартовый двигатель может оказаться так прочно скрепленным со снарядом, что отделение его от снаряда только за счет аэродинамических сил станет невозможным. В заключение необходимо отметить, что расположение стартового двигателя тандемом позади снаряда увеличивает длину всей системы и требует вследствие этого увеличения длины пусковой установки.

Во втором варианте (рис. 3.4, б и 3.5, б) направление тяги стартового двигателя составляет некоторый угол с продольной осью снаряда. Снаряд как бы поддерживается стартовым дви-

гателем во время полета, а при использовании двигателя с наклонным соплом — также и при движении его по пусковой установке. При таком расположении стартового двигателя можно выбрать прямолинейную траекторию взлета снаряда с постоянным углом тангажа. Угол атаки крыла в этом случае близок к нулю, результатом чего является малый момент крена при наличии рыскания. Для этого варианта расположения стартового двигателя требуются более короткие направляющие и меньший угол возвышения пусковой установки, чем в первом варианте.

Третий способ расположения стартового двигателя на снаряде (рис. 3.4, *в* и 3.5, *в*) является более необычным. В этом случае снаряд при пуске находится в горизонтальном положении, что является желательным для снарядов большого размера. Стартовый двигатель, имея отклоненное вниз сопло, создает большую вертикальную составляющую тяги, которая обеспечивает подъем снаряда с пусковой установки в первый момент движения. Другими словами, здесь мы имеем установку «с нулевым разбегом». Для того чтобы увеличить в период разгона снаряда его угол тангажа до желаемой величины, при которой обеспечивается набор высоты, в стартовом двигателе с наклонным соплом лучше всего использовать способ регулирования направления реактивной силы.

Во время начала разгона угол атаки крыла имеет довольно большую отрицательную величину, в силу чего необходимо обратить серьезное внимание на возможность появления крена при рыскании, хотя при малой скорости снаряда момент крена невелик.

В четвертом варианте, как и в первом, опять применяется расположение стартового двигателя тандемом (рис. 3.4, *г* и 3.5, *г*). Траектория снаряда в период разгона выгнута кверху, причем угол тангажа снаряда во время разгона уменьшается. Угол атаки крыла снаряда может быть близким к нулю. Четвертый вариант имеет ряд общих черт с первым вариантом, но осуществление запуска в этом случае значительно сложнее.

Приведенные способы расположения являются лишь иллюстрацией к тому, что снаряд, стартовый двигатель и пусковая установка должны конструироваться как единое целое. Для конструирования нельзя установить какие-то определенные правила, многое зависит от типа и назначения снаряда, а также от изобретательности конструктора.

Предварительный выбор способа размещения стартового двигателя на снаряде. В комплект стартового двигателя входят: сам двигатель, крепежные элементы, поддерживающие элементы, а также вспомогательные механизмы, такие, например, как устройство для сбрасывания двигателя в полете. Исходным

пунктом для выбора способа расположения стартового двигателя является определение импульса и тяги, необходимых для обеспечения снаряду требуемой скорости в конце участка разгона. Скорость определяется весом снаряда, формой его крыла и влиянием ряда других факторов, таких, как ветер, при пуске. Следующей логической ступенью является выбор способа расположения двигателя на снаряде и принятие решения о числе стартовых двигателей. Как указывалось выше, предпочтительнее выбрать один стартовый двигатель, но при необходимости могут быть выбраны и два. Большее число стартовых двигателей может быть применено только для опытных образцов, и то лишь в целях сокращения времени на проектирование, когда нет отработанных стартовых двигателей больших размеров. Надежность снарядов с числом стартовых двигателей больше двух низкая, так как неисправность или отказ в работе одного из двигателей приводят к тому, что успешный пуск произвести не удастся. В дополнение к перечисленным выше имеется еще ряд различных факторов, также влияющих на выбор числа стартовых двигателей и характер их размещения на снаряде. Укажем на некоторые из них: расположение поперечных силовых элементов корпуса снаряда; тип конструкции снаряда; характеристики маршевого двигателя и его расположение; чувствительность корпуса снаряда и прилегающих к нему деталей к повреждениям от действия реактивной струи и т. п.

Импульс, тяга и продолжительность работы двигателя. Импульс, необходимый для разгона снаряда до требуемой скорости полета, является той характеристикой, которая должна быть определена в первую очередь. Она зависит от ряда факторов, которые располагаются по важности в следующем порядке: скорость снаряда в конце участка разгона, вес снаряда, вес стартового двигателя, лобовое сопротивление снаряда и угол наклона траектории снаряда к горизонту. После того как определена величина импульса, можно выбрать величину тяги и время работы стартового двигателя. Максимальная допустимая тяга стартового двигателя в основном определяется прочностью корпуса снаряда и его частей. Минимальная допустимая тяга определяется требованиями к траектории полета, к числу которых относится, например, допустимый зазор между снарядом на пусковой установке и поверхностью земли при наиболее низких рабочих температурах. Выбор номинальной тяги стартового двигателя зависит также от процессов горения в двигателе.

Некоторые соображения, которыми надо руководствоваться при определении рабочих характеристик двигателя, можно проиллюстрировать на следующем примере. Выбрав второй вариант размещения стартового двигателя на снаряде (рис. 3.4, б) пред-

положим, что

Вес снаряда	10 000 фунтов
Площадь крыла	100 фут ²
Максимальное значение коэффициента подъемной силы $C_{L\max}$	0,80
Оптимальный угол набора высоты	10°
Высота места старта над уровнем моря	0
Максимальная скорость попутного ветра	40 фут/сек
Высота полета снаряда в конце участка разгона	200 футов

Для предварительного проектирования максимальное значение коэффициента подъемной силы на участке разгона с учетом характеристик снаряда при критическом угле атаки и возможных отклонений снаряда от расчетной траектории выбирается равным 70% от $C_{L\max}$, рассчитанного для горизонтального полета, или

$$C_L = 0,56.$$

Минимальная конечная скорость, при которой обеспечивается безопасный пуск, может быть определена следующим образом:

$$V = \sqrt{\frac{2W_M}{\rho C_L S}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 10\,000}{0,00238 \cdot 0,56 \cdot 100}} = 387 \text{ фут/сек} \quad (3.1)$$

С учетом скорости попутного ветра эта скорость будет равна

$$V_L = 387 + 40 = 427 \text{ фут/сек.} \quad (3.2)$$

Теперь нам необходимо выбрать угол тангажа снаряда в начале пуска и траекторию снаряда в процессе разгона. Обычно при этом желательно:

а) чтобы пусковая установка имела небольшой угол возвышения;

б) чтобы автопилот обеспечивал малую величину перерегулирования в процессе ввода снаряда на требуемую траекторию;

в) чтобы угол атаки крыла снаряда был близок к нулю.

Принятое нами превышение снаряда над землей в конце участка разгона, равное 200 футам, не потребует очень больших углов наклона траектории в период разгона. На этом этапе расчета нельзя точно определить траекторию снаряда, однако предварительный выбор угла наклона траектории к горизонту необходим. В нашем примере вполне приемлемым предварительным значением этого угла будет $\gamma = 15^\circ$.

Следующим важным шагом является выбор расположения стартового двигателя на снаряде. Так как наш снаряд снизу не имеет ни выхлопных труб от двигателя, ни стабилизатора, то мы можем выбрать простую схему с одним стартовым двигателем под снарядом.

После этого вычисляется требуемая величина импульса стартового двигателя. Стартовый двигатель должен обеспечить разгон

как массы снаряда, так и своей собственной, так что суммарная величина требуемого импульса будет

$$I = I_M + I_B. \quad (3.3)$$

Эмпирическим путем было установлено, что для предварительного проектирования вес стартового двигателя с топливом можно принять ориентировочно равным 1% от численного значения полного импульса:

$$W_B = \frac{I}{100}. \quad (3.4)$$

Если предположить, что масса и тяга остаются постоянными в течение всего периода разгона, то можно воспользоваться уравнением $F = ma$ или $F = Wa/g$. Поскольку мы находимся на предварительной стадии проектирования, то такое допущение вполне приемлемо, особенно если учесть, что наш снаряд в процессе разгона имеет малое ускорение. Тогда получим

$$\frac{F}{W} = \frac{a}{g},$$

но так как

$$V_L = at, \quad \text{то} \quad \frac{F}{W} = \frac{V_L}{tg}. \quad (3.5)$$

Поскольку

$$I = Ft = \frac{W V_L}{g},$$

то уравнение (3.3) принимает вид

$$I = \frac{W_M V_L}{g} + \frac{W_B V_L}{g}. \quad (3.6)$$

Подставив значение W_B из уравнения (3.4), получим

$$I = \frac{W_M V_L}{g} + \frac{I V_L}{100g},$$

или после преобразования

$$I = \frac{W_M V_L}{g - \frac{V_L}{100}}. \quad (3.7)$$

Беря найденное значение $V_L = 427$ фут/сек, получаем

$$I = \frac{10\,000 \cdot 427}{32,2 - 4,3} = 153\,000 \text{ фунт} \cdot \text{сек}$$

и из уравнения (3.4) находим

$$W_B = 1530 \text{ фунтов.}$$

Этот импульс вычислен без учета уменьшения массы стартового двигателя за счет выгорания топлива, а также без учета сравнительно малых составляющих, необходимых для преодоления лобового сопротивления снаряда и для подъема последнего на заданную высоту. В то же время при определении импульса не принималась в расчет дополнительная тяга маршевого двигателя снаряда, которая у всех типов двигателей, за исключением ПВРД, достаточна, чтобы компенсировать сопротивление снаряда в период разгона.

Зная требуемую величину полного импульса, мы можем приступить к определению величины тяги и времени работы стартового двигателя. Небольшое время работы стартового двигателя оказывается несколько выгоднее, так как лобовое сопротивление снаряда и другие аэродинамические силы в этом случае меньше влияют на траекторию полета снаряда в период разгона. Кроме того, для данного вида топлива стартовый двигатель получается более компактным, легким, а в некоторых случаях и более экономичным. Однако более существенными, чем приведенные выше обстоятельства, являются конструктивные соображения. Малые ускорения снаряда при его разгоне позволяют уменьшить вес самого снаряда и увеличить надежность работы таких чувствительных элементов, как электронные лампы, подшипники гироскопов и лопатки турбины двигателя. Пусть на основе анализа нашего снаряда установлено, что для него максимальное продольное ускорение может быть принято равным $a = 4g$ (причем допустимы также и несколько большие значения). Тогда номинальная величина потребной тяги будет равна

$$F_0 = \frac{W a}{g} = 4 (10\,000 + 1530) = 46\,120 \text{ фунтов,}$$

а номинальное время работы стартового двигателя

$$t = \frac{153\,000}{46\,120} = 3,32 \text{ сек.}$$

Полученные нами значения представляются вполне приемлемыми, и, следовательно, выбранное небольшое ускорение является вполне осуществимым.

В полученную величину тяги необходимо внести поправку, поскольку в нашем примере направление тяги не совпадает с направлением полета. Допуская, что во время разгона угол атаки близок к нулю, для вычисления поправки мы используем векторную диаграмму (рис. 3.5, б), из которой находим

$$F_V = F_0 \sin \gamma; \quad F_H = F_0 \cos \gamma \quad (\gamma = 15^\circ)$$

$$F^2 = F_H^2 + (|W| + F_V)^2$$

или

$$F^2 = (F_0 \cos \gamma)^2 + (|W| + F_0 \sin \gamma)^2.$$

Подставляя наши значения и решив уравнение, получаем

$$F = 50\,300 \text{ фунтов.}$$

Учитывая, что $\cos \delta = F_H/F$, получаем

$$\delta = 27^\circ 45' \text{ и } \delta - \gamma = 12^\circ 45'.$$

где δ есть угол, на который необходимо отклонить направление тяги стартового двигателя относительно продольной оси снаряда. В нашем случае, как и во многих других аналогичных случаях, расположение камеры стартового двигателя параллельно продольной оси снаряда позволит упростить крепление двигателя к снаряду. Угол между осью сопла и осью самого двигателя называют *углом наклона сопла*.

Выбрав предварительно диаметр стартового двигателя и расстояние между ним и обшивкой корпуса снаряда (от 1 до 3 дюймов), мы сможем теперь определить точку пересечения оси сопла с осью камеры стартового двигателя.

На данной стадии проектирования мы можем сделать лишь эскиз пусковой системы. Если в разработку снаряда входит также конструирование специального стартового двигателя, то существенное влияние на конструкцию последнего могут оказать данные о расположении шпангоутов корпуса снаряда, о положении его центра тяжести и соображения о расположении механизмов крепления. Приступая к вычерчиванию бокового вида системы, необходимо помнить, что линия действия тяги должна проходить через определенную точку около центра тяжести системы «снаряд + стартовый двигатель» и что из-за выгорания топлива центр тяжести системы во время работы стартового двигателя будет перемещаться. Возникающее в результате этого небольшое увеличение угла тангажа не представляет особой опасности и может быть легко компенсировано небольшим начальным смещением направления тяги.

После того как выбрана целесообразная пусковая система, нужно провести более детальное исследование. Это исследование включает варьирование веса снаряда в разумных пределах (обычно в сторону увеличения) в предвидении возможных изменений в конструкции тех или иных элементов снаряда, как, например, изменений в системе управления и наведения, в маршевом двигателе, боевой части, топливных баках; варьирование величин продольного ускорения и анализ влияния изменений ускорения на вес конструкции и угол наклона траектории к горизонту; уменьшение вертикальной составляющей тяги от величины, равной стартовому весу снаряда, до нуля и анализ влияния этого уменьшения на скорость снаряда в период пуска, на требуемый угол наклона траектории при разгоне и на общую компоновку всей системы (включая возможность применения вместо

одного двух стартовых двигателей); расчеты траекторий снаряда для различных величин смещения в направлении тяги; определение максимально допустимых смещений действия тяги, исходя из величины зазора между снарядом и поверхностью земли, из критического угла атаки крыла, а также из конструктивных соображений; определение характера изменения углов тангажа во времени для различных величин смещения линий действия тяги и вычисление величин других отклонений под действием аэродинамических сил, например углов крена и рыскания. Необходимо также исследовать влияние аэродинамических характеристик, эффективность работы автопилота и влияние изменения веса стартового двигателя. Для окончательного выбора оптимальной пусковой системы необходимо решать задачу методом последовательных приближений.

Механизмы крепления стартового двигателя. Механизмы крепления служат для сохранения заданного взаимного расположения стартового двигателя и снаряда в процессе передачи тяги от двигателя к снаряду. Они обеспечивают также надежное отделение стартового двигателя от снаряда по окончании процесса горения. Механизмы крепления могут выполнять и другие задачи, например обеспечивать скольжение снаряда по направляющим пусковой установки, что позволяет отказаться от создания для этого каких-либо специальных захватов на снаряде и тем самым обеспечить более обтекаемую форму снаряда.

Механизмы крепления обычно устроены так, что после отделения стартового двигателя на снаряде не остается никаких выступающих деталей, которые могли бы создавать дополнительное сопротивление в полете. Поэтому обычно эти механизмы крепятся в пазах или отверстиях корпуса снаряда.

Наиболее желательным способом соединения стартового двигателя со снарядом является крепление в трех точках. Такой метод требует малого числа деталей крепления и является статически определимым.

Тяга стартового двигателя может передаваться снаряду либо через одну или две точки подвески, либо через самостоятельный силовой элемент, который может передавать усилие только вперед, по направлению действия тяги. Под действием тяги могут возникнуть значительные местные напряжения в камере сгорания двигателя, что сильно влияет на выбор местоположения силового фитинга.

3.6. Отделение или сбрасывание стартового двигателя

У большинства типов управляемых снарядов после окончания периода разгона стартовый двигатель должен или самостоятельно отделиться от снаряда или должен быть сброшен принудительно.

Отделение стартового двигателя необходимо для уменьшения суммарного лобового сопротивления снаряда, а также для улучшения его устойчивости, поскольку у системы «снаряд + стартовый двигатель» центр тяжести обычно смещен назад, что отрицательно сказывается на устойчивости полета.

Для некоторых снарядов сбрасывание стартового двигателя не является необходимым. Примером такого снаряда может служить снаряд класса «воздух — воздух», у которого стартовый двигатель размещается либо внутри корпуса снаряда, либо является его продолжением. Этот снаряд разгоняется только при помощи стартового двигателя и дальше летит к цели по инерции, причем несброшенный корпус стартового двигателя увеличивает массу снаряда, а следовательно, и его **кинетическую энергию**.

В обоих случаях, соответствующих двум способам размещения стартового двигателя, некоторое увеличение аэродинамического сопротивления снаряда обычно полностью компенсируется выигрышем в дополнительной кинетической энергии за счет оставшейся несброшенной камеры сгорания стартового двигателя.

Если для размещения стартового двигателя потребуется только удлинить корпус снаряда, то дополнительное сопротивление снаряда будет небольшим, так как добавленная часть корпуса не выходит за пределы мидела той части, которая расположена впереди. Кроме того, дополнительное сопротивление, возникшее в результате увеличения поверхности снаряда, может быть частично компенсировано уменьшением хвостового оперения, расположенного на удлиненной части, образованной стартовым двигателем.

Если требуется принудительное сбрасывание стартового двигателя, то его можно рассматривать как последнюю операцию, которую необходимо **выполнить** при запуске снаряда. Сбрасывание стартового двигателя должно осуществляться по возможности без помощи какого-либо дополнительного оборудования.

Источники энергии для отделения или принудительного сбрасывания. Для отделения или принудительного сбрасывания стартового двигателя могут быть использованы самые разнообразные источники энергии. Очень желательно для этой цели использовать силу тяжести самого стартового двигателя и его лобовое сопротивление, которое в конце участка разгона достигает значительной величины из-за большой скорости снаряда и обычно плохих аэродинамических форм крепления стартового двигателя. Иногда для отделения стартового двигателя от снаряда можно использовать аэродинамическую подъемную силу. В этом случае применяются небольшие крылья типа плавников, а также крепления соответствующей аэродинамической формы. Если этой силы окажется недостаточно, то дополнительно могут быть применены предварительно сжатые пружины или пневматический привод, питаемый

из баллонов со сжатым воздухом или отработанными газами стартового двигателя. Когда используются баллоны сжатого воздуха, при конструировании необходимо предусмотреть, чтобы в случае отказа двигателя при запуске не было преждевременного сбрасывания стартового двигателя. При использовании отработанных газов стартового двигателя получается система, функционирование которой зависит от работы последнего; кроме того, в этом случае необходимо очищать и охлаждать газ на пути его движения к баллону-аккумулятору.

Способ сбрасывания. Способ сбрасывания стартового двигателя в большой степени будет зависеть от выбранного расположения двигателя на снаряде. При расположении стартового двигателя и снаряда тандемом наиболее вероятным будет сбрасывание назад; при расположении двигателя под снарядом сбрасывание будет осуществляться вниз и, возможно, назад. При использовании двух стартовых двигателей, расположенных по бокам снаряда, может быть выбран один из следующих способов сбрасывания: сбрасывание в стороны и назад, сбрасывание методом поворота стартовых двигателей во внешние стороны вокруг двух из четырех точек крепления и сбрасывание в стороны и вниз. Выбор наиболее рационального способа зависит от ряда факторов, таких, например, как расположение сопла двигателя, хвостового оперения, направляющих пускового устройства и т. п.

После сбрасывания стартового двигателя на поверхности снаряда не должно оставаться выступающих деталей, для чего необходимо разработать специальную конструкцию механизмов крепления.

Другие проблемы, связанные с применением стартового двигателя. После сбрасывания стартового двигателя центр тяжести часто смещается на большую величину, в силу чего следует тщательно изучить влияние этого перемещения на устойчивость снаряда. Необходимо учитывать также и другой весьма важный фактор: возникновение турбулентного потока при сбрасывании стартового двигателя, особенно если скорость снаряда в конце участка разгона около- или сверхзвуковая. Особенно нежелательно образование турбулентного потока около воздухозаборников двигателя и управляющих поверхностей.

Нужно исследовать также величину расстояния между снарядом и стартовым двигателем в момент его отделения. Это исследование должно показать, насколько устойчиво движение стартового двигателя после его отделения. При этом должно быть определено время, необходимое для прохождения стартового двигателя мимо самой задней точки снаряда.

Такое исследование, возможно, покажет, что для полного отделения стартовому двигателю необходима определенная минимальная скорость по отношению к снаряду. В таком случае

придется блок стартового двигателя сбрасывать принудительно, для чего необходима определенная сила; влияние ее величины и направления действия на блок стартового двигателя после его отделения также должно быть учтено. Возможно, что и для механизмов крепления стартового двигателя придется применять короткие направляющие, чтобы придать им определенное направление при отделении. Выбрав подходящую длину направляющих — до нескольких дюймов — и зная ускорение, которое необходимо сообщить двигателю для обеспечения требуемой скорости в момент отделения, можно подсчитать силу, потребную для принудительного сбрасывания блока стартового двигателя.

При изучении процесса отделения стартового двигателя от снаряда необходимо учесть возможность отклонения снаряда от своего расчетного положения, например колебания по углу тангажа под действием таких факторов, как неточная регулировка направления тяги стартового двигателя, смещение центра тяжести снаряда в момент сбрасывания стартового двигателя, а также реакция силы, сбрасывающей стартовый двигатель.

Если стартовый двигатель с наклонным соплом сбросить до окончания работы двигателя, то он будет вращаться в плоскости наклона сопла. Такое явление обуславливается большим плечом момента силы тяги относительно центра тяжести стартового двигателя. Мы обращаем внимание на это обстоятельство потому, что почти везде вошло в обычай начинать отделение стартовых двигателей в момент уменьшения тяги, но раньше ее полного прекращения.

В предыдущих рассуждениях мы делали особый упор на обеспечение прочности механизмов крепления стартового двигателя к снаряду, чтобы эти крепления могли выдержать без каких-либо деформаций действие реактивной силы в момент запуска стартового двигателя. Чтобы предотвратить преждевременное отделение стартового двигателя от снаряда в результате неосторожного обращения или под действием перемещения подвижного средства, с которого производится пуск (корабль, самолет), необходимо предусмотреть дополнительное крепление, автоматически отключающееся в момент начала работы двигателя. Желательно, чтобы отсоединение этих креплений происходило лишь при нормальной работе двигателя, тогда в случае отказа в работе двигателя или в случае задержки воспламенения топлива двигатель нельзя будет сбросить. При одном стартовом двигателе отсоединение дополнительных механизмов крепления может осуществляться одновременно с запуском двигателя, при наличии же нескольких стартовых двигателей требуется небольшой период времени для выравнивания тяги всех стартовых двигателей.

3.7. Механизмы пусковой установки и вспомогательные устройства

Существует ряд механизмов и вспомогательных устройств различной конструкции и различной степени сложности, необходимых для проведения пуска или для обслуживания снаряда во время нахождения его на пусковой установке.

В простейшем виде пусковая установка представляет собой несущую конструкцию с направляющими для придания снаряду определенного направления на начальном участке полета. Обычно в дополнение к нему необходимы следующие механизмы и вспомогательные устройства: механизм заряжания, замково-стопорные механизмы, срезные болты, механизмы для сбрасывания снарядов, для выключения предохранителей, предотвращающих преждевременный пуск или срыв снаряда с установки, механизмы для горизонтальной и вертикальной наводки и т. п. Чтобы привести в действие многие из этих устройств, необходимы источники энергии. Следует отметить, что каждый из перечисленных механизмов предназначен для выполнения определенной функции, однако часто один и тот же механизм может выполнять несколько функций. Последнее относится к замково-стопорным механизмам, к механизму взведения взрывателя и механизму для сбрасывания.

Замково-стопорные механизмы. Под замково-стопорным механизмом мы понимаем такой механизм, который служит для удержания снаряда на лафете до того момента, пока не потребуется осуществить пуск и пока не будут созданы условия для успешного пуска. Необходимость замково-стопорных механизмов обуславливается различными причинами, вытекающими из способа размещения стартового двигателя на снаряде, типа пусковой установки, боевого средства, с которого производится пуск снаряда, а также из тактических соображений. Замково-стопорные механизмы должны применяться в следующих случаях: а) когда маршевый двигатель запускается до старта снаряда, в силу чего возможно преждевременное движение снаряда на пусковой установке под действием тяги маршевого двигателя; б) при использовании пусковой установки «с нулевым разбегом», когда необходимо задержать снаряд на пусковой установке до тех пор, пока тяга стартового двигателя не достигнет установленной величины; в) при использовании нескольких и особенно двух параллельно работающих стартовых двигателей, когда нужно предотвратить старт в случае отказа или ненормальной работы одного из них.

В первом из указанных случаев важно знать максимальную тягу, которую может развить маршевый двигатель, и вести проектирование с учетом этой максимальной тяги. Если пуск

производится с корабельной или береговой пусковой установки, которой при пуске придается некоторый угол возвышения, то необходимо решить, должен ли маршевый двигатель работать как при горизонтальном положении пусковой установки, так и при наличии какого-то угла возвышения. В любом случае тяга маршевого двигателя обычно очень мала по сравнению с весом снаряда, но если двигатель должен работать только при наклонном положении пусковой установки, то для удержания и фиксации снаряда на установке можно ограничиться применением простых устройств. Они могут играть роль замково-стопорных механизмов, так как усилия, потребные для удержания снаряда, при наличии угла возвышения пусковой установки малы, ибо в этом случае тяга маршевого двигателя уменьшается за счет составляющей силы тяжести снаряда, направление которой противоположно направлению тяги. Для этой же цели могут быть использованы срезные болты, растяжки и пружинные механизмы, но чаще всего для удержания снаряда в положении для пуска достаточно только его веса и трения в направляющих, и если при установке снаряда на пусковом устройстве применяются стопоры, то они должны быть освобождены, как только лафету будет придан угол возвышения.

На корабельных и береговых подвижных пусковых установках часто бывает необходимо применять замково-стопорные механизмы, чтобы удерживать снаряд в заданном положении при движении корабля или платформы. При применении пусковых установок на надводных кораблях по техническим условиям допускается крен корабля $\pm 35^\circ$. Во всех случаях применения пусковых установок на кораблях замково-стопорный механизм должен работать до самого момента пуска. Подвижные береговые пусковые установки во время пуска остаются на одном месте, в силу чего допустимо применение замково-стопорных механизмов, освобождаемых перед началом пуска вручную.

В условиях, когда необходимо удержать снаряд на пусковой установке «с нулевым разбегом», а также при применении нескольких стартовых двигателей на замково-стопорные механизмы действуют большие усилия. Поэтому необходимо принять особые меры, чтобы предохранить эти механизмы от действия вредных ударных нагрузок, возникающих в момент освобождения снаряда. Ниже приводится описание замково-стопорного механизма, применяемого при использовании нескольких стартовых двигателей.

Пример замково-стопорного механизма для наземной пусковой установки. В одном из вариантов самолета-снаряда «Лун» (модификация немецкого самолета-снаряда Фау-1) использовалась пусковая установка с короткими направляющими и два стартовых двигателя на твердом топливе. Характерной особенностью стартовых двигателей было то, что в момент воспламе-

нения возникал сильный толчок, причем время от момента приведения в действие воспламенителя до воспламенения заряда колебалось в небольших пределах. Кроме того, имелись сомнения в надежности воспламенения заряда стартовых двигателей, поскольку последние представляли собой ранние экспериментальные образцы. Необходим был механизм, который удерживал бы снаряд на пусковой установке во время прогрева маршевого пульсирующего двигателя и предотвращал преждевременный старт снаряда при ненормальностях в работе одного из стартовых двигателей. Этот механизм должен был выполнять также и другую, вспомогательную, роль: предохранять снаряд от воздействия ударных нагрузок в момент запуска стартовых двигателей.

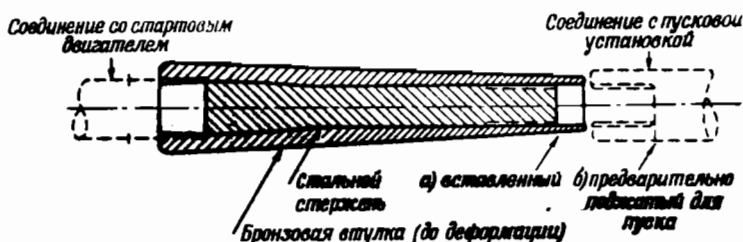


Рис. 3.6. Механизм крепления снаряда.

Разработанный механизм (рис. 3.6) удовлетворял всем предъявляемым к нему требованиям. Он состоял из стального стержня, конец которого имел форму конуса. Стержень вставлялся в бронзовую втулку, внутренний диаметр которой был несколько больше диаметра стального стержня. На рис. 3.6 стержень показан в положении, когда его конец находится во втулке (положение а). Перед пуском стержень еще дальше вдвигали во втулку (положение б), чтобы обеспечить ему предварительное поджатие (втулка была прикреплена к блоку стартового двигателя, а стержень своим цилиндрическим концом крепился к пусковой установке). Для отделения снаряда от пусковой установки необходимо было протолкнуть стальной стержень через втулку, преодолевая трение и прилагая усилие, необходимое для деформации втулки. Механизм был спроектирован таким образом, что при невоспламенении заряда или запоздании в запуске одного из стартовых двигателей суммарная тяга маршевого пульсирующего двигателя и одного из работающих стартовых двигателей была недостаточна для того, чтобы за время работы стартового двигателя протянуть весь стержень через втулку. В результате снаряд оставался на пусковой установке. Это же устройство вследствие своих демпфирующих свойств одновременно служило прекрасным амортизатором. Путем надлежащего подбора

конусности внутренней и наружной поверхностей конечной части бронзовой втулки обеспечивалось постепенное уменьшение силы торможения по мере протаскивания стержня через втулку, так что удар при отделении стержня от втулки получался весьма незначительным.

Замково-стопорные механизмы самолетных пусковых установок. К замково-стопорным механизмам самолетных пусковых установок предъявляется ряд дополнительных требований, так как они должны предохранять снаряд от схода с пусковой установки при маневрировании самолета в воздухе и при посадке, по возможности включая также посадку с аэрофинишерами. Для самолетов, базирующихся на авианосцы, разница в продольных ускорениях во время полета и при посадке с аэрофинишерами значительна. Это видно из рис. 3.7¹, где показано, что максимальная перегрузка во время полета равна $2g$, а при посадке с аэрофинишерами — $9g$ (последняя величина получена в предположении, что торможение самолета производится с помощью аварийного барьера).

В некоторых самолетных пусковых установках применяется двухступенчатый замково-стопорный механизм. Одна ступень — *ступень больших усилий* — служит для предохранения снаряда от срыва при больших перегрузках (посадка с аэрофинишерами), другая — *ступень малых усилий* — используется для удержания снаряда при малых перегрузках (непосредственно перед пуском). Предохранительное устройство пусковой установки должно допускать отключение ступени больших усилий. Совершенно очевидно, что замково-стопорный механизм должен обладать большой надежностью, так как срыв снаряда с пусковой установки во время посадки с аэрофинишерами может иметь катастрофические последствия, а если при воспламенении заряда двигателя снаряд не будет освобожден, то это неизбежно приведет к гибели самолета.

Не всегда легко сконструировать такое крепление, которое позволяло бы избежать обеих указанных опасностей. Как было сказано выше, максимальная допустимая перегрузка самолета при посадке с аэрофинишерами равна $9g$, а это значит, что всю конструкцию надо рассчитывать на подобную перегрузку. Следовательно, ступень больших усилий должна быть рассчитана на действие сил, возникающих при перегрузках, больших чем девятикратная, что можно учесть некоторым коэффициентом безопасности порядка 1,5; при этом значении коэффициента минимальная расчетная перегрузка будет равна 13,5. Если минимальное ускорение снаряда при пуске превышает $15g$, то

¹ Взято из «Airborne Stores and Associated Suspension Equipment; General Design Criteria for», M11-A-851A (Aer), 22 Nov. 1954.

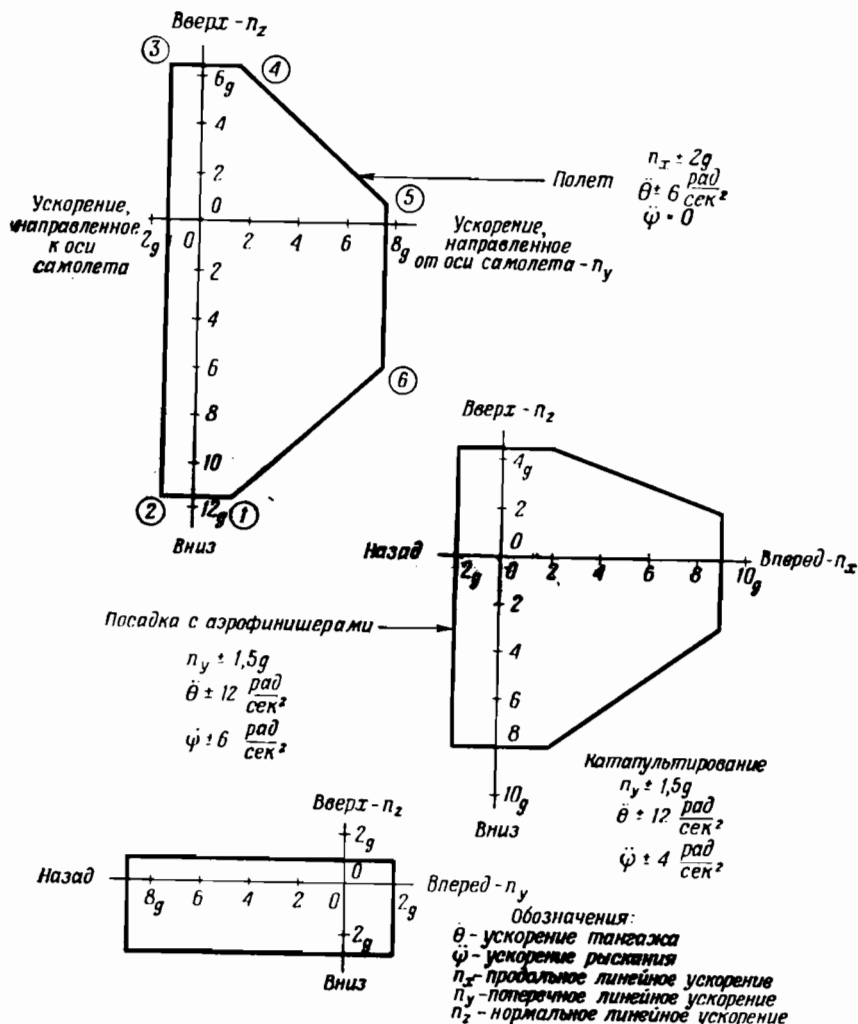
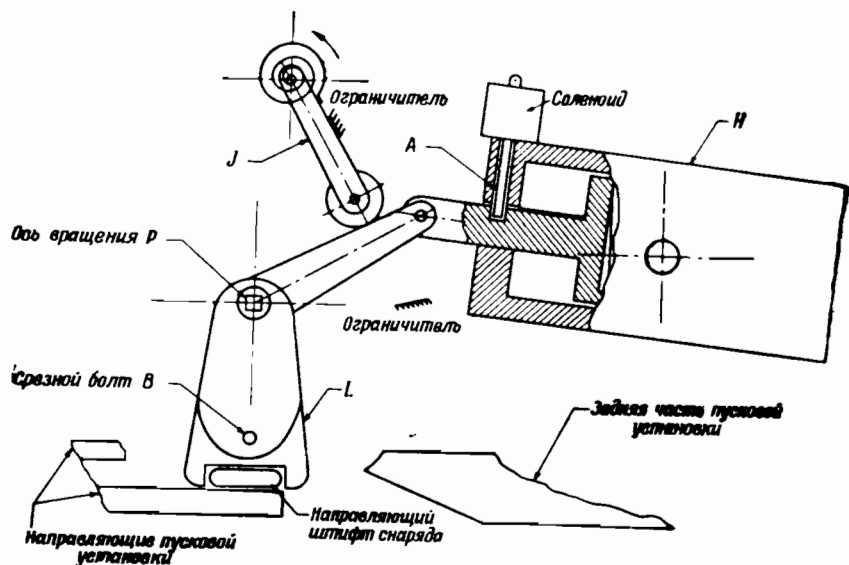


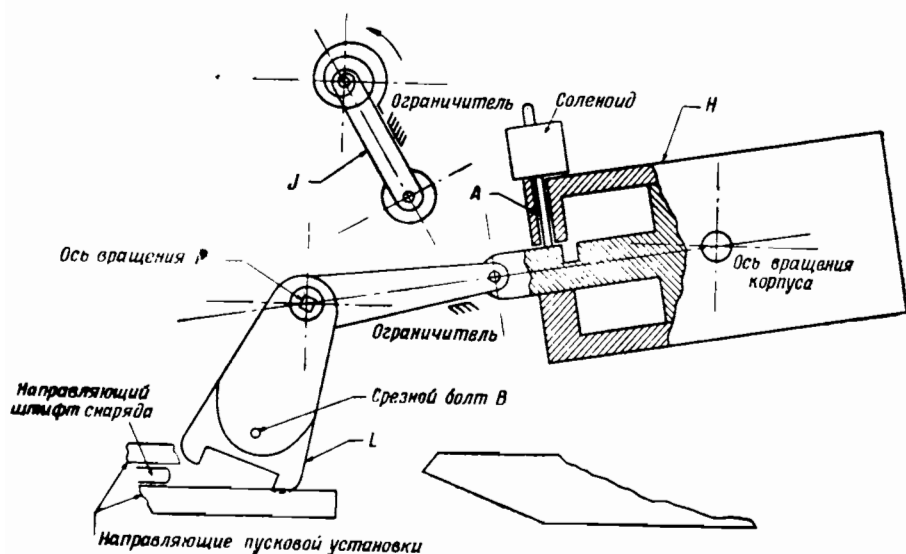
Рис. 3.7. Предельные расчетные перегрузки для креплений наружных грузов, подвешиваемых под крылом самолета авианосной авиации (все значения перегрузок даны в единицах g).

снаряд может быть запущен без отключения первой ступени. Надо заметить, что двухступенчатый замково-стопорный механизм необходим только на самолетах, предназначенных для посадки с аэрофинишерами.

Один из возможных вариантов конструкции двухступенчатого замково-стопорного механизма приведен на рис. 3.8. Там же



Р и с. 3.8, а. Двухступенчатый механизм крепления снаряда к пусковой установке (положение для транспортировки).



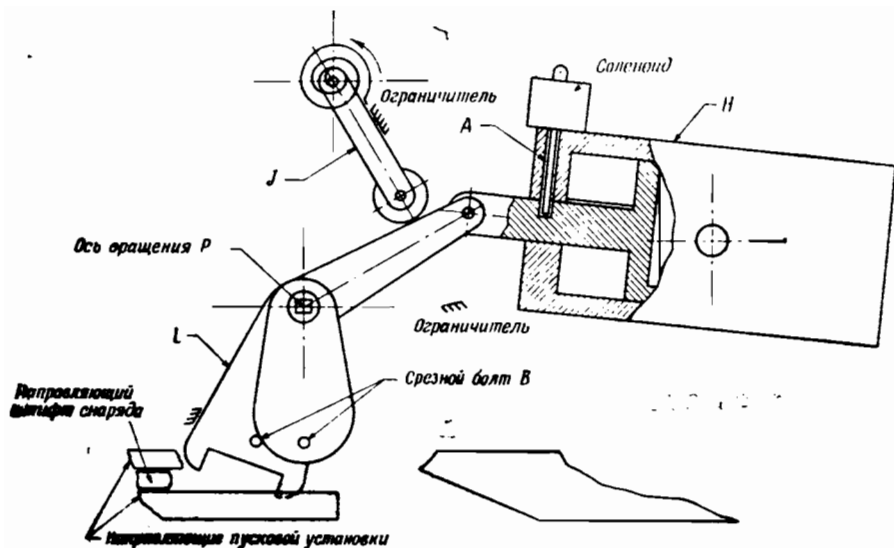
Р и с. 3.8, б. Двухступенчатый механизм крепления снаряда к пусковой установке (положение для пуска снаряда).

показаны предохранительное устройство и механизм сбрасывания. На рис. 3.8, а показано положение частей механизма, в котором они должны находиться при взлете, полете на крейсерском режиме, посадке и т. п. Переключение механизма крепления на ступень малых усилий происходит после того, как соленоид освободит чеку А. Сила, необходимая для крепления снаряда на ступени малых усилий, создается предварительно поджатой пружиной, что лучше видно на рис. 3.8, г. В момент запуска двигателя снаряда сила, действующая на стопор L, заставляет поворачиваться коленчатый рычаг, к которому стопор L прикреплен с помощью срезного болта В. Корпус Н, в котором заключены пружина и плунжер, также поворачивается, и тем самым пружина дополнительно поджимается. Хотя усилие, создаваемое пружиной, возрастает, однако плечо момента относительно точки Р уменьшается, пока части механизма не займут положение, показанное на рис. 3.8, б. В этом положении на коленчатый рычаг больше не действует никакая сила, которая заставила бы его поворачиваться. Как раз в этот момент или чуть раньше направляющий штифт снаряда выходит из зацепления со стопором L и замково-стопорный механизм больше не удерживает снаряд.

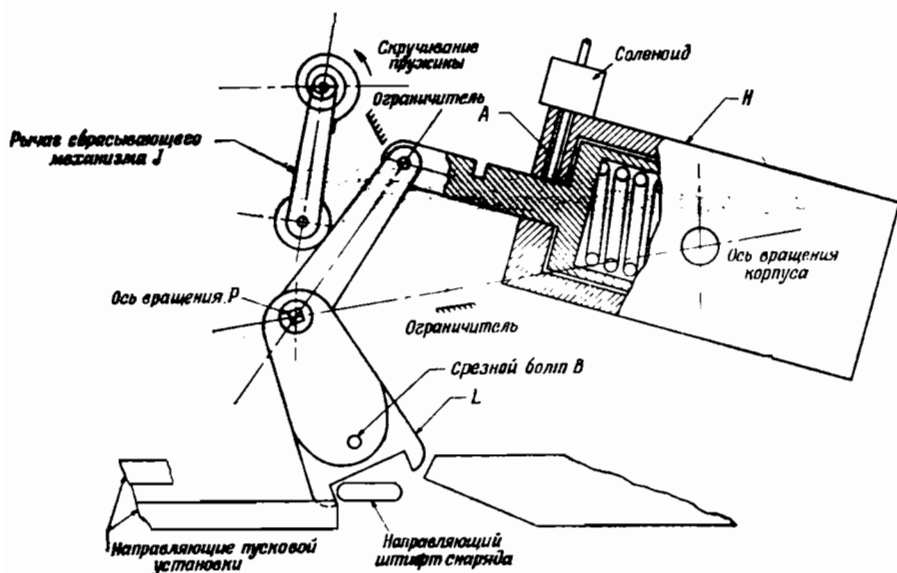
Ступень больших усилий действует до момента, пока соленоид предохранительного устройства не освободит чеку А. Если двигатель снаряда запущен до освобождения чеки А, то положение рычагов механизма будет таким, как показано на рис. 3.8, в. Сила приложена к стопору L, однако коленчатый рычаг повернуться не может. Когда сила достигает примерно расчетной величины, срезной болт В срезается и снаряд, освобожденный от стопора, стартует с установки.

Взаимодействие частей механизма при сбрасывании снаряда видно из рис. 3.8, г. Перед началом сбрасывания снаряда рычаг I находится в положении, показанном на рис. 3.8, а, б и в. В этом положении он удерживается спиральной пружиной, а также потому, что действующие на него другие силы не создают момента, поскольку линия их действия проходит через центр вращения рычага. При необходимости произвести сбрасывание снаряда с пусковой установки освобождается чека А и рычаг I поворачивается по направлению к оси вращения Р до тех пор, пока угол между ним и плечом коленчатого рычага не станет несколько больше 90°. В этот момент сжатая пружина в цилиндре Н выталкивает плунжер вперед, коленчатый рычаг поворачивается вокруг точки Р и снаряд принудительно отодвигается к заднему концу пусковой установки для сбрасывания.

Механизмы сбрасывания снаряда. Механизмы сбрасывания необходимы в основном для самолетных пусковых установок, но в некоторых случаях они могут применяться также для



Р и с. 3.8, в. Двухступенчатый механизм крепления снаряда к пусковой установке (положение при аварийном случае).



Р и с. 3.8, г. Двухступенчатый механизм крепления снаряда к пусковой установке (положение в момент сбрасывания снаряда).

корабельных и береговых пусковых установок, в частности для обеспечения высокого темпа стрельбы. Наиболее простым способом сбрасывания снаряда является сбрасывание с помощью стартового двигателя, для чего необходимо предусмотреть аварийное включение двигателя. Этот способ можно применять в самых разнообразных случаях. С самолетных пусковых установок иногда требуется сбросить снаряд либо при отказе в работе стартового двигателя, либо для уменьшения лобового сопротивления самолета, либо из соображений безопасности, когда сбрасывание необходимо произвести еще до посадки самолета. В некоторых случаях бывает необходимо вместе со снарядом сбросить и всю пусковую установку.

При проектировании любой пусковой установки необходимо реалистически подходить к вопросу о том, нужен ли в данном случае сбрасывающий механизм. Надо совершенно четко определить назначение механизма сбрасывания и взвесить преимущества и недостатки введения сбрасывающего механизма, ибо хотя при этом повышается безопасность, но вместе с тем усложняется система, увеличивается вес и т. д. Мы не отрицаем в принципе необходимость введения в пусковую установку сбрасывающего механизма, а лишь предостерегаем от применения его в том случае, когда снаряд сможет быть сброшен за счет своего собственного веса. Если механизм для сбрасывания снаряда необходим, то его сравнительно нетрудно совместить с замково-стопорным механизмом; один из примеров такого совмещения был приведен на рис. 3.8. Следует отметить, что в данном примере сбрасывание снаряда назад дает определенную выгоду, так как позволяет использовать также аэродинамическое сопротивление снаряда.

Иногда может возникнуть такое положение, когда для сбрасывания снаряда необходимо применить дополнительную силу. Например, известно, что при сбрасывании контейнеров с подкрыльных пилонов контейнеры поднимаются выше уровня крыла. Для устранения опасности повреждения контейнером самолета нужно или ограничить скорость и маневр самолета при сбрасывании, или сбрасывать контейнеры принудительно, прикладывая для этого дополнительную силу.

Для сбрасывания можно применить пневматические, гидравлические, электрические, пиротехнические и механические устройства. В интересах простоты и надежности предпочтительнее использовать механические устройства, приводимые в действие человеком. Если же вследствие больших требуемых усилий не удастся использовать механическое сбрасывание, то следует применять сбрасывание с помощью подрыва пиропатронов. Имеются отработанные и испытанные образцы пиропатронов, которые при малых размерах обеспечивают большую силу. Недостатком их применения является необходимость производить после каждого

использования пиропатрона чистку частей, подвергающихся воздействию пороховых газов, а также замену некоторых деталей, но это неудобство не представляет большого затруднения ввиду того, что необходимость сбрасывания возникает сравнительно редко. Все остальные способы сбрасывания приводят к большему увеличению веса сбрасывающего механизма и менее надежны.

Если же возникает необходимость вместе со снарядом сбросить и пусковую установку, то эту задачу, очевидно, можно решить двумя способами: либо путем крепления пусковой установки к крылу посредством взрывных болтов, либо путем подвески ее на модифицированный бомбодержатель, с которого установка и может быть сброшена.

Штепсельные разъемы. Во всех авиационных управляемых снарядах должны быть предусмотрены штепсельные разъемы для присоединения снаряда к внешним источникам питания, для предпусковой проверки и других целей. В настоящем разделе рассматриваются конструкция таких штепсельных соединений и выполняемые ими функции. Простейшим способом присоединения наземных электрических цепей к снаряду является пучок проводов, который в момент старта или отрезается, или разрывается. Часто, однако, требуется более плавное отделение проводов от снаряда, чтобы избежать короткого замыкания, ударной нагрузки на снаряд при разрыве проводов и предотвратить возможность уноса висящих обрывков проводов снарядом.

Для указанных целей можно применить следующие три основных типа штепсельных разъемов: *«многоконтактную колодку»*, *«пружинно-контактный»* и *«хрупкий»*. Первый тип является достаточно хорошим разъемом, но он отвергается некоторыми конструкторами, так как для отделения требуется развести обе половинки штепсельного разъема на 0,5—1 дюйм друг от друга.

При «пружинно-контактном» типе разъема на пусковой установке имеются отдельные контакты, которые при помощи пружин прижимаются к соответствующим контактам, размещенным на поверхности снаряда. Этот тип разъема имеет существенные недостатки, так как в результате коррозии, загрязнения или попадания солей может полностью или частично нарушиться соединение между контактами.

«Хрупкий» тип разъема, как показывает само название, должен во время старта снаряда разламываться. Обычно такой разъем состоит из двух металлических коробок, плоскость разъема которых совпадает с наружной поверхностью снаряда. Обе коробки соединены между собой винтами, и электропровода проходят через обе коробки. Все пространство в коробках вокруг электропроводов заполняется жидкой пластмассой, которая после затвердения становится хрупкой. При старте снаряда одна

коробка, прикрепленная к пусковой установке, остается на ней. Срез происходит в плоскости разъема, причем одновременно срезается как пластмасса, так и электропровода. Особое внимание должно быть обращено на то, чтобы разорванные провода, которые обычно находятся под током, не соединились друг с другом. «Хрупкий» тип разъема должен разрушаться при малом срезающем усилии, так как в противном случае в процессе разъединения могут иметь место значительные ударные нагрузки. Первый и третий из описанных типов штепсельных разъемов являются наиболее надежным решением проблемы, и возможно, что из них самым надежным является тип «хрупкого» разъема.

В некоторых конструкциях пусковых установок для управляемых снарядов ось штепсельного разъема может быть параллельной направлению движения снаряда. В этом случае наиболее удобным будет применение «многоконтактной колодки». В других конструкциях ось штепсельного разъема должна быть примерно перпендикулярна продольной оси снаряда или направлению его движения. В этих случаях прямой смысл применить «пружинно-контактный» или «хрупкий» штепсельный разъем; но если предусматриваются механизмы для отсоединения разъемов (убирающие или поднимающие), то может быть применена и «многоконтактная колодка».

Дополнительные трудности при проектировании указанных выше механизмов для любого типа разъема возникают в случаях, когда конструкция направляющего штифта на снаряде и направляющих пусковой установки такова, что штифт должен пройти через половину штепсельного разъема, прикрепленного к корпусу пусковой установки. Такое положение часто имеет место в стандартных узких самолетных пусковых установках, когда для удержания снаряда на пусковой установке применяется один задний направляющий штифт, а штепсельный разъем на снаряде размещается впереди на пути движения этого штифта.

Простой и надежный механизм, который особенно хорошо подходит для рассоединения «многоконтактной колодки», работает следующим образом. Когда снаряд начинает движение, первые несколько дюймов вместе с ним движется и вся «многоконтактная колодка». При дальнейшем движении снаряда часть колодки, прикрепленная к пусковой установке, при помощи кулачка отделяется от второй части, прикрепленной к снаряду. Кулачок может быть выполнен просто в виде какого-то наклонного выступа на пусковой установке, за который зацепляется часть штепсельного разъема, прилегающая к пусковой установке, при движении снаряда вперед.

Механизм зарядания. Иногда возможно и желательно сделать так, чтобы механизм зарядания являлся частью пусковой установки. Например, устройство наземной пусковой установки,

которое придает ей угол возвышения, может быть использовано также и для приведения в действие лебедки для перегрузки снаряда с грунтовой тележки на пусковую установку. В качестве второго примера можно указать на запуск снаряда с подводной лодки после ее всплытия. Здесь может быть обеспечена подача снаряда на пусковую установку из ангара.

Для самолетных пусковых установок совмещение их с механизмом заряжания нецелесообразно, так как это ведет к увеличению веса самой установки. Если почему-либо нельзя использовать ручной способ заряжания самолетной пусковой установки, то лучше всего применить съемный механизм заряжания, присоединяющийся к пусковой установке только на время заряжания. Можно также использовать подъемники, смонтированные на грунтовых тележках, на которых снаряды доставляются к самолету.

Различные вспомогательные механизмы. Если снаряд размещен внутри фюзеляжа или на пусковой установке, частично скрытой в крыле, то необходим вспомогательный механизм для выпуска установки и возвращения ее обратно, а также для открывания и закрывания створок люков. Известно, что бомбардировщикам приходится бороться с бафтингом, возникающим при открывании створок бомболюков на больших скоростях. Нечто похожее имеет место и в самолетах с пусковыми установками, размещенными внутри фюзеляжа. Для некоторых выпускающихся перед выстрелом самолетных пусковых установок нужны очень быстродействующие механизмы, которые позволяли бы произвести выстрел снарядом до нарушения балансировки самолета из-за открывания дверок люков и выпуска наружу пусковой установки.

Предохранительные устройства для самолетных пусковых установок были вкратце рассмотрены в параграфе о замкостопорных механизмах. К этому необходимо лишь добавить, что источник энергии и устройство для приведения в действие предохранительного механизма должны быть надежными и располагать мощностью, которая значительно превышала бы эксплуатационную, на случай возможного преодоления дополнительных усилий при заедании, попадании песка и т. п. Необходимо отметить, что предохранительные механизмы пусковой установки легко могут выйти из строя при попадании песка, брызг соленой воды, при коррозии, обледенении и т. п.

Оборудование для обслуживания пусковой установки. К такому оборудованию в первую очередь относятся оборудование для предпусковых испытаний и источники электроэнергии, которые присоединяются к снаряду при нахождении его на пусковой установке. Однако для некоторых снарядов (обычно это относится к большим снарядам) необходимо обеспечить подачу

топлива, сжатого воздуха и жидкости для гидравлических устройств. Здесь наиболее важным является удобство и надежность в эксплуатации этих линий питания, так как их присоединение и обслуживание приходится осуществлять при самых разнообразных условиях. Например, в арктических условиях обледенение непосредственно влияет на темп стрельбы, так как скопление и замерзание влаги и грязи в той части разъема, которая находится на установке, может затруднить быстрое соединение линии и подготовку снаряда к пуску.

Можно добавить, что хорошо продуманная конструкция и стремление к простоте являются ключом к успешному решению вопроса создания надежного вспомогательного оборудования, как, впрочем, и к разрешению многих других проблем, относящихся к пуску снарядов.

3.8. Некоторые соображения о конструировании наземных пусковых установок

Основное назначение пусковой установки состоит в том, чтобы удерживать снаряд в определенном положении, ориентировать его и облегчить его движение на начальном участке траектории. Для получения хорошей конструкции необходимо, чтобы решение этих основных задач, а также целого ряда второстепенных (установка снаряда на пусковое устройство и др.) достигалось наиболее простыми, надежными и безопасными способами. К пусковой установке можно предъявить также и требование, чтобы ее можно было использовать для нескольких целей, например производить пуск с различных типов кораблей. Однако выполнение этого требования не должно идти вразрез с решением основных задач. Кроме того, необходимо обеспечить, чтобы снаряд находился в строго определенном положении на пусковой установке, которое зависит от типа системы наведения, аэродинамических характеристик снаряда и размещения стартового двигателя. Этот и многие другие вопросы проектирования наиболее наглядно можно проиллюстрировать на одном из примеров конструктивного решения.

Рассмотрим проблему старта гипотетического снаряда, описанного в § 3.5 данной части. Предположим, что пуск снаряда должен производиться с корабля, поскольку в этом случае наш пример будет иметь более общий характер. Данные снаряда возьмем из § 3.5:

Стартовый вес снаряда	10 000 фунтов
Тяга стартового двигателя (один)	50 300 фунтов
Угол наклона сопла стартового двигателя . . .	12°45'
Угол наклона траектории к горизонту	15°
Начальный угол тангажа снаряда	15°

Рассматриваемая в данном примере пусковая установка для дальнобойного снаряда значительно отличается от наземных пусковых установок других типов, таких, например, как установки для зенитных снарядов. От последних требуется, чтобы они были подвижными, обеспечивали быстрый подъем и наводку снаряда, быстрое зарядание и по возможности несли несколько снарядов одновременно. Между прочим, зенитные снаряды могут запускаться с направляющих, расположенных над снарядом; такое решение выдвигает проблему обеспечения минимальной высоты снаряда над землей в процессе запуска.

В рассматриваемом примере стартовый двигатель расположен под снарядом (рис. 3.4, б). Обычно выбор мест расположения захватов на снаряде в значительной мере **влияет на выбор** конструкции пусковой установки. В данном **случае** ползуны, опирающиеся на пусковую установку, могут крепиться не к самому снаряду, а к стартовому двигателю. Таким образом, стартовый двигатель опирается на пусковую установку четырьмя ползунами, а сам снаряд в свою очередь опирается на стартовый двигатель в трех или четырех точках. Центр тяжести снаряда должен находиться внутри пространства, ограниченного указанными выше четырьмя точками, которыми стартовый двигатель опирается на пусковую установку. Такое размещение снаряда обеспечивает ему устойчивое положение, что особенно важно при пуске с корабля. При других вариантах размещения стартового двигателя на снаряде, особенно в случае применения двух коротких стартовых двигателей, не представляется возможным использовать стартовые двигатели в качестве опоры для снаряда. В этом случае для крепления снаряда на пусковой установке необходимы самостоятельные устройства, что создает дополнительные трудности конструктивного порядка и усложняет проблему сбрасывания стартового двигателя.

В выбранном примере конструирование начинается с вычерчивания бокового вида снаряда со стартовым двигателем при заданном начальном угле тангажа перед пуском. Затем проводится линия, соответствующая поверхности стартовой площадки, с таким расчетом, чтобы был обеспечен достаточный зазор между соплом стартового двигателя, хвостовой частью снаряда и поверхностью стартовой площадки (рис. 3.9).

Выбранное положение системы «снаряд + стартовый двигатель» над поверхностью стартовой площадки может быть обеспечено различными путями. В первую очередь необходимо рассмотреть возможность использования пусковой установки с короткими направляющими, обладающей рядом преимуществ, о которых было сказано выше. Выбранный тип пусковой установки, по существу, состоит из 4 наклонных направляющих (можно использовать и 3), по одной на каждый ползун старто-

вого двигателя. Угол наклона направляющих к горизонту выбран несколько большим, чем угол наклона траектории, ожидаемый при выбранной величине тяги на верхнем пределе окружающей температуры. Такое превышение угла гарантирует, что снаряд будет вынужден двигаться по требуемой траектории при высоких температурах без применения специальных направляющих с пазами и обеспечивает надлежащий зазор между снарядом и пусковой установкой.

Если угол между направляющими и касательной к траектории полета снаряда выбрать равным 3° , то нормальные силы, действующие на ползуны и направляющие, будут небольшими: в рассматриваемом случае они составляют 0,052 от величины тяги. Тем самым обеспечивается очень небольшой толчок при

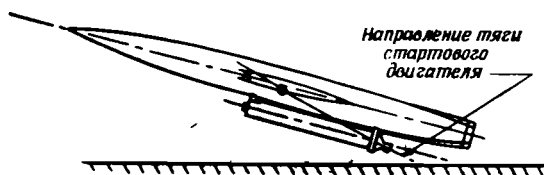


Рис. 3.9. Пусковая система (вид сбоку).

сходе ползунов с направляющих. С целью избежать опрокидывания снаряда при его сходе с установки все направляющие, имеют одинаковую длину. Для того чтобы удержать снаряд и обеспечить ему требуемое направление в период запуска стартового двигателя и набора тяги, даже при неблагоприятных условиях пуска достаточна длина направляющих 2 фута. Тем не менее предположим, якобы на основании анализа траектории снаряда при пуске со смещением тяги стартового двигателя, что снаряду желательно обеспечить движение по направляющим в течение 0,3 сек., для чего длина последних должна составлять 7 футов (с дополнением 1 фута для набора двигателем положенной тяги). Далее, необходимо рассмотреть, как меняется величина зазора между снарядом и пусковой установкой в процессе пуска. В период скольжения ползунов по направляющим обеспечить необходимый зазор нетрудно, значительно труднее это сделать после схода снаряда с направляющих, особенно при неблагоприятных условиях пуска, когда имеет место сочетание малой тяги с большим весом снаряда, и, кроме того, если в момент пуска палуба корабля поднимается. Увеличение длины направляющих облегчает задачу обеспечения зазора, так как при этом достигается повышенная скорость схода снаряда с направляющих. Допустим, что детальное изучение этой проблемы при указанных условиях показало необходимость увеличения длины направляющих до 8 футов. Эта величина и должна быть принята для предвари-

тельной разработки конструкции пусковой установки. При рассмотрении вопроса о зазоре необходимо учитывать удобство установки снаряда на пусковое устройство. Однако в данном примере мы предположим, что для этой цели нет необходимости увеличивать длину направляющих в их нижней части.

Ползуны, скользящие по направляющим пусковой установки, могут быть выполнены в виде простых кронштейнов, приваренных к корпусу стартового двигателя, или могут быть частью механизмов, с помощью которых стартовый двигатель крепится к снаряду. Материал ползуну должен иметь меньшую твердость, чем материал, из которого изготавливаются направляющие. Съемные ползуны в данном случае не нужны.

Необходимо тщательно изучить процесс подъема снаряда из горизонтального положения в положение для пуска. Несмотря на то, что для придания направляющим угла возвышения часто используется гидравлический привод, в ряде случаев может оказаться возможным применить для этого более простые устройства. В нашем случае пусковая установка по своей схеме напоминает рычаг первого рода, и для придания ей угла возвышения требуется приложить очень небольшую силу. Снаряд при зарядании помещается на заднюю часть пусковой установки непосредственно с грунтовой тележки.

На рис. 3.10 показан вид сбоку выбранной нами пусковой установки с направляющими; форма установки в дальнейшем может быть изменена, с тем чтобы еще больше упростить перегрузку с грунтовой тележки. Для корабельных пусковых установок зарядание с передней части неприемлемо, и даже береговые пусковые установки лучше заряжать снарядом непосредственно с грунтовой тележки (т. е. с задней части), используя для этой цели тянущие или толкающие приспособления. О соблюдении зазоров между снарядом и поверхностью стартовой площадки при зарядании уже упоминалось ранее; этот вопрос является настолько серьезным, что требует в ряде случаев проверки при помощи макетов.

После того как решены все указанные вопросы, начинается разработка конструкции пусковой установки. В первую очередь нужно выбрать профиль сечения направляющих и подобрать для них материал. Затем необходимо вычертить ряд сечений пусковой установки с целью убедиться, что она удовлетворяет всем предъявляемым к ней требованиям.

Для обеспечения устойчивости снаряда, особенно при запуске с корабля, необходимо, чтобы основание пусковой установки было достаточно широким, а расстояния между ползунами достаточно большими.

Связь между частями пусковой установки, поддерживающими направляющие, должна быть прочной и жесткой, в то же время

необходимо обеспечить достаточный зазор для движения системы «снаряд + стартовый двигатель». Кроме того, нужен свободный проход для расширяющихся газов стартового двигателя. Всякое отражение реактивной струи пусковой установкой следует исключить или в крайнем случае уменьшить до минимума. Даже мелкие детали пусковой установки не должны попадать в реактивную струю, поскольку образующиеся при этом местные отражения могут серьезно повлиять на пуск снаряда.

Для удержания снаряда на пусковом устройстве необходимы замково-стопорные механизмы. Мы примем конструкцию, описанную в § 3.7 и показанную на рис. 3.6.

При конструировании пусковой установки необходимо учитывать силы, удерживающие снаряд и действующие на замково-стопорные механизмы. Мы будем полагать, что эти силы уже определены. Как уже отмечалось выше, они должны уменьшаться по мере движения снаряда, с тем чтобы освобождение снаряда осуществлялось плавно, без толчков.

Основание пусковой установки, а часто и находящиеся поблизости к ней устройства должны выдерживать действие реактивной струи. С этой целью бетонные или грунтовые площадки, а также деревянные палубы необходимо покрывать плитами из стали или какого-либо другого подходящего материала.

Прочность и жесткость пусковой установки. Теперь необходимо определить прочность и жесткость пусковой установки. Если в этом отношении нет никаких определенных требований, то можно воспользоваться следующими исходными данными:

Коэффициент запаса прочности по пределу текучести	2,0
Коэффициент увеличения веса снаряда	1,2

Номинальная тяга стартового двигателя при верхнем и нижнем пределах температуры дается фирмой — поставщиком двигателя.

Качка корабля (в зависимости от его класса):

Бортовая качка	от ± 15 до $\pm 40^\circ$
Килевая качка	от ± 10 до $\pm 30^\circ$
Вертикальная качка характеризуется перегрузкой . . .	от 0,1 до 0,5 g.

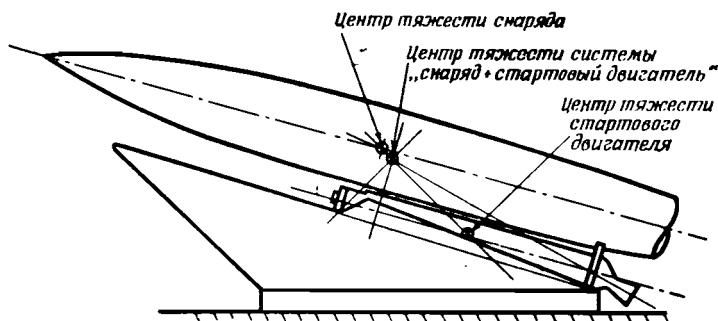
Нагрузки, испытываемые пусковой установкой, сильно зависят от частоты колебаний корабля, от взаимной связи между этими колебаниями, а также от места расположения пусковой установки относительно центра тяжести корабля.

Ветровые аэродинамические нагрузки, действующие на пусковую установку с помещенным на ней снарядом, вычисляются просто как сопротивление плоской пластинки при максимальной силе ветра. В нашем случае максимальные нагрузки равны примерно 400 фунтам.

В дополнение к весу снаряда должны учитываться также инерционные нагрузки, возникающие от неточности изготовления направляющих пусковой установки.

Необходимо тщательно изучить нагрузки, возникающие под действием силы тяги стартового двигателя. Часто, как, например, в нашем случае, они могут быть в какой-то степени полезны, так как уменьшают нагрузку на ползуны; в других же случаях они могут оказаться вредными.

Хотя к рассматриваемой пусковой системе это и не имеет прямого отношения, однако заметим, что для определения боковых нагрузок на пусковую установку при использовании двух



Р и с. 3.10. Снаряд на пусковой установке.

стартовых двигателей обычно принимают, что тяга одного двигателя достигает половины своей номинальной величины с разницей во времени 0,2 сек. по сравнению с другим двигателем. Такое допущение охватывает все возможные случаи запаздывания в воспламенении, в том числе и достаточно редкий случай отказа одного из двигателей при запуске (правда, в последнем случае запас прочности необходимо уменьшить от 1,2 до 1,5).

В соответствии с этими нагрузками нужно произвести расчет для следующих положений снаряда:

- а) на пусковой установке в готовности для пуска;
- б) перед сходом с пусковой установки;
- в) среднее положение снаряда между «а» и «б», если это необходимо.

Если для случая «а» при расчете следует исходить из наиболее тяжелых условий движения корабля в условиях шторма, то для двух других случаев следует принять обычные условия пуска.

Очевидно, что пусковые палубные установки на подводных лодках, помимо всего, должны выдерживать гидродинамические нагрузки, а установки на других типах кораблей должны выдерживать удары волн при штормовой погоде.

При выборе материалов для пусковой установки необходимо учитывать их коррозионную стойкость в условиях высокой влажности и попадания на них морской воды. Для некоторых частей установки достаточно использовать обычную конструкционную сталь, покрытую соответствующей краской, но ряд деталей, таких,

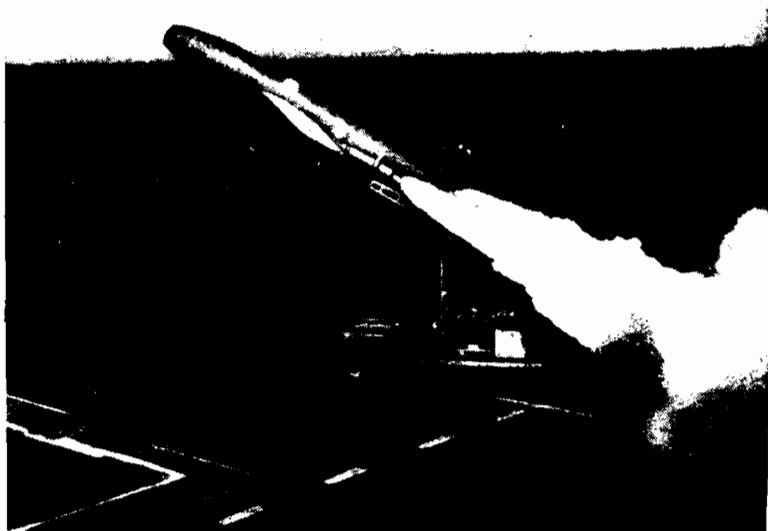


Рис. 3.10, а. Пуск самолета-снаряда «Регулус» с авианосца.

как направляющие, должны изготавливаться из нержавеющей стали.

Типы конструкций пусковых установок могут отличаться друг от друга, но преобладающей является конструкция в виде решетчатой фермы. Она лучше всего подходит для экспериментальных установок и может применяться как для береговых, так и для корабельных пусковых установок. Конструкция в виде тонкостенной трубы в некоторых случаях является более удобной для установок, принятых на вооружение. Гладкая поверхность такой установки обеспечивает малую интерференцию с реактивной струей стартового или маршевого двигателей и имеет малое гидродинамическое сопротивление при использовании ее на подводной лодке. Установки в виде трубы просты в эксплуатации и по весу легче других типов конструкций.

На рис. 3.10, а показан старт самолета-снаряда «Регулус» с пусковой установки с направляющими, которая напоминает уже рассмотренную нами установку, показанную на рис. 3.10.

3.9. Конструирование самолетных пусковых установок

Общие положения. В настоящем параграфе будут рассмотрены проблемы, встречающиеся при конструировании самолетных пусковых установок для управляемых реактивных снарядов и указаны некоторые способы их разрешения. Излагаемые соображения иллюстрируются на примере гипотетического снаряда.

Конструктор самолетных пусковых установок сталкивается с трудной задачей. Он должен объединить в одно целое снаряд и самолет и одновременно удовлетворить требованиям конструкторов как самолета, так и снаряда. Конструктор самолета требует, чтобы вооружение снарядами как можно меньше влияло на дальность, скорость, маневренность и устойчивость самолета. Конструктор снаряда, со своей стороны, желает, чтобы ничто не ухудшало тактико-технических свойств и надежности действия снаряда. В интересах всей системы данного оружия необходимо, чтобы пусковая установка отвечала требованиям обоих конструкторов, что ведет неизбежно к компромиссному решению.

Прежде чем начать проектирование самолетной пусковой установки, конструктор должен получить ясное представление о системе данного оружия в целом. Очевидно, что до тех пор, пока он не уяснит себе назначение и функции всех элементов, составляющих систему данного оружия, он не может надеяться на то, что сконструированная им составная часть этой системы будет удовлетворительной. Отсюда он должен знать боевое назначение снаряда и условия его применения. Какой самолет-носитель предназначается для запуска снарядов? Каковы его летные характеристики и устойчивость? В чем состоят особые требования со стороны системы наведения снаряда? Какой тип двигателей используется на снаряде и какие особые требования и опасности, связанные с данным типом двигателя, могут возникнуть? Необходимо ответить на все эти и многие другие вопросы, прежде чем конструктор сможет приступить к конструированию пусковой установки. Полнота ответов на эти вопросы, естественно, зависит от ступени, на которой находится разработка данной системы оружия. Конструктор может быть привлечен к проектированию пусковой установки на самой ранней стадии создания системы оружия или же ему могут предложить спроектировать пусковую установку для самолета и снаряда, разработка конструкции которых почти закончена. В последнем случае задача конструктора будет более определенной, так как он сможет получить более подробные сведения о самолете и снаряде. При отсутствии таких сведений конструктор будет лишен возможности внести необходимые изменения в чертежи самолета и снаряда с целью облегчения проблемы пуска.

В любом случае, получив задание и необходимые исходные данные для разработки пусковой установки, необходимо проанализировать ряд вариантов конструкции и оценить каждый из них с точки зрения влияния на методы боевого применения, характеристики самолета и снаряда, безопасность и т. д. Для дальнейшей, более детальной разработки следует принять наилучший вариант.

В процессе проектирования возникает много непредвиденных обстоятельств, которые будут влиять на общий конструктивный замысел, в силу чего необходимо возвращаться к исходному пункту и снова увязывать конструкцию с общими требованиями. Таким образом, проектирование представляет собой неоднократно повторяющийся процесс.

Ниже мы подробнее рассмотрим некоторые особые требования, уже упоминавшиеся нами ранее. А сейчас перечислим еще ряд вопросов, на которые может потребоваться ответ при разработке любой конкретной конструкции.

1. **Каким видом энергии снаряд должен обеспечиваться непосредственно с самолета, т. е. нужно ли предусмотреть электропроводку для проверки снаряда и для подвода электропитания, нужны ли трубопроводы для снабжения снаряда топливом, сжатым воздухом и гидропроводы высокого давления?**

2. **Каковы предельные расчетные нагрузки, действующие на самолет? Сюда входят перегрузки при посадке и взлете с палубы авианосца, если речь идет о палубном самолете.**

3. **Какие факторы могут влиять на безопасность конструкции? Какова, в частности, возможная зона повреждения самолета от действия струи стартового и маршевого двигателей снаряда?**

4. **При каких боевых условиях должно производиться зарядание пусковой установки снарядами и каковы условия полета самолета с пусковой установкой? Сколько времени требуется для зарядания пусковой установки и необходимо ли для этого наземное вспомогательное оборудование или можно смонтировать устройство для зарядания непосредственно на самой пусковой установке?**

5. **В каких климатических условиях должна эксплуатироваться пусковая установка? Должна ли она удовлетворительно действовать в условиях крайне высоких или, наоборот, крайне низких температур, а также при попадании на нее морской воды, пыли, песка?**

6. **Требуется ли сбрасывание снаряда с пусковой установки и если да, то при каких условиях?**

7. **Должна ли пусковая установка применяться для подвески снарядов других типов, а возможно, и для других авиационных грузов?**

8. Какие веса и моменты инерции имеют предполагаемые грузы, предназначенные для подвески на данную пусковую установку?

Предварительное исследование конструкции. Здесь мы рассмотрим пример, который имеет целью проиллюстрировать приведенные выше требования и указать общие методы решения ряда проблем, возникающих при проектировании. Следует иметь в виду, что предполагаемый пример является гипотетическим, и из соображений секретности он не вполне соответствует реальным данным. Кроме того, необходимо помнить, что при проектировании пусковых самолетных установок для палубных самолетов возникает дополнительно еще ряд трудностей, кроме тех, которые встречаются при проектировании установок для самолетов наземного базирования.

Рассматриваемая в нашем гипотетическом примере система оружия предназначена для обороны флота от высотных бомбардировщиков, имеющих большую дозвуковую скорость. Эта система не предназначена для обороны от низколетящих самолетов, поскольку такая задача выполняется корабельными зенитными управляемыми снарядами. Для нашего случая предполагается использовать управляемый снаряд, запускаемый с палубного истребителя-перехватчика. Намечаемая тактика применения заключается в том, что в любой момент, как только возникает угроза атаки противника, несколько самолетов-перехватчиков поднимается в воздух.

Большинство перехватов, учитывая время на предупреждение, вероятные относительные скорости истребителей и бомбардировщиков и т. п., будет осуществляться на встречных курсах или по крайней мере в передней полусфере. Для проведения вторичной атаки времени не останется.

Основываясь на указанных общих предположениях, необходимо провести общий анализ для предварительного выбора конструкции снаряда и самолета. По требованиям самолет должен нести 8 снарядов, каждый из которых нужно снабдить полуактивной радиолокационной системой самонаведения; следовательно, на самолете необходимо установить радиолокатор для облучения цели, и снаряд будет сам наводиться на цель, реагируя на отраженные от нее сигналы. Наш гипотетический снаряд показан на рис. 3.11.

После предварительного анализа конструктор самолетной пусковой установки приступает к разработке эскизного проекта, в котором он должен объединить самолет и снаряд в одно целое — систему оружия. Несмотря на то, что при этом он может вносить любые изменения в конструкцию как самолета, так и снаряда, ему приходится принимать компромиссные решения в интересах получения наилучших характеристик системы оружия

в целом, соблюдения сроков готовности, снижения стоимости и т. п.

Необходимо отметить, что вопрос выбора стартового двигателя здесь детально не разбирается, так как большинство соображений, высказанных по этому вопросу в разделе о снарядах, запускаемых с земли, применим и для снарядов, запускаемых с самолета; кроме того, выбор стартового двигателя для снаряда этого класса входит больше в задачу конструктора снаряда, чем конструктора пусковой установки.

Это особенно верно для нашего случая, поскольку нами выбран снаряд с одним двигателем, после окончания работы которого полет продолжается по инерции. Следовательно, скорость,

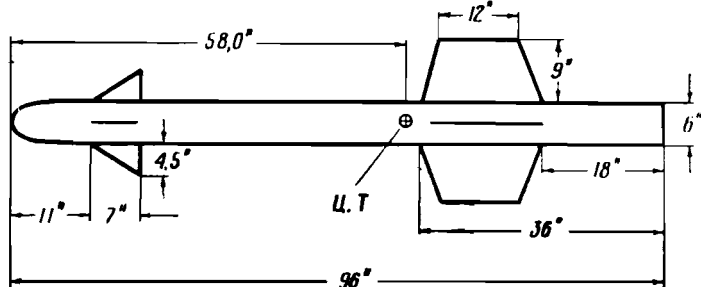


Рис. 3.11. Чертеж гипотетического авиационного управляемого снаряда.

дальность и устойчивость этого снаряда во многом зависят от характеристик стартового двигателя. Очевидно, что максимальная скорость снаряда, кроме всего прочего, является функцией импульса стартового двигателя; дальность зависит от максимальной скорости, достигнутой снарядом, и от отношения лобового сопротивления к массе снаряда в момент прекращения работы двигателя (считая, что двигатель остается на снаряде, увеличивая массу последнего без заметного увеличения его лобового сопротивления). Характеристики устойчивости снаряда после прекращения работы стартового двигателя зависят от того, будет ли корпус двигателя сброшен или оставлен на снаряде. Если двигатель со снаряда не сбрасывается, как это имеет место в нашем случае, то на нем можно разместить стабилизаторы хвостового оперения, которое будет в этом случае иметь большое плечо относительно центра тяжести. Такое решение, кроме всего прочего, выгодно тем, что не нужно обеспечивать устойчивость снаряда отдельно для случаев, когда стартовый двигатель работает и когда он сброшен.

Система наведения снаряда требует, чтобы снаряд «видел» цель до момента пуска, а требования безопасности диктуют такое расположение снаряда, чтобы реактивная струя стартового

двигателя не ударяла в какие-либо поверхности самолета, в том числе в отклоняющиеся поверхности управления.

Учитывая все изложенные выше требования, мы приходим к очевидному выводу, что в данном случае необходима либо неподвижная пусковая установка, располагающаяся снаружи самолета, либо выдвижная пусковая установка. Рассмотрим вначале последнюю. Единственным местом расположения такой установки является фюзеляж самолета. После всестороннего обсуждения с конструкторами, проектирующими самолет и комплекс управляемого снаряда, вопроса о целесообразности указанного варианта установки мы решаем от последнего отказаться по следующей причине.

Тактические условия применения системы оружия выбирались такими, чтобы можно было использовать самолет, аэродинамические формы которого после установки на нем снарядов ухудшаются. Это было сделано в предположении, что конструкция снаряда и требуемое пространство не позволят расположить снаряды внутри фюзеляжа. Проводимый анализ показывает, что разместить 8 снарядов внутри фюзеляжа на самом деле невозможно и что увеличивать фюзеляж до таких размеров, чтобы можно было поместить в нем снаряды, практически нецелесообразно. Следовательно, необходимо расположить снаряды вне фюзеляжа.

Для такого размещения управляемых снарядов будут рассмотрены два типа установок: пусковые установки пилонного типа на один или несколько снарядов и контейнерные пусковые установки на несколько снарядов, причем каждый контейнер крепится на отдельном пилоне или на конце крыла самолета.

Контейнерные установки успешно применялись для авиационных неуправляемых реактивных снарядов, и их стоит рассматривать именно с точки зрения применения таких снарядов сравнительно небольших размеров. Расположение контейнеров для снарядов на концах крыла сразу же отпадает в силу того, что там обычно размещаются топливные баки, необходимые для нормального боевого использования самолета. Контейнерная пусковая установка на пилоне является, по-видимому, наиболее рациональной, если представляется возможным произвести некоторые изменения в конструкции снаряда с целью разместить его в контейнере. Для нашего снаряда модификация может идти по трем направлениям. Первое — сделать складывающиеся крылья и оперение; второе — коренным образом изменить метод управления снарядом: снаряд должен иметь маршевый двигатель, работающий на протяжении всего полета, и не иметь никаких выступающих поверхностей; подъемная сила и управляющие моменты должны образовываться за счет изменения направления реактивной струи. Предположим, после тщательного обсуждения мы

установили, что эти две модификации для своего осуществления потребуют слишком большого объема работ, и от них следует отказаться. Третий путь заключается в уменьшении размаха крыла снаряда и размаха стабилизатора до 13 дюймов (с 20 и 18 дюймов соответственно) и увеличении их хорд. Такие изменения дают возможность разместить в каждом контейнере по четыре снаряда, как это показано на рис. 3.12. Хорды крыла и хвостового оперения снаряда можно увеличить без особых трудностей, так как и крыло и оперение на снаряде неподвижны (снаряд принадлежит к типу «утка»). Следовательно, выходит, что имеет смысл дальше рассматривать вариант пусковой установки контейнерного типа.

Однако прежде чем перейти к этому, следовало бы рассмотреть еще один, третий по счету, вид конструкции: размещение снарядов на наружных пилонных, несущих один или несколько снарядов. Опыт применения многоснарядных пусковых установок такого типа, какой потребуется для нашего снаряда, показывает, что подобная установка не является лучшим решением проблемы. Одна из причин этого состоит в большом аэродинамическом сопротивлении всей установки в результате взаимного влияния близко расположенных друг от друга управляемых или неуправляемых снарядов. В результате решаем обратиться к пилонной пусковой установке для одного снаряда.

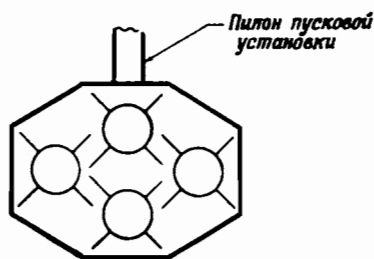


Рис. 3.12. Схема контейнера для четырех снарядов.

Пусковая самолетная установка на пилоне для одного неуправляемого или управляемого снаряда имеет широкое применение, и поэтому никаких сомнений в возможности ее использования не возникает.

Необходимо лишь рассмотреть вопрос о возможности размещения на нашем конкретном самолете 8 пилонов с учетом расположения колодцев для убирания колес шасси, расположения управляемых поверхностей, положения складных крыльев и т. п. Анализ позволяет решить, что на каждом полукрыле самолета можно установить за колодцем для убирания шасси 4 пилон и 1 пилон за линией излома крыла.

Итак, мы имеем два типа пусковых установок, которые, по-видимому, можно использовать в нашем случае, поэтому необходимо провести дальнейшие исследования, чтобы установить, какая из них является более целесообразной.

Исследование обоих типов установок следует вести в двух направлениях. Во-первых, должно быть проведено детальное

аэродинамическое исследование, как аналитическое, так и экспериментальное. На основании этого можно сравнить качества обоих типов пусковых установок в условиях их монтажа на самолете. Необходимы также исследования в аэродинамической трубе для сравнения величины лобового сопротивления 8 пилонов с одним снарядом на каждом и 2 пилонов с контейнерами по 4 снаряда в каждом. В этих исследованиях необходимо также определить лобовое сопротивление самолета после выпуска всех снарядов.

Вторым пунктом исследования установок контейнерного типа является выяснение возможных повреждений снарядов в контейнере при старте одного или нескольких из них. Особенно важно выяснить влияние реактивной струи стартующих снарядов на обтекатели головок самонаведения снарядов, остающихся в контейнере.

Если предположить, что все эти и другие необходимые факторы изучены, то тем самым проведено полное сравнение двух типов пусковых установок. На основе этих исследований инженерами, занимающимися системой оружия в целом, принимается решение об использовании пусковых установок на 8 пилонах¹.

3.10. Дальнейшая разработка конструкции пусковой установки

Продолжая рассмотрение примера, приведенного в предыдущем параграфе, будем считать, что предварительная оценка конструкции закончена и мы готовы к ее детальной разработке.

Длина направляющих. Одним из первых шагов при дальнейшей разработке проекта является определение длины направляющих пусковой установки. Как указывалось в главе 2, длина направляющих пусковой установки зависит от отклонения снарядов от расчетной траектории при пуске.

Значение принудительного движения снаряда по направляющим уже разбиралось в данной главе в отношении реактивных снарядов, запускаемых с земли, причем было указано, что отношение времени принудительного движения снаряда к времени неуправляемого движения на участке разгона имеет очень большое влияние на отклонение, обусловленное смещением линии действия тяги стартового двигателя. В условиях запуска снаряда с самолета направляющие выполняют дополнительно еще ряд функций, облегчая разрешение ряда проблем, возникающих из-за неоднородности воздушного потока вокруг крыла самолета. При-

¹ Не следует делать вывод, что при анализе конкретной задачи такого рода непременно должны прийти к подобному решению. Анализируемая здесь задача является гипотетической, и все изложенное выше следует рассматривать только как подход к решению проблемы, а не как критерий для выбора того или иного варианта проекта.

менение направляющих позволяет более рационально разместить снаряд по отношению к неоднородному воздушному потоку. Когда снаряд при пуске начинает двигаться вперед по направляющим, его движение является принудительным и на него неоднородность воздушного потока не влияет. Однако принудительное движение снаряда по направляющим предполагает, что пусковая установка и снаряд должны быть рассчитаны на амортизацию сил, возникающих в результате неоднородности потока. Хотя эти силы, возможно, и не слишком велики, но при конструировании пусковой установки ими пренебрегать не следует.

Далее, преимущество направляющих состоит в том, что снаряд имеет принудительное направление движения в момент, когда он обладает наименьшей скоростью относительно самолета, а также в том, что снаряд, входя в оставшуюся часть неоднородного потока, имеет более высокую относительную скорость, чем в случае запуска с пусковой установки «с нулевым разбегом». Подсчитать действительную потребную длину направляющих пусковой установки очень трудно; поэтому, быть может, придется вести конструирование на базе опыта проектирования установок подобного типа или на базе реальных летных испытаний, позволяющих определить влияние неоднородности воздушного потока на пуск снаряда. В последнем случае можно провести летные испытания самолета с модифицированной пусковой установкой, на которой должны быть размещены снаряды. Модификация заключается в том, что снаряд можно закреплять на пусковой установке в нескольких положениях и при этом измерять силы и моменты, действующие на снаряд в целом в каждом из положений (перед пуском в различные моменты движения по направляющим, а если возможно, и после схода с них).

Так как наш гипотетический снаряд имеет радиолокационную систему самонаведения, он не очень отклоняется от траектории после схода с направляющих, в силу чего длину последних нужно определять главным образом исходя из других соображений.

В первую очередь важно установить, может ли снаряд вернуться в пусковой установке при сходе с направляющих и может ли он так отклониться от своего курса, что реактивная струя ударит в какую-либо часть самолета. Поскольку в нашем случае самолет, с которого должен производиться запуск снаряда, находится еще в стадии проектирования, необходимо оценить аэродинамические силы и моменты, действующие на снаряд при сходе с направляющих. Еще одним фактором, который нужно определить, является время, потребное для нарастания тяги после запуска двигателя до полной величины при различных температурах окружающей среды.

Эти данные послужат основой для расчета конструкции замково-стопорного механизма и, следовательно, для расчета

величины удерживающего усилия этого механизма. Решением нашей задачи могло бы служить устройство, описанное в § 3.7 и показанное на рис. 3.8.

Рассчитав или выбрав величины для различных интересующих нас факторов, т. е. значения аэродинамических сил и моментов, действующих в момент пуска, кривую изменения тяги стартового двигателя во времени, величину удерживающего усилия замково-стопорного механизма и геометрические формы пусковой установки, можно приступить к предварительному определению длины направляющих. Как уже отмечалось ранее, вычислить точно требуемую длину направляющих чрезвычайно трудно, пока не будут получены результаты летных испытаний. Это объясняется тем, что силы и моменты, действующие на снаряд при пуске, зависят отчасти от воздействия неоднородного потока в зоне сочленения крыла, пилона и снаряда, а это воздействие аналитическим путем определить невозможно. Для принятия предварительного решения о необходимой длине направляющих можно использовать данные о моментах крена, полученные при тех же испытаниях модели, которые обычно проводятся с целью определить приращение лобового сопротивления при различных положениях пусковой установки на самолете. При отсутствии данных по исследованию модели, возможно, придется произвести приближенный расчет; примерная методика такого расчета предлагается ниже.

Для предварительной оценки пригодности пусковой установки «с нулевым разбегом», необходимо провести расчеты с целью определения возможности проворачивания снаряда в установке. Примем, что максимальный момент крена, действующий на снаряд в период пуска, равен $23 \text{ фут} \cdot \text{фунт}$. Если момент инерции снаряда (рис. 3.11) при вращательном движении равен $0,33 \text{ фунт} \cdot \text{фут} \cdot \text{сек}^2$, следовательно, угловое ускорение будет равно

$$\ddot{\varphi} = \frac{23}{0,33} = 69 \frac{\text{рад}}{\text{сек}^2}.$$

Допустим, что угловое ускорение будет иметь место в течение всего отрезка времени от момента схода снаряда с пусковой установки до прохождения крылом снаряда переднего конца пусковой установки. Примем, что за этот период снаряд пройдет 5 футов, а тяга к моменту начала движения должна достигнуть 800 фунтов. Так как снаряд предназначен для использования на больших высотах, необходимо учесть, что двигатель должен работать при низких температурах, скажем, при -80° F . Эта температура является минимально допустимой рабочей температурой. Для предварительной оценки величины тяги обратимся к рис. 3.13 и предположим, что средняя ее величина во время

движения снаряда по пусковой установке будет равна 4000 фунтам. В этом случае среднее ускорение снаряда со стартовым весом в 150 фунтов будет составлять

$$a = \frac{4000}{150} = 26,7g.$$

Время, необходимое снаряду для прохождения 5 футов, будет равно

$$t = \sqrt{\frac{2s}{a}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 5}{32,2 \cdot 26,7}} = 0,108 \text{ сек.}$$

Если снаряд на этом участке неуправляем, то он повернется вокруг своей продольной оси на

$$\varphi = \frac{1}{2} \ddot{\varphi} t^2 = \frac{1}{2} \cdot 69 \cdot 0,108^2 = 0,401 \text{ рад.}$$

$$\varphi = 0,40 \cdot 57,3 = 23^\circ.$$

Это значит, что крыло снаряда в результате поворота снаряда вокруг своей продольной оси может зацепить пусковую

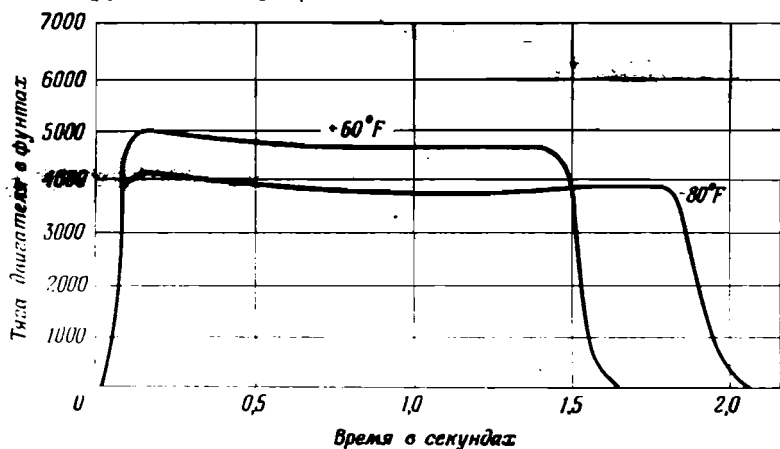


Рис. 3.13. Кривая изменения тяги во времени при двух начальных температурах гипотетического стартового двигателя.

установку, а как показано на рис. 3.14, поворот снаряда на 15° уже может привести к аварии. Нетрудно видеть, что для избежания аварии можно воспользоваться приведенным методом расчета и с его помощью установить, какая нужна длина направляющих, чтобы угол поворота снаряда относительно продольной оси не превысил 15° .

Рассмотренный нами пример расчета, очевидно, слишком элементарен и на практике потребует ряда уточнений. Так, например, для того чтобы решить, ударится ли крыло снаряда

о пусковую установку, необходимо учесть влияние моментов тангажа и рыскания в комбинации с моментом крена при пуске, а также уточнить величины сил и моментов крена, тангажа, рыскания и другие величины, необходимые для расчета. Степень, до которой должен быть уточнен расчет, зависит от того, насколько получаемые результаты близки к критическим.

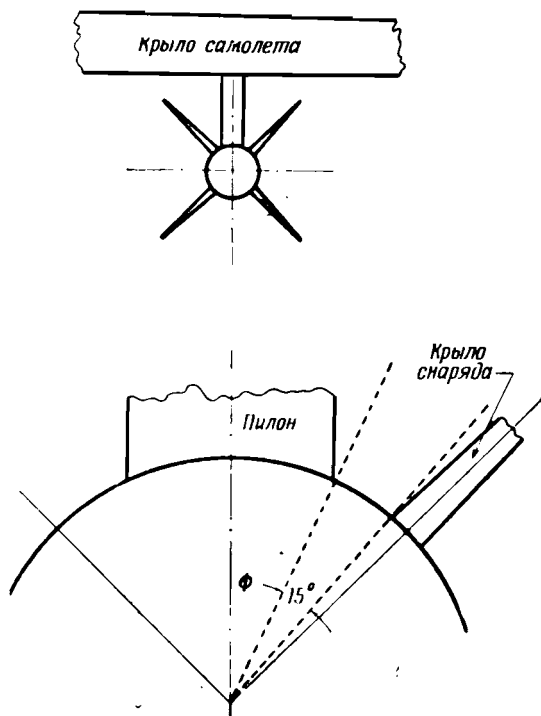


Рис. 3.14. Предельный угол поворота снаряда вокруг своей продольной оси (до удара о пусковую установку).

Прежде чем закончить рассмотрение вопроса о длине направляющих, необходимо вновь напомнить о преимуществах самолетных пусковых установок «с нулевым разбегом» и установок с направляющими. Преимущества установки «с нулевым разбегом» состоят в следующем: она прочнее, дешевле, так как не требует точной механической обработки направляющих, имеет меньший вес и проще заряжается снарядом (правда, и в конструкции пусковой установки с направляющими может быть предусмотрена специальная тележка для облегчения заряжания). Преимуществом пусковой установки с направляющими, как уже

указывалось ранее, является надежное обеспечение направления движения снаряда в наиболее опасной зоне неоднородного потока, а также то, что в момент схода с пусковой установки снаряд имеет заметное превышение скорости над скоростью самолета и поэтому быстро проходит оставшуюся часть зоны неоднородного потока, мало подвергаясь его воздействию.

Конструкция направляющих и подвески снаряда. Подвеска снаряда к пусковой установке конструктивно осуществляется с помощью фитингов, приделанных к корпусу снаряда и способных противостоять действию растягивающих, сжимающих и изгибающих усилий. Система подвески может включать в себя также боковые упоры, рассчитанные на действие сжимающих усилий. Элементы подвески могут быть выполнены в форме фиксаторов, захватов, фасонных выступов, ползунов и т. п. Условимся все их называть захватами. Конструкция с одним или двумя захватами применяется главным образом для пусковых установок «с нулевым разбегом». При использовании одного захвата необходимо иметь по крайней мере три боковых упора, а в случае двух захватов — два боковых упора. Конструкция с одним захватом часто применялась для крупных авиационных управляемых снарядов и больших грузов, подвешиваемых к самолету; немцы, например, использовали ее при запуске снаряда Фау-1 с самолета-матки. Для большинства грузов, подвешиваемых к самолету, таких, как топливные баки, бомбы, ракеты и т. п., применяется стандартный тип подвески, который обычно состоит из захватов, расположенных на расстоянии 14 или 30 дюймов друг от друга. Нетрудно представить себе, как в данном случае будут располагаться два (или более) боковых упора. Подвеска снаряда при помощи двух захватов применялась в пусковых установках с направляющими, однако следует отметить, что такая подвеска вызывает ряд трудностей, отчасти из-за необходимости применять боковые упоры, которые удерживали бы снаряд от боковых отклонений при его движении по пусковой установке.

Конструкция с тремя и четырьмя захватами применяется почти исключительно для пусковых установок с направляющими, в которых для каждого захвата имеются свои пазы или салазки. Поперечные упоры в этом случае обычно не требуются, но их можно ввести для того, чтобы снаряд не «болтался», когда он находится на пусковой установке. Преимущество подвески снаряда с помощью четырех захватов состоит в простоте конструкции и в возможности размещения электрических штепсельных разъемов и других вспомогательных соединений по всей длине пусковой установки. Кроме того, при применении четырех захватов можно сравнительно легко обеспечить сопротивление системы воздействию боковых нагрузок. При подвеске с помощью трех захватов один из них размещается впереди, что позволяет

расположить вспомогательные соединения позади этого захвата. Вместе с тем при использовании трех захватов можно уменьшить допуски на сборку системы, а следовательно, снизить себестоимость изготовления снаряда.

Конструкция захватов сама по себе проста. Для некоторых конструкций снарядов захваты должны быть убирающимися, так как если захват выступает за габариты снаряда, то это может весьма значительно увеличить лобовое сопротивление снаряда; однако незначительно выступающие захваты, расположенные на некотором удалении от носовой части снаряда, будут находиться в пограничном слое и их сопротивление будет незначительным, убирающиеся захваты могут быть выдвижными или отгибающимися; в момент схода снаряда с пусковой установки они должны быстро утапливаться внутрь корпуса. Необходимо предусмотреть простые устройства, которые удерживали бы захват в выдвинутом положении при зарядании снаряда. Конструкция пусковой установки, как правило, должна обеспечивать одновременный сход с направляющих передних и задних захватов, хотя в отдельных случаях от этого требования можно отказаться.

Для того чтобы упростить задачу юстировки направляющих, можно делать направляющие из одной заготовки или производить их монтаж на специальных приспособлениях. Наиболее трудной задачей в этом отношении является обеспечение одинаковых допусков на положение захватов на снаряде. Эту задачу можно упростить, если все захваты присоединить к одному и тому же конструктивному элементу снаряда, например к центральной литой секции.

Мы применим в нашем снаряде конструкцию подвески с тремя захватами, показанную на рис. 3.15.

Варианту конструкции с четырьмя захватами было уделено большое внимание потому, что в данном случае штепсельный разъем необходимо разместить впереди передних захватов, поскольку обычно все электрооборудование снаряда стремятся расположить в его головной части.

Однако из-за того, что при четырех захватах очень трудно с требуемой степенью точности расположить снаряд на пусковой установке, мы остановились на креплении при помощи трех захватов: впереди располагается один убирающийся захват, который движется по внутренней направляющей, а сзади — два неподвижных, которые перемещаются по внешним направляющим.

Теперь мы подошли к такой стадии разработки, когда уже можно приступить непосредственно к расчету конструкции.

Расчет конструкции. Расчет конструкции самолетной пусковой установки по существу мало чем отличается от расчета других частей самолета, и потому здесь весь анализ сводится к рассмо-

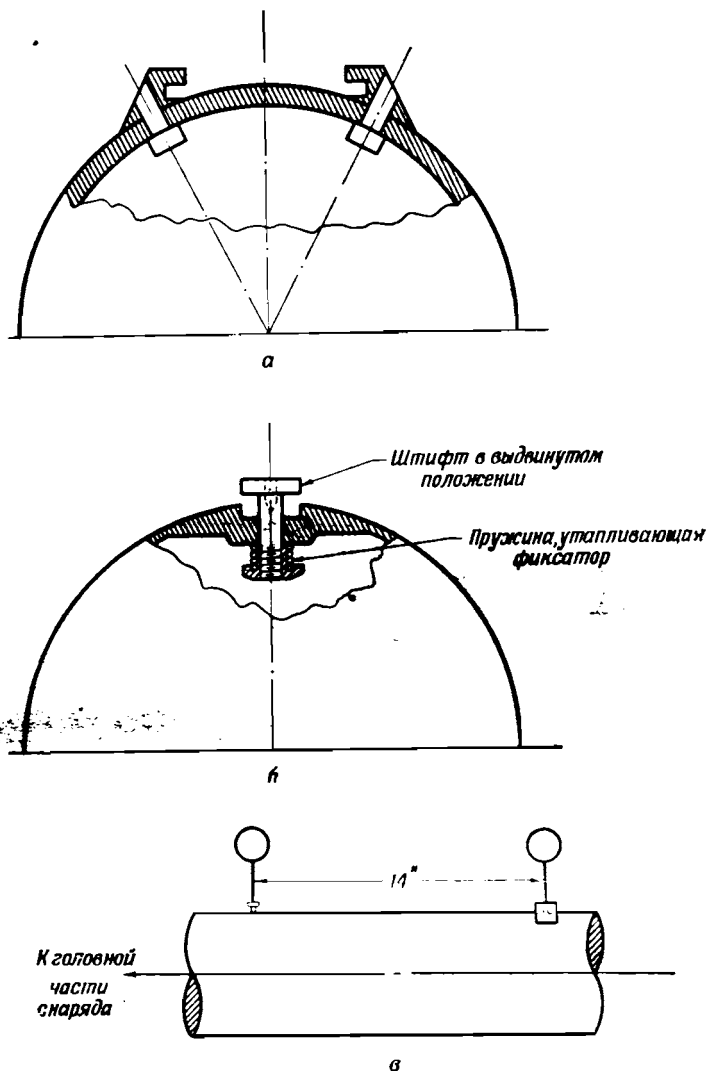


Рис. 3.15. Схема подвески при помощи трех направляющих штифтов.

а — конструкция задних направляющих штифтов; б — передний убирающийся фиксатор; в — расположение штифтов на снаряде.

трению различных условий нагружения, которые необходимо учесть, и к расчету нагрузок для данного примера.

Самолетные пусковые установки должны быть рассчитаны на все нагрузки, которые возникают как во время полета самолета-носителя до пуска снаряда, так и во время движения снаряда

по направляющим. Нагрузки, действующие на установку до пуска снаряда, могут быть или аэродинамическими, или инерционными. Во время пуска возникают дополнительные нагрузки, вызванные тягой двигателей и специфическими явлениями, связанными с пуском.

Аэродинамические нагрузки порождаются подъемной силой, силой лобового сопротивления и боковой силой, которые действуют как на снаряд, так и на пилон. (Аэродинамические силы могут также вызвать бафтинг и ударные нагрузки, которые, однако, здесь не рассматриваются.) Подсчет аэродинамических нагрузок следует производить для всех критических условий полета самолета, однако для самолетов с малой скоростью они будут весьма небольшими.

Нагрузки, которые возникают при взлете, посадке и изменении режима полета самолета, называются *инерционными*. Для палубных самолетов наиболее высокие нагрузки получают при катапультировании и посадке с аэрофинишерами. В последнем случае большие нагрузки возникают не только от того, что самолет тормозится с перегрузкой до 5 g, но и в результате ударов при касании самолетом палубы авианосца и при зацеплении троса аэрофинишера. Динамические нагрузки достигают особенно больших значений при размещении пусковой установки на крыле самолета (вследствие нежесткости крыла). Возможно, что наибольшие инерционные нагрузки связаны с выходом истребителя из пикирования с переворотом через крыло. Здесь на наружную пусковую установку действуют большие центробежные силы в стороны и вниз, и в случае расположения пусковой установки на пилоне результирующая нагрузка заставляет пилон прогибаться (как тонкую балку) и создает большие напряжения в его креплениях. При таком маневре самолета большие растягивающие усилия действуют также и на захваты снаряда.

Из вышеизложенного со всей очевидностью следует необходимость тщательной проверки конструкции крыла самолета с тем, чтобы убедиться, что оно имеет достаточный запас прочности и выдержит нагрузки, передаваемые ему пилонами пусковых установок.

Во время старта снаряда возникают дополнительные нагрузки. Они вызываются усилиями замково-стопорных механизмов, а в случае пусковой установки с направляющими — перемещением точек приложения аэродинамических и инерционных сил. Кроме того, нагрузки, возникающие при пуске снаряда, увеличиваются за счет Кориолисова ускорения, если в момент пуска самолет имеет большие скорости тангажа или рыскания. Однако Кориолисово ускорение, по-видимому, следует учитывать в очень редких случаях, так как обычно при больших угловых скоростях тангажа и рыскания запуск снаряда не производится (т. е. пред-

полагается, что в большинстве случаев маневры самолета во время пуска будут ограниченны).

Рис. 3.7, взятый из известных военных технических условий¹, показывает максимальные эксплуатационные перегрузки для креплений наружных грузов, подвешенных под крыло палубного самолета. Это нагрузки инерционные; к ним необходимо добавить аэродинамические нагрузки, полученные расчетным путем.

Технические условия дают также критерий для оценки величины аэродинамических нагрузок для случаев, когда неизвестны подходящие величины угла атаки α и угла скольжения β самолета. Так, для соответствующих точек, показанных на диаграмме аэродинамических нагрузок (рис. 3.7), можно применить следующие соотношения.

Для точек 1 и 2:

$$\alpha = 0 \quad \text{до} \quad \frac{8000}{q}, \quad \beta = \pm \frac{1500}{q}.$$

Для точек 3 и 4:

$$\alpha = 0 \quad \text{до} \quad \frac{-4800}{q}, \quad \beta = \pm \frac{1500}{q}.$$

Для точки 5:

$$\alpha = \frac{100}{\sqrt{q}} \quad \text{до} \quad \frac{-2500 + 100 \sqrt{q}}{q}, \quad \beta = \pm \frac{6000}{q}.$$

Для точки 6:

$$\alpha = 0 \quad \text{до} \quad \frac{64300 + 100 \sqrt{q}}{q}, \quad \beta = \pm \frac{6000}{q}.$$

При расчетах этих значений для каждой точки диаграммы предполагается, что снаряд может иметь установочный угол от 0 до -3° . В военных технических условиях не приводятся данные о влиянии неоднородного воздушного потока. Применение приведенных выше соотношений будет проиллюстрировано ниже.

Нагрузки, полученные в результате проводимого здесь анализа, являются *предельными нагрузками*. Военные технические условия, которые составляются в соответствии с летной практикой, указывают, что при расчетах должны применяться следующие коэффициенты запаса прочности:

Коэффициент запаса прочности по пределу текучести . . . 1,15

Максимальный запас прочности 1,50

(Следовательно, остаточная деформация не должна иметь места, если прикладываемая нагрузка на 15% превышает предельную, а если прикладываемая нагрузка выше предельной на 50%, то не должно происходить разрушения конструкции.)

¹ Military Specification, MIL-A8591A (Aer).

Теперь выведем уравнения для нагрузок, действующих на захваты в рассматриваемом нами случае. Координатные оси снаряда, направление действия сил и точки их приложения показаны на рис. 3.16. Все обозначения на рисунке соответствуют обозначениям, приведенным в начале настоящей главы. Все силы показаны действующими в положительном направлении.

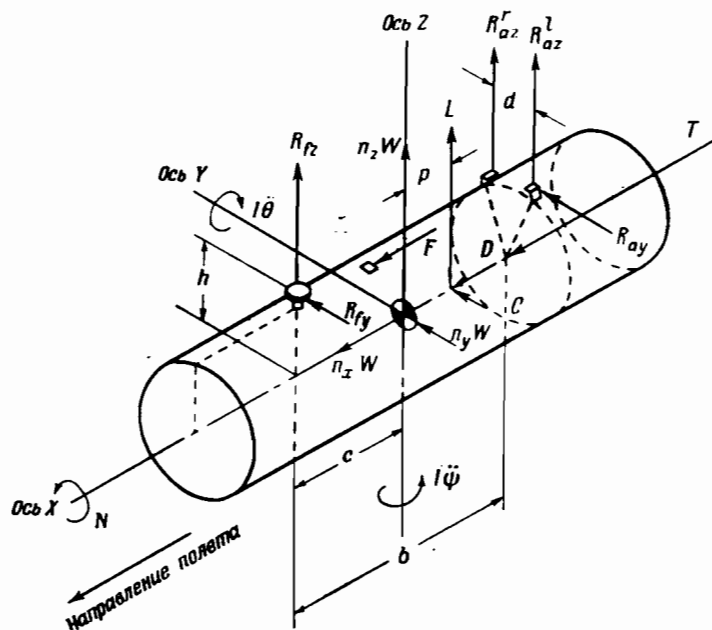


Рис. 3.16. Схема нагрузок, действующих на снаряд, и их точки приложения.

Силы D , C и L приложены в центре давления; силы $n_x W$, $n_y W$ и $n_z W$ приложены в центре тяжести; сила F приложена к стопору, расположенному на снаряде; силы R_{fx} и R_{fy} приложены к переднему захвату снаряда; силы R_{ax} , R_{az} и R_{ay} приложены к задним захватам снаряда.

Вначале найдем суммы проекций всех сил на оси x , y и z . Получим следующие уравнения:

$$\Sigma F_x = F + T + D + n_x W = 0, \quad (3.8)$$

$$\Sigma F_y = R_{fy} + R_{ay} + n_y W + C = 0, \quad (3.9)$$

$$\Sigma F_z = R_{fz} + R_{az} + R_{ax} + n_z W + L = 0. \quad (3.10)$$

Теперь, суммируя моменты относительно оси, параллельной оси x и проходящей через передний захват, получим

$$(R_{az}^l - R_{az}^r) \frac{d}{2} + N + h(n_y W + C) = 0. \quad (3.11)$$

Суммирование моментов относительно оси, параллельной оси y и проходящей через передний захват, дает

$$R_{az}^I + R_{az}^r b + c n_z W + (c + p) L + I\ddot{\theta} - h(n_z W + D + T) = 0. \quad (3.12)$$

И, наконец, суммирование моментов относительно оси z дает

$$-pC + cR_{fy} - (b - c)R_{ay} + I\ddot{\psi} = 0. \quad (3.13)$$

Решая эти уравнения относительно неизвестных, получим

$$R_{fy} = \frac{1}{b} [-h(T + D + n_x W) + I\ddot{\theta} + (c + p)L + c n_z W] - n_z W - L, \quad (3.14)$$

$$R_{az}^I = \frac{1}{2b} [h(T + D + n_x W) - I\ddot{\theta} - (c + p)L - c n_z W] - \\ - \frac{1}{d} [h(n_y W + C) + N], \quad (3.15)$$

$$R_{az}^r = \frac{1}{2b} [h(T + D + n_x W) - I\ddot{\theta} - (c + p)L - c n_z W] + \\ + \frac{1}{d} [h(n_y W + C) + N], \quad (3.16)$$

$$R_{ay} = \frac{1}{b} [I\ddot{\psi} - c n_y W - (c + p)C], \quad (3.17)$$

$$R_{fy} = \frac{1}{b} [-I\ddot{\psi} - (b - c)n_y W - (b - p + c)C], \quad (3.18)$$

$$F = [-T - D - n_x W]. \quad (3.19)$$

Теперь мы решим ряд вопросов, с которыми обычно сталкивается конструктор пусковых установок, применительно к рассматриваемому нами случаю. На графиках рис. 3.17 показаны аэродинамические коэффициенты снаряда. В реальных условиях эти коэффициенты были бы рассчитаны или получены в аэродинамической трубе, но для нашего гипотетического снаряда мы их примем готовыми.

Рассчитаем нагрузки, действующие на захваты снаряда в конкретных принятых нами условиях. Рассмотрим случай *выхода самолета из пикирования с переворотом через крыло на малой высоте в жаркий день*. Для $M=0,8$ и температуры воздуха 100° (по Фаренгейту) получим скоростной напор $q = 1020 \frac{\text{фунт}}{\text{фут}^2}$. Используя соотношение для углов атаки и скольжения из указанных военных технических условий, получим

$$\alpha = \frac{8000}{1020} = 7,8^\circ; \quad \beta = \pm \frac{1500}{1020} = 1,5^\circ.$$

Установочный угол, равный 0, выбран потому, что при угле, равном -3° , значение α будет меньше.

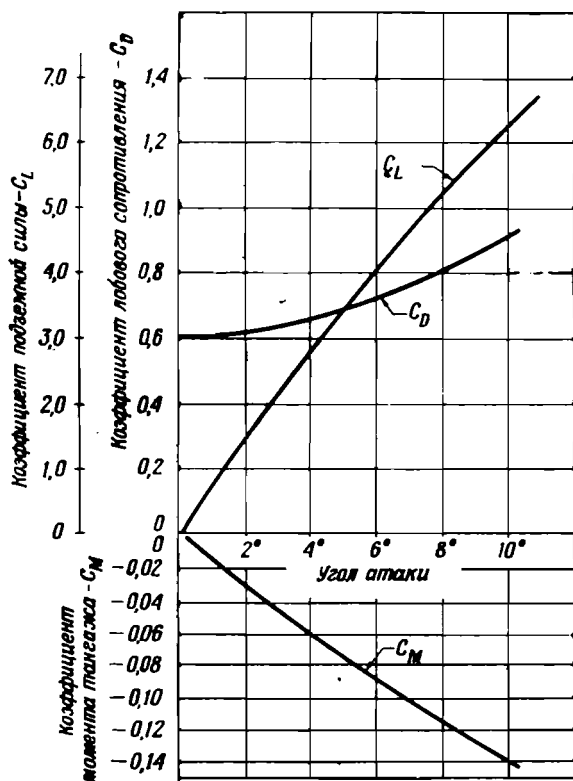


Рис. 3.17. Аэродинамические коэффициенты для гипотетического авиационного снаряда.

Тогда подъемная и боковая силы и сила лобового сопротивления, действующие на снаряд, будут равны

$$L = C_L q \pi \left(\frac{r}{12} \right)^2 = 5,05 \cdot 1020 \cdot \pi \left(\frac{3}{12} \right)^2 = 1030 \text{ фунтов,}$$

$$C = C_C q \pi \left(\frac{r}{12} \right)^2 = 1,05 \cdot 1020 \cdot \frac{\pi}{16} = \pm 210 \text{ фунтов,}$$

$$D = C_D q \pi \left(\frac{r}{12} \right)^2 = 0,79 \cdot 1020 \cdot \frac{\pi}{16} = -159 \text{ фунтов.}$$

Здесь знаки $\pm$ соответствуют направлениям сил, показанным на рис. 3.16.

Для подстановки численных значений величин, входящих в уравнения, необходимо определить также следующие величины:

$$I\ddot{\theta} = \pm 350 \cdot 6 = \pm 2100 \text{ дюйм} \cdot \text{фунт},$$

$$N = \pm 23 \cdot 12 = \pm 276 \text{ дюйм} \cdot \text{фунт}.$$

$$d = 2,24; \quad h = 3,25; \quad c = 7; \quad b = 14 \text{ дюймов}.$$

Подставив эти значения в уравнения (3.14) — (3.19), получим следующие максимальные нагрузки при выходе самолета из пикирования с переворотом через крыло:

$$R_{rz} = 686 \text{ фунтов}; \quad R_{az}^l = R_{az}^r = 1290 \text{ фунтов};$$

$$R_{ay} = \pm 220 \text{ фунтов}; \quad R_{fy} = 216 \text{ фунтов}; \quad F = 459 \text{ фунтов}.$$

При разработке реальной конструкции в дополнение к полученной нами величине момента крена N , равной 270 дюйм · фунт, необходимо провести расчет влияния неоднородного потока на снаряд.

Возникающие при посадке с аэрофинишерами максимальные нагрузки, рассчитанные в соответствии с графиками (рис. 3.7), равны

$$R_{rz} = -1890, \quad +1520; \quad R_{az}^l = R_{az}^r = -930, \quad +490;$$

$$R_{fy} = R_{ay} = 262; \quad F = -1350 \text{ фунтов}.$$

В этом случае мы пренебрегаем аэродинамическими нагрузками, так как они при посадочной скорости самолета незначительны. Если бы мы разрабатывали реальную конструкцию, то должны были бы произвести расчет нагрузок для многих других условий полета, как, например, для случая катапультирования самолета, для скоростной «бочки», кабрирования и т. п. После определения таких нагрузок для наиболее характерных случаев мы будем располагать полными данными о нагрузках; эти данные можно в дальнейшем использовать для конструирования самой пусковой установки, устройств для крепления ее к самолету, захватов снаряда и т. п.

Следует отметить, что величины F , полученные для указанных выше условий, равны силам, необходимым для удержания снаряда на пусковой установке. Следовательно, замково-стопорные механизмы должны быть рассчитаны так, чтобы они могли выдерживать нагрузку в 1350 фунтов, возникающую при посадке с аэрофинишерами. Сила T в уравнении (3.19) не равна нулю только в период действия тяги стартового двигателя вплоть до того момента, когда замково-стопорный механизм освободит снаряд.

Заключение. Хотя рассмотренные в настоящей главе примеры корабельных и самолетных пусковых установок являются в некоторых отношениях гипотетическими, они не слишком сильно отличаются от реальных образцов. Пожалуй, следует еще раз повторить, что многие упрощения при расчетах были сделаны для того, чтобы метод подхода к решению задачи стал более понятным. На протяжении всего раздела мы стремились привлечь особое внимание к ряду факторов, которые влияют на качество проектируемых пусковых установок и пусковых систем снаряда. Кроме того, мы старались подчеркнуть, что к решению проблем, связанных с пуском управляемых снарядов, следует подходить с точки зрения системы оружия в целом.

- Автопилот, влияние толчков и ударов на работу 488
- Акселерометр 374
 - интегрирующий 379
- Акустические шумы 480
- «Американское общество по исследованию операций» 40
- Амортизаторы 453
- Амплитуда вынужденных колебаний 448
- Анализ контроля качества продукции 207
 - напряжений 433
- Анизотропный боевой заряд 296, 297
- Атомный бомбардировщик, замена управляемым снарядом с атомной боевой частью 50, 57
- Аэродинамический нагрев 328
- Аэродинамическое сопротивление 446

- Базисная волна 325
- Безопасное положение предохранительного устройства 327, 328
- Безопасность в обращении снаряда 326
 - — — с предохранительным устройством 365
- Биномиальные коэффициенты, таблицы 219—235
- Биномиальный закон 212, 215, 219
- Боевой заряд 245, 247, 293
 - — аэродинамический нагрев 323
 - — вопросы организации производства систем 327
 - — зона поражения 299
 - — изотропный 295, 302, 338
 - — инициирование 294, 302
 - — испытания 416
 - — кассетный 303
 - — ослабление действия 421
 - — радиоактивный для воздушных целей 301
 - Боевой заряд радиоактивный для наземных целей 314
 - — — распространение взрыва 294
 - — — ударная волна 295
 - — — усиление действия 299
 - — — ядерный 316—320
 - Боевые заряды для поражения воздушных целей 301
 - — — — — зажигательные 307
 - — — — — кумулятивные 307
 - — — — — осколочные 305
 - — — — — фугасные 302
 - — — — — химические 308
 - — — — — наземных целей 309
 - — — — — бактериологические 313
 - — — — — для целеуказания 315
 - — — — — зажигательные 315
 - — — — — кумулятивные 312
 - — — — — осколочные 311
 - — — — — «психологические» 315
 - — — — — радиоактивные 314
 - — — — — фугасные 310
 - — — — — химические 314
 - — — — — подземных и подводных целей 316
 - Боевая пригодность оружия, определение 88
 - — — испытания 90
 - Боевые части 245
 - — административные проблемы проектирования 269
 - — взаимные помехи 388
 - — влияние контрмер противника 389
 - — необходимость для управляемого снаряда 250
 - — основные требования 258
 - — организация производства систем 321

- Боевые части, оценка и испытания 413—423
- — проектирование 378
 - — соответствие остальным элементам снаряда 388
 - — составные элементы 247
 - — тактико-технические характеристики 258
 - — условия хранения и использования 264
 - — экономические вопросы 391
- Быстродействующая электронная вычислительная машина 24
- Бюджетное бюро при президенте США 22
- «Вассерфаль» 52, 69
- Ввод снаряда на траекторию 513
- Вероятность ошибки 133
- Поражения цели комплексом управляемого снаряда 207, 263
- — — одиночной 61
 - — — полная 46—49, 52, 55, 70
 - — — при одном выстреле 187, 203
 - — — при различных видах повреждения цели 286
 - — — пролета цели 47, 60
 - — — кривые для баллистических снарядов класса «земля—земля» 59
 - — — определение 59, 62
 - — — баллистических снарядов 62
 - — — управляемого снаряда с пульсирующим двигателем 59
 - — — — — прамоточным двигателем 59
 - — — распределения по закону Пуассона 109, 114—120
 - — — уничтожения атомных бомбардировщиков 52
 - — — хотя бы одного попадания 53, 70, 263
- Вертикальный старт 468
- Взрыватели 245, 247, 248
- испытания 416
 - контактные 302, 332, 339, 340, 351
 - — принципы действия 351
 - — проблема управления взрывом при стрельбе по воздушным целям 339
 - — — — — наземным и подземным целям 340
 - — — — — надежность, повышение путем дублирования 401—411
 - — — — — уменьшения количества элементов 411
 - — — — — исконтактные 302, 332, 333, 340, 348, 352—360
- Взрыватели неконтактные, проблема управления взрывом при стрельбе по воздушным целям 340
- — — — — наземным и подземным целям 350
 - — — — — подводным целям 350
 - — — — — параллельное соединение 393
 - — — — — последовательное соединение 406
 - — — — — точность работы, дублирование 394—410
 - — — — — требования 332—335
- Вибрации 446—451
- — — — — передача элементам снаряда 451—453
 - — — — — причиняемый ущерб 450
- Виды повреждений цели 282
- Вид поражения 279
- — — — — полное отражение атаки 279
 - — — — — уничтожение 279
 - — — — — частичное отражение атаки 279
 - — — — — уничтожение 279
- Воздушные цели легче воздуха 273
- — — — — тяжелее воздуха 273
- Воздушный атомный взрыв 319—323
- Возмущающие силы, толчок при воспламенении топлива 454
- — — — — квазипостоянная тяга 454
 - — — — — колебательная составляющая тяги 454
- Войсковые испытания 89, 420
- — — — — промежуточные проблемы 89
 - — — — — материальные и людские ресурсы 89
- Вооруженные силы США, задачи армии 32, 35
- — — — — ВВС 34, 35
 - — — — — ВМС 32, 35
 - — — — — вспомогательные 35
- Воспламенители, требования 485
- Выборка 130
- Выбор целей 95
- Выход самолета из пикирования, расчет нагрузок, действующих на захваты снаряда 575
- Гармоническая возмущающая сила 449
- Гарри Ч. 187
- Гироскопы, влияние ускорений при разгоне снаряда 479
- Государственные лаборатории 28
- — — — — учреждения, занимающиеся разработкой боевых частей управляемых снарядов 257
- Группа исследования боевых действий 19

Группа по оценке систем оружия 19
Грама — Шарлье, ряд 212

Давление равновесия 459

Дальность захвата самолетного радиолокатора 171

Двигатели маршевые 455

— стартовые 455

— — на жидком топливе 459

— — — — вопросы безопасности эксплуатации 460, 499

— — — — колебания тяги 455

— — — — хранение и обращение 485

— — — — твердом топливе 456

— — — — вопросы безопасности эксплуатации 498

— — — — требования к воспламенителям 485

— — — — условные обозначения 456

— — — — характеристики 456

— — — — хранение и обращение 485

Действие ударных нагрузок на электронную аппаратуру 445

Демпфирование 447

— критическое 447

Детонатор 362

— боевого заряда 328

Детонационная цепь предохранительного устройства 362

Динамика снаряда при пуске 443

— — — — возмущающие силы 454

— — — — квазипостоянная тяга 454

— — — — — толчок при воспламенении топлива 454

— — — — влияние механизмов крепления 455

— — — — колебательная составляющая тяги 454

— — — — механические вибрации 444—453

— — — — ударные нагрузки 445

Динамическое отклонение 450

Дистанция промаха 205, 213

— — распределение вероятностей 205

Длина направляющих, определение 564—569

Доверительный уровень 188

Дриггс А. 146

Дублирование 366, 367, 391

— в проектировании взрывателей 394—401

— — — предохранительных устройств 366—369

Дублирование как средство повышения надежности взрывателя 401—411

Закон о национальной безопасности 17, 31

— Пуассона 114, 116—120

— нормальный 114, 119—130

— распределения, биномиальный 109

Замково-стопорные механизмы 539—545

— — двухступенчатые 542—545

— — корабельных пусковых установок 540

— — наземных пусковых установок 540—542

— — самолетных пусковых установок 539—545

Запуск с авианосцев 504

— корабля 501—506

— — при помощи катапульта 502

— линкоров 504

— — направляющих, преимущества 568

— — подводных лодок 504

— — снарядов с помощью основного двигателя 468

Захваты подвески 569

Зона поражения боевого заряда 299, 300

— — снаряда 252—255

— — — без боевой части 253

— — — с боевой частью 253

Изгиб, уравнение 436

Изотропный боевой заряд 295

— — с осколочными элементами 295

— — фугасный 295

Исследование операций 36, 37, 39, 40

— — математический аппарат 98

— — место в системе национальной обороны 39

— — определение 37

— — — влияние нового образца снаряда на стратегическое планирование 42

— — — необходимости разработки нового образца 40

— — — пригодности образца для боевого применения 41

— — — тактико-технических требований 40

— — отчет о результатах 37

— — применение в проектировании управляемых снарядов 37

- Механические вибрации 446
 Министерство обороны 32
 Модуль упругости 442
 Монтаж пусковых установок 501
 Морз Ф. 36, 146
 «Моффет-филд», авиабаза ВВС США 24
- Наведение 488
 — командная система 491
 — по лучу 488, 489, 491
 — чистое 488, 491
 Нагрузки, действующие на захваты, уравнивания 574
 — кратковременные 430
 — ударные 445
 — установившиеся 430
 Надежность взрывателя 208, 394—411
 Наземная пусковая установка, пример проектирования 551—557
 — — — проектирование 551
 Назначение оружия, учет при разработке тактико-технических требований 262—264
 Наиболее удобная точка подрыва боевой части 334, 335
 «Найк» 31, 507
 НАКА 24
 Напряжения, возникающие при растяжении 434
 — изгиба 435—437
 — среза 435
 Наступательный снаряд 277
 Низкая чувствительность взрывчатого вещества 327
 Необходимость разработки нового образца, определение 40, 43
 — — — для доставки атомного заряда 57
 — — — — — снарядов класса «земля—воздух» 50
 Неконтактный взрыватель 332, 340, 348, 352
 — — акустический 358
 — — барометрический 359
 — — временной 358
 — — первого типа, принципы действия 359
 — — второго типа 349, 350, 360
 — — работающий на принципе использования магнитоэлектрического эффекта 358
 — — — — — электромагнитных волн 352—357
 — — — — — электростатического эффекта 357
 Неразрыв 394—411
- Новое оружие 42, 47
 — — влияние на стратегическое планирование 42
 — — — — функции вооруженных сил страны 31
 — — противника 47, 48
 Номинальная атомная бомба 317
 Нормальная функция модуля распределения величины 124, 125, 137
 — — распределения вероятностей 117, 124—131
 Нормальное распределение, оценка параметров генеральной совокупности 132
 — — случай одной переменной 128
 — — — двух переменных 134—141
 — — — трех переменных 141—144
 — — численное соотношение между параметрами 133
 Нормальный закон 138, 212, 218
 — разрыв 394—411
- Обеспечение безопасности при обращении со снарядом 372
 Облако Вильсона 324
 Область рассеивания 251, 252
 Обнаружение цели 276
 — — истребителем 74, 78
 Оборона от одиночного самолета 34, 35, 53
 — — нападения высотных скоростных атомных бомбардировщиков 50
 Оборонительный снаряд 277, 278
 Оборудование для испытания управляемых снарядов 23
 — — обслуживания пусковой установки 550
 «Общество по исследованию операций» 40
 Огневая позиция 483
 Определение наилучших способов тактического использования комплекса управляемого снаряда 92—97
 — необходимости разработки образца 19
 Опрокидывающий момент 465
 Организация исследовательской работы в области боевых частей 267—270
 — производства систем 382—384
 — — административные проблемы 385, 386
 — — — практические проблемы в проектировании 390
 — — — технические проблемы 386, 387
 — — — экономические проблемы в проектировании 391

- Отдел исследования боевых действий 19
 Отражатель нейтронов 318
 Отражение атаки 279
 — — полное 279
 — — частичное 279
 Оценка характеристик комплекса управляемого снаряда 208
 Ошибка, абсолютная 129
 — наведения 157, 166, 171
 — стандартная 129
 — — для случая двух измерений 157—164
 — — — — — вычисления 162
 Ошибки и неудачи при пусках снарядов 482
 — управления 250
- Перехват** быстролетающих целей, влияние дальности действия самолетного локатора 164—174
 — воздушных целей 174
 — — — использование диаграмм применения 182—187
 — — — построение зон действия снаряда (для решения задач перехвата) 174—182
 Пирсон К. 210
 Плотность вероятности по закону Пуассона 120
 Повреждение цели 46, 63, 282—290, 299
 — — в момент «до атаки» 285
 — — оценка 289
 — — числовые меры эффективности 285
 Подводные лодки, использование для запуска снарядов 504, 505
 Подводный атомный взрыв 324—328
 Поздний промах 343—346
 — разрыв 394—411
 Позиции временные 507
 — постоянные 507
 — стационарные 506
 Полный импульс 458
 Последовательная цепь 411
 Потери боевые 146
 — небоевые 146, 147, 149
 Потребность в обслуживающем персонале 55
 Предохранитель 364
 — выключение 364
 Предохранительное устройство 245, 248, 249
 — — безопасное положение 249
 — — безопасность в обращении 365
 — — дублирование 366
- Предохранительное устройство
 — — обеспечение малой вероятности самопроизвольного выключения 366
 — — — примерная схема 378
 — — проблемы испытания 417
 Предохранительный механизм 371, 372
 — — первичный 371, 372
 — — вторичный 371, 372
 Преждевременный разрыв снаряда 249
 Применение пусковых установок управляемых снарядов для других видов оружия 500
 — ядерных боевых частей, недостатки 320
 Принципы работы взрывателей 247, 332, 350, 359
 Приращение скорости 374
 — расстояния 374
 Псевдоинтегрирование 377
 Прогиб балки 441
 Проектирование наземной пусковой установки, пример 551—557
 — пусковых установок 431
 — самолетной пусковой установки, пример 558—564
 — — — основные требования 513—515
 — управляемых снарядов 27
 Проектная группа, обязанности 41
 Пролет управляемых снарядов через зону ПВО 59
 — — — — — вероятность 59, 60
 Пусковой контакт 379
 Пусковые установки 464
 — — расчет на прочность 432
 — — самолетные 470—475
 — — — неподвижные 470—473
 — — — подвижные 470, 475
 — — — убирающиеся 470, 473, 474
 — — с направляющими 464
 — — — преимущества 568
 — — с нулевым разбегом 466
 Пусковые системы 431
 — — варианты снаряда типа Фау-1 461
 — — выбор 431, 534, 535
 Пуск снаряда 477—483
 — — аэродинамические коэффициенты 576
 — — вертикальный 468
 — — вибрации 480
 — — влияние ударной волны 430, 431
 — — — ускорения 478
 — — шума при работе двигателей 431

- Пуск снаряда, источники ошибок, 482, 483
 — — механический удар 478
 — — огневая позиция 483, 484
 — — оптимальные условия 487
 — — проблема борьбы с нагревом 482
 — — силы при разгоне 429
 — — с кораблей 501—506
 — — наземных стартовых позиций 506—510
 — — помощью основного двигателя 468
 — — самолета 493—500
 — — техническая позиция 483, 484
 — — требования к пусковой системе 487—493
 — — условия 477
- Радиопротиводействие, конструктивные меры борьбы 67, 389
 Разгон снаряда 429
 Разработка нового комплекса управляемого снаряда 43—64
 Разрешающая способность 66
 Ранкина — Гюгюно, уравнение 480
 Ранний промах 343
 — — анализ 344
 — — разрыв 249, 394—411
 Распределение биномиальное 109
 — нормальное 109
 — ошибок 127
 — Пуассона 109
 — случайной функции 105
 Распространение взрыва 294, 295
 Рассеивание 250
 Реактивная струя при запуске 430
 — — — эрозийное действие 481
 Реакция снаряда на аэродинамические силы 495—497
 «Регулус» 468
 Резонанс 449
 Результирующая ошибка наведения, вычисление 162
- Самолетные пусковые установки 470
 — — — использование для других видов оружия 493—500
 — — — зарядание 493
 — — — неподвижные 470, 471
 — — — «обратного пуска» 494
 — — — подвижные 470, 475, 494
 — — — расположение 593
 — — — смонтированные на крыле 495
 — — — убирающиеся 470, 473
 Самонаведение 488, 491
- Самонаводящийся снаряд, вероятность поражения 203
 Система координат 335
 — — — земная 335
 — — — использование для управления огнем 333—335, 340—343
 — — — связанная с целью 335, 336
 — — — снарядная 336
 — «снаряд + стартовый двигатель», регулировка направления силы тяги 466
 Случай двух переменных 134—141
 — — — круговое рассеивание 137—139
 — — — проблема оценки 139
 — — — эллипс рассеивания 134—137
 — — — трех переменных 141
 — — — проблема оценки 144
 — — — сферическое распределение 143
 — — — эллипсоид рассеивания 141
 Случайная функция 101
 Сопло Лавала 460
 Способ запуска, выбор 476
 — тактического использования оружия 92
 Сравнительная оценка управляемого снаряда и конкурирующей системы оружия 41
 Среднеквадратическое отклонение 402
 Стабилизация снаряда вращением 487, 488
 Стартовая позиция 68
 Стартовый двигатель 455
 — — — возможное смещение 522
 — — — допустимое смещение 521
 — — — крепление 461—463
 — — — на жидком топливе 459
 — — — твердом топливе 456
 — — — — условное обозначение 456
 — — — размещение на снаряде 526—535
 — — — регулировка направления силы тяги 520—525
 — — — хранение и эксплуатация 485
 Статическое отклонение 450
 Степень передачи колебаний 454
 — — — поражения цели, определение 276
 Стохастическая переменная 105, 106
 Стратегический анализ целей для управляемых снарядов 93
 Стрельба по воздушным целям 339, 340, 349
 — — — групповой цели 54
 — — — наземным целям 340, 350
 — — — и подземным целям 349

- Стрельба по**
— — одиночной цели 52
— — подводным целям 350
- Тактико-технические требования** 40, 65
- Тактическое использование оружия, испытания** 90
— — — — — определенное рациональных способов 92
- Температура, влияние на характеристики двигателя** 459
- Теорема Бернулли** 113
- Теоремы поражения** 299
- Теория вероятностей в исследовании операций** 99—108
— — — — — игра 146, 147
— — — — — многоэлементный бой 148—156
- Техническая осуществимость создания снарядного комплекса** 53, 62
— — — — — позиция 483
- Точка наводки** 518, 522
- Угловое ускорение, определение** 520, 521
- Угол наклона сопла** 534
- Ударная волна** 295
— — — — — в атмосфере 480
— — — — — действие при пуске снаряда 430, 481
- Удельный импульс** 458
- Удлинение балки** 440
- Управление взрывом** 336—339
— — — — — по исследованию боевых действий 19
- Управляемые снаряды, ассигнования** 22
— — — — — заключение контрактов на постройку 22
— — — — — испытания в процессе разработки 27
— — — — — класса «воздух — воздух» 34
— — — — — — — — программа испытаний для определения боевой пригодности 88
— — — — — «земля — воздух» 31—34
— — — — — — — — против высотных бомбардировщиков 48
— — — — — — — — эффективность 46
— — — — — «земля — земля» 31—33, 57
— — — — — — — — кривые вероятности пролета 59
— — — — — количество, необходимое для поражения цели 187—203
— — — — — контроль за проектированием 23
— — — — — наступательные 277
— — — — — недостатки 57
- Управляемые снаряды**
— — — — — оборонительные 277
— — — — — организация разработки 18, 19
— — — — — преимущества над самолетами авианосной авиации 30
— — — — — тактико-технические требования 21, 40, 65
— — — — — типы 30, 31
- Уравнения движения снаряда** 373, 374
- Усиление действия боевого заряда** 298
- Ускорение снаряда** 429
- Условия хранения и использования боевых частей** 264
- Уязвимость цели** 277, 290, 291
- Фау-1** 496
— — — — — запуск 461, 462
- Фау-2** 460, 466, 468, 488
- Фонд исследовательский** 22
— — — — — производственный 22
- Фугасная боевая часть** 295
- Фугасные боевые заряды для поражения воздушных целей** 302
— — — — — наземных целей 310, 311
- Функция распределения** 104
- «Хи-квадрат» критерий** 217
- Химические боевые заряды для поражения воздушных целей** 308
- Цели воздушные** 273
— — — — — действие оружия 277
— — — — — классификация 272, 273
— — — — — наземные 274
— — — — — обнаружение 276
— — — — — подземные 274
— — — — — стоимость 95
— — — — — стратегический анализ 93
- Центр тяжести** 524
— — — — — определение положения 515—520
— — — — — — — — в поперечной плоскости 518
— — — — — — — — другие методы 517
— — — — — — — — путем подвешивания 516
— — — — — — — — расчетов и взвешивания 515
- Цепная реакция** 317
- Частота колебаний демпфированных** 448
— — — — — недемпфированных 448
- Числовые меры эффективности повреждения для различных видов поражения цели** 287

- Ширина луча** 489
- Штепсельный разъем** 548—549
- — многоконтактная колодка 548, 549
- — пружинно-контактный 548, 549
- — хрупкий 548, 549
- Эйлера, уравнение** 438
- Эйнштейна, соотношение** 316
- Электродетонатор** 362
- Электрозапал** 486
- Электростатический эффект** 357
- Эмпирическая медна** 131
- Эффективная площадь цели** 251
- скорость истечения 444, 458
- Эффективность системы оружия** 24, 43, 44, 62
- — — изменение с течением времени 94
- — — противника 48, 187
- Ядерный боевой заряд** 309, 310, 316
- — — недостатки 320
- взрыв 318—320
- — реакция деления 317
- — — синтеза 318

ТАБЛИЦА ПЕРЕВОДА МЕР

Единицы длины

- 1 фут = 30,48 см; 12 дюймов
 1 дюйм = 2,54 см
 1 ярд = 91,44 см
 1 миля (английская) = 1,6 км
 1 миля (морская) = 1,85 км

Единицы веса

- 1 фунт = 453,59 г

Единицы площади

- 1 фут² = 929 см²
 1 дюйм² = 6,45 см²
 1 ярд² = 0,836 м²

Единицы объема

- 1 фут³ = 2,832 · 10⁴ см³
 1 дюйм³ = 16,39 см³
 1 ярд³ = 7,646 · 10⁵ см³

Единицы давления

- 1 фунт/фут² = 4,882 · 10⁻⁴ кг/см²
 1 фунт/дюйм² = 7,031 · 10⁻² кг/см²

Единицы плотности

- 1 фунт/фут³ = 1,602 · 10⁻² г/см³; 16,02 г/л
 1 фунт/дюйм³ = 27,67 г/см³

Единицы теплопроводности

- 1 м. т. е. (метрическая тепловая единица) = 454 кал
 1 м. т. е./дюйм² ≈ 70 кал/см²
 $^{\circ}\text{C} = \frac{5}{9} (^{\circ}\text{F} - 32^{\circ})$.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	5
Предисловие редактора американского издания	11

ЧАСТЬ I. ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЕРАЦИЙ

ГЛАВА 1

ПРОЦЕСС СОЗДАНИЯ УПРАВЛЯЕМЫХ СНАРЯДОВ

1.1. Общие положения	17
1.2. Основные обязанности вооруженных сил в области разработки управляемых снарядов	17
1.3. Основные обязанности подрядчика	25
1.4. Государственные лаборатории	28
1.5. Высшие учебные заведения	28
1.6. Заключение	29

ГЛАВА 2

ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ

2.1. Введение	30
2.2. Классификация управляемых снарядов	30
2.3. Требования со стороны вооруженных сил	31
2.4. Сущность исследования операций и область применения	36
2.5. Типовые проблемы	40
2.6. Заключение	42

ГЛАВА 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ РАЗРАБОТКИ НОВОГО КОМПЛЕКСА УПРАВЛЯЕМОГО СНАРЯДА

3.1. Введение	43
3.2. Критерий эффективности оружия	43
3.3. Последовательность изучения комплекса управляемого снаряда	46
3.4. Определение степени поражения цели	46
3.5. Новое оружие противника	47
3.6. Недостатки существующего вооружения	49
3.7. Переворот в области производства управляемых снарядов	56

ГЛАВА 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТАКТИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ

4.1. Введение	65
4.2. Тактическая обстановка	66
4.3. Определение оптимальных параметров комплекса управляемого снаряда	69
4.4. Формулирование тактико-технических требований	70
4.5. Подход к решению проблемы	72
4.6. Расчленение операций ¹ на последовательные события	73
4.7. Обнаружение цели	74
4.8. Занятие истребителем-перехватчиком исходного положения для стрельбы	79
4.9. Вероятность поражения цели	82
4.10. Потребности в боевых средствах	85
4.11. Сравнение конкурирующих систем оружия	86

ГЛАВА 5

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ БОЕВОЙ ПРИГОДНОСТИ ОРУЖИЯ И НАИЛУЧШИХ СПОСОБОВ
ЕГО ТАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ**

5.1. Введение	88
5.2. Общие положения	89
5.3. Испытания пригодности снарядов для боевого применения	90
5.4. Испытания, проводимые с целью определения тактической эффек- тивности	90
5.5. Определение наиболее рациональных способов тактического исполь- зования оружия	92
5.6. Стратегический анализ целей для управляемых снарядов	93
5.7. Изменение эффективности оружия с течением времени	94
5.8. Выбор целей	95
5.9. Способность довести операцию до конца	96

ГЛАВА 6

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПЕРАЦИЙ¹

6.1. Введение	98
6.2. Определение понятия „исследование операций“	98
6.3. Введение в теорию вероятностей	99
6.4. Случайные функции	101
6.5. Функции распределения	104
6.6. Законы распределения	109
6.7. Нормальное распределение применительно к одному, двум и трем измерениям	127
6.8. Математические основы боевых действий	145

ГЛАВА 7

**ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПЕРАЦИЙ
В ОБЛАСТИ УПРАВЛЯЕМЫХ СНАРЯДОВ**

7.1. Ошибки наведения	157
7.2. Влияние дальности действия самолетного радиолокатора на пере- хват быстролетающих целей в передней полусфере	164
7.3. Зоны действия снаряда	174

7.4. Диаграммы применения	182
7.5. Использование методов исследования операций в области тактики применения снарядов	187
7.6. Вероятность поражения при одном выстреле	203
7.7. Вероятность поражения цели комплексом управляемого снаряда	207
7.8. Применение статистических методов к исследованию операций в области комплексов управляемых снарядов	207

ЧАСТЬ II. БОЕВЫЕ ЧАСТИ

ГЛАВА 1

НАЗНАЧЕНИЕ БОЕВЫХ ЧАСТЕЙ

1.1. Введение	245
1.2. Боевой заряд	247
1.3. Взрыватель	247
1.4. Предохранительное устройство	248
1.5. Необходимость боевых частей для управляемых снарядов	250
1.6. Ошибки управления	250
1.7. Зона поражения	252

ГЛАВА 2

РАЗРАБОТКА ТАКТИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ К БОЕВЫМ ЧАСТЯМ

2.1. Введение	256
2.2. Государственные учреждения, занимающиеся разработкой боевых частей управляемых снарядов	257
2.3. Определение тактико-технических требований к боевым частям	258
2.4. Вопросы, касающиеся системы оружия	258
2.5. Вопросы, касающиеся назначения оружия	262
2.6. Вопросы, касающиеся условий хранения и использования боевых частей	264
2.7. Вопросы общего характера	265
2.8. Заключение	265

ГЛАВА 3

ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТ ПО РАЗРАБОТКЕ БОЕВЫХ ЧАСТЕЙ

3.1. Введение	267
3.2. Организация проектных работ	267
3.3. Использование достижений науки и техники	269

ГЛАВА 4

ЦЕЛИ, ИХ УЯЗВИМОСТЬ И ПОРАЖЕНИЕ

4.1. Введение	271
4.2. Классификация целей	272
4.3. Воздушные цели	273
4.4. Наземные и подземные цели	274
4.5. Обнаружение цели	276
4.6. Определение степени поражения цели	276
4.7. Виды повреждений цели	282
4.8. Уязвимость целей	290

ГЛАВА 5.

БОЕВЫЕ ЗАРЯДЫ

5.1. Введение	293
5.2. Общие соображения о боевых зарядах	293
5.3. Типичные характеристики распространения и ослабления	295
5.4. Характеристики анизотропных боевых зарядов	297
5.5. Теоремы поражения	299
5.6. Боевые заряды для поражения воздушных целей	301
5.7. Методы инициирования взрыва боевого заряда	302
5.8. Фугасные боевые заряды для поражения воздушных целей	302
5.9. Осколочные боевые заряды для поражения воздушных целей	305
5.10. Кумулятивные боевые заряды для поражения воздушных целей	307
5.11. Боевые заряды зажигательного действия для поражения воздушных целей	307
5.12. Химические боевые заряды для поражения воздушных целей	308
5.13. Боевые радиоактивные заряды для поражения воздушных целей	308
5.14. Общие замечания о боевых зарядах, используемых для поражения наземных целей	309
5.15. Фугасные боевые заряды, предназначенные для поражения наземных целей	310
5.16. Осколочные боевые заряды для поражения наземных целей	311
5.17. Кумулятивные боевые заряды для поражения наземных целей	312
5.18. Бактериологические боевые заряды для поражения наземных целей	313
5.19. Химические боевые заряды для поражения наземных целей	314
5.20. Боевые радиоактивные заряды для поражения наземных целей	314
5.21. Зажигательные боевые заряды для поражения наземных целей	315
5.22. „Психологические“ боевые заряды	315
5.23. Боевые заряды, предназначенные для целеуказания	315
5.24. Боевые заряды для поражения подземных и подводных целей	316
5.25. Ядерные боевые заряды	316
5.26. Вопросы организации производства систем применительно к боевым зарядам	321
5.27. Влияние конструкции боевого заряда на безопасность снаряда в обращении	326
5.28. Лабораторные и полигонные испытания	329

ГЛАВА 6

ВЗРЫВАТЕЛИ И ТРЕБОВАНИЯ К НИМ

6.1. Введение	332
6.2. Основная проблема управления взрывом, или проблема стрельбы	333
6.3. Выбор системы координат	335
6.4. Основная идея управления взрывом	336
6.5. Проблема управления взрывом с помощью контактного взрывателя при стрельбе по воздушным целям	339
6.6. Проблема управления взрывом с помощью контактного взрывателя при стрельбе по наземным и подземным целям	340
6.7. Проблема управления взрывом с помощью неконтактных взрывателей при стрельбе по воздушным целям	340
6.8. Система координат в плоскости встречи	343
6.9. Копланарный случай	343
6.10. Проблема управления взрывом с помощью неконтактных взрывателей при стрельбе по наземным и подземным целям	349
6.11. Проблема управления взрывом с помощью неконтактного взрывателя второго типа при стрельбе по воздушным целям	349

6.12. Проблема управления взрывом с помощью неконтактных взрывателей второго типа при стрельбе по наземным целям	350
6.13. Проблема управления взрывом с помощью неконтактных взрывателей второго типа при стрельбе по подводным целям	350
6.14. Общие замечания относительно принципов действия взрывателей	350
6.15. Принципы действия контактных взрывателей	351
6.16. Неконтактные взрыватели, работающие на принципе использования электромагнитных волн	352
6.17. Неконтактные взрыватели, работающие на принципе использования электростатического эффекта	357
6.18. Неконтактные взрыватели, работающие на принципе использования магнитостатического эффекта	358
6.19. Акустические неконтактные взрыватели	358
6.20. Временные неконтактные взрыватели	358
6.21. Принципы действия прочих неконтактных взрывателей первого типа	359
6.22. Неконтактные барометрические взрыватели	359
6.23. Принципы действия других неконтактных взрывателей второго типа	360

Г Л А В А 7

ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА И ТРЕБОВАНИЯ К НИМ

7.1. Введение	361
7.2. Требования к предохранительному устройству	361
7.3. Детонационная цепь	362
7.4. Предохранитель	364
7.5. Выключение предохранителя	364
7.6. Безопасность в обращении	365
7.7. Конструктивные методы обеспечения малой вероятности самопроизвольного выключения предохранительного устройства	366
7.8. Дублирование в предохранительных устройствах	366
7.9. Возможные схемы механизмов выключения предохранительного устройства	369
7.10. Первичные и вторичные предохранительные механизмы	371
7.11. Основные принципы обеспечения безопасности	372
7.12. Основы использования ускорения в предохранительных устройствах	373
7.13. Основные уравнения движения снаряда	373
7.14. Измерение приращений скорости и расстояния	374
7.15. Возможные случаи применения псевдоинтегрирования	377
7.16. Примерная схема предохранительного устройства	378
7.17. Вопросы производства предохранительных устройств	380

Г Л А В А 8

**НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА СИСТЕМ
ПРИМЕНИТЕЛЬНО К БОЕВЫМ ЧАСТЯМ**

8.1. Введение	382
8.2. Организация производства систем	384
8.3. Специфические административные проблемы организации производства систем в области боевых частей	384
8.4. Технические проблемы организации производства систем в области боевых частей	386
8.5. Соответствие боевой части остальным элементам комплекса управляемого снаряда	388
8.6. Взаимные помехи	388
8.7. Контрмеры	389

8.8. Практическая осуществимость проекта	390
8.9. Экономика	391
8.10. Дублирование	394
8.11. Влияние дублирования на точность работы взрывателя	401
8.12. Дополнительные замечания относительно надежности	411

ГЛАВА 9

ОЦЕНКА И ИСПЫТАНИЯ БОЕВЫХ ЧАСТЕЙ

9.1. Введение	413
9.2. Классификация испытаний	414
9.3. Проблемы испытания боевых зарядов	416
9.4. Проблемы испытания предохранительных устройств	417
9.5. Проблемы испытания взрывателей	417
9.6. Задачи, решаемые на начальном этапе летных испытаний	418
9.7. Недостатки летных испытаний, проводящихся с исследовательскими целями	419
9.8. Войсковые испытания	420
9.9. Характеристики боевых частей, определяемые во время летных испытаний	421
9.10. Проблемы анализа результатов испытаний	422

ЧАСТЬ III. ПУСК СНАРЯДОВ

ГЛАВА 1

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПУСКЕ СНАРЯДОВ

1.1. Введение	429
1.2. Общие соображения	429
1.3. Основные вопросы расчета пусковых установок на прочность	432
1.4. Основы динамики	443
1.5. Возмущающие силы при пуске и разгоне снаряда	454
1.6. Стартовые двигатели	455
1.7. Стартовые двигатели на жидком топливе	459
1.8. Крепление стартового двигателя	461
1.9. Пусковые установки для управляемых снарядов	464
1.10. Самолетные пусковые установки	470

ГЛАВА 2

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПУСКОВЫХ СИСТЕМ

2.1. Введение	476
2.2. Выбор способа запуска	476
2.3. Явления, связанные с пуском	477
2.4. Материальное обеспечение пуска	483
2.5. Требования к пусковой системе со стороны системы управления	487
2.6. Пуск с самолета	493
2.7. Пуск с корабля	501
2.8. Пуск с наземных стартовых позиций	506

Г Л А В А 3

ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

3.1. Введение	512
3.2. Основные требования	513
3.3. Определение центра тяжести	515
3.4. Регулировка направления силы тяги стартового двигателя	520
3.5. Применение стартовых двигателей	526
3.6. Отделение или сбрасывание стартового двигателя	535
3.7. Механизмы пусковой установки и вспомогательные устройства	539
3.8. Некоторые соображения о конструировании наземных пусковых установок	551
3.9. Конструирование самолетных пусковых установок	558
3.10. Дальнейшая разработка конструкции пусковой установки	564
Предметный указатель	579
Таблица перевода мер	588

Г. Мерилл
ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЕРАЦИЙ
Г. Гольдберг
БОЕВЫЕ ЧАСТИ
Р. Гельмгольц
ПУСК СНАРЯДОВ

Редактор *М. Н. Деев*
Художник *Н. А. Лилин*
Художественный редактор
В. И. Шаповалов
Технический редактор *Е. Артёмова*

Сдано в производство 6/VIII 1958 г.
Подписано к печати 22/XI 1958 г.
Бумага 60×92¹/₄. Бум. л. 18,8
Печ. л. 37,7 в т. ч. вкл. 1.
Уч.-изд. л. 36,7 Изд. № 18/3945
Цена 24 р. Зак. 3412.

ИЗДАТЕЛЬСТВО
ИНОСТРАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.
Москва, Ново-Алексеевская, 52.

Типография № 2 им. Евг. Соколовой
УПП Ленсовнархоза.
Ленинград, Измайловский пр., 29.

Статистические характеристики наиболее распространенных законов распределения

Алгебраическая запись	Обозначение	Нормальный закон	Закон Пуассона	Биномиальный закон	Кривая Пирсона I типа	Кривая Пирсона II типа	Кривая Пирсона III типа	Кривая Пирсона IV типа	Ряд Грама — Шарлье
		$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$	$\frac{\mu^n e^{-\mu}}{n!}$	$C_m^n p^n (1-p)^{m-n}$	$\frac{(m_1+m_2-1)!}{(m_1-1)!(m_2-1)!} \frac{(\mu-a_1)^{m_1-1} (\mu-a_2)^{m_2-1}}{(\mu-a_1)^{m_1+m_2-1}}$	$\frac{(2m-1)!}{[(m-1)!]^2} \frac{[(\mu-a_1)(\mu-a_2)]^{m-1}}{(\mu-a_1)^{2m-1}}$	$\frac{\gamma^m (\mu-a)^{m-1} e^{-\gamma(\mu-a)}}{(m-1)!}$	$\frac{\gamma [\gamma^2+2] [\gamma^2+4] \dots [\gamma^2+(2m)^2] \beta^{2m+1}}{2(2m)! \sin \lambda \frac{\gamma\pi}{2}} \frac{e^{-\gamma} \mu^{\frac{\pi-a}{\beta}}}{[(\mu-a)^2 + \frac{\gamma^2}{\beta^2}]^{m+1}}$	$\frac{1}{\sigma} \left[\Phi_1 \left(\frac{\mu-a}{\sigma} \right) + A_1 \Phi_1 \left(\frac{\mu-a}{\sigma} \right) + \dots + A_6 \Phi_1 \left(\frac{\mu-a}{\sigma} \right) \right]$
1-е ожидание величины μ (математическое ожидание)	$\epsilon_1(n)$	μ	μ	mp	$\frac{m_1 a_1 + m_2 a_2}{m_1 + m_2}$	$\frac{a_2 + a_1}{2}$	$\mu + \frac{m}{\gamma}$	$\mu - \frac{\beta\gamma}{2m-1}$	$\mu - \sigma A_1$
2-е ожидание величины δ (центральный момент 2-го порядка)	ϵ_2	σ^2	μ	$mp(1-p)$	$\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2 + 1} \left(\frac{a_2 - a_1}{m_1 + m_2} \right)^2$	$\frac{(a_2 - a_1)^2}{4(2m+1)}$	$\frac{m}{\gamma^2}$	$\frac{\beta^2 \gamma^2}{(2m-2)(2m-1)^2} + \frac{\beta^2}{2m-2}$	$\sigma^2 (1 + 2A_2 - A_1^2)$
3-е ожидание величины δ (центральный момент 3-го порядка)	ϵ_3	0	μ	$mp(1-p)(1-2p)$	$\frac{2m_1 m_2 (m_2 - m_1)}{(m_1 + m_2 + 2)(m_1 + m_2 + 1)} \left(\frac{a_2 - a_1}{m_1 + m_2} \right)^3$	0	$\frac{2m}{\gamma^3}$	$-\frac{4\beta^3 \gamma^3}{(2m-3)(2m-2)(2m-1)^3} - \frac{\beta^3 \gamma}{(2m-3)(2m-2)(2m-1)}$	$\sigma^3 (-6A_3 + 6A_1 A_2 - 2A_1^3)$
4-е ожидание величины δ (центральный момент 4-го порядка)	ϵ_4	$3\sigma^4$	$\mu + 3\epsilon^2$	$mp(1-p) + 3m(m-2)p^2(1-p)^2$	$\frac{3m_1^2 m_2^2 (m_1 + m_2) + 6m_1 m_2 (m_1^2 - m_1 m_2 + m_2^2)}{(m_1 + m_2 + 3)(m_1 + m_2 + 2)(m_1 + m_2 + 1)} \left(\frac{a_2 - a_1}{m_1 + m_2} \right)^4$	$\frac{3(a_2 - a_1)^4}{16(2m+3)(2m+1)}$	$3 \frac{m(m+2)}{\gamma^4}$	$\frac{3\beta^4 \gamma^4 (2m+5)}{(2m-4)(2m-3)(2m-2)(2m-1)^4} + \frac{6\beta^4 \gamma^2 (2m+1)}{(2m-4)(2m-3)(2m-2)(2m-1)^2} + \frac{3\beta^4}{(2m-4)(2m-2)}$	$\sigma^4 (3 - 6A_1^2 + 12A_2 + 24A_4 - 24A_1 A_3 + 12A_1^2 A_2 - 3A_1^4)$
Стандартное отклонение	σ	σ	$\sqrt{\frac{1}{\epsilon}}$	$\sqrt{mp(1-p)}$	$\sqrt{\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2 + 1} \left(\frac{a_2 - a_1}{m_1 + m_2} \right)^2}$	$\frac{a_2 - a_1}{2\sqrt{2m+1}}$	$\frac{\sqrt{m}}{\gamma}$	$\frac{\beta}{2m-1} \sqrt{\frac{\gamma^2 + (2m-1)^2}{2m-2}}$	$\sigma \sqrt{1 + 2A_2 - A_1^2}$
Асимметрия	$\sqrt{\beta_1}$	0	$\frac{1}{\sqrt{\epsilon}}$	$\frac{1-2p}{\sqrt{mp(1-p)}}$	$\sqrt{\frac{m_1 + m_2 + 1}{m_1 m_2} \frac{2(m_2 - m_1)}{m_1 + m_2 + 2}}$	0	$\frac{2}{\sqrt{m}}$	$-\frac{4\gamma}{2m-3} \sqrt{\frac{2m-2}{\gamma^2 + (2m-1)^2}}$	$\frac{-6A_3 + 6A_1 A_2 - 2A_1^3}{(1 + 2A_2 - A_1^2)^{3/2}}$
Экцесс	β_2	3	$3 + \frac{1}{\epsilon}$	$3 \frac{m-2}{m} + \frac{1}{mp(1-p)}$	$3 + 6 \frac{(m_1 + m_2)(m_1^2 - 3m_1 m_2 + m_2^2 + m_1 + m_2) - 6m_1 m_2}{m_1 m_2 (m_1 + m_2 + 3)(m_1 + m_2 + 2)}$	$3 - \frac{6}{2m+3}$	$3 + \frac{6}{m}$	$3 \frac{(2m+5)(2m-2)}{(2m-3)(3m-4)} - \frac{24}{\gamma^2 + (2m-1)^2} \frac{(2m-2)(2m-1)^2}{(2m-3)(2m-4)}$	$3 + 6 \frac{4A_4 - 4A_1 A_3 - 2A_2^2 + 4A_1^2 A_2 - A_1^4}{(1 + 2A_2 - A_1^2)^2}$
$3\beta_1 - 2\beta_2 + 6$	J	0	> 0	> 0	> 0	> 0	0	< 0	...
Уравнения для определения констант (постоянных)		$\mu = \bar{x}$ $\sigma = s$	$\epsilon = n$	$p = 1 - \frac{\sigma^2}{n}$ $m = \frac{n}{p}$	См. Philosophical Transactions, vol. 186, A, p. 367—371.	$2m = 3 \left(\frac{5 - \beta_2}{\beta_2 - 3} \right)$ $a_1 = \bar{x} - \sqrt{2m+1} \sigma$ $a_2 = \bar{x} + \sqrt{2m+1} \sigma$	$m = \frac{4}{\beta_1}$ $\gamma = \frac{2}{\sigma \sqrt{\beta_1}}$ $\mu = \bar{x} - \frac{2\sigma}{\sqrt{\beta_1}}$	$4m^2 \left(\beta_2 + \frac{3}{2} \beta_1 - 3 \right) - 2m(7\beta_2 - 9\beta_1 - 15) \left(12\beta_2 - \frac{27}{2} \beta_1 - 18 \right) = 0$ $\gamma^2 = \frac{(2m-1)^2 (2m-3)^2 \beta_1}{16(2m-2) - (2m-3)^2 \beta_1}$ $\beta = \frac{(2m-1)(2m-3) \sqrt{\beta_1} \sigma}{4\gamma}$ $\mu = \bar{x} - \frac{(2m-3) \sqrt{\beta_1} \sigma}{4}$	$A_1 = 0^*$ $\sigma = s$ $A_2 = 0^*$ $6A_3 = -\sqrt{\beta_1}$ $\mu = \bar{x}$ $24A_4 = \beta_2 - 3$

* Из шести постоянных $\mu, \sigma, A_1, A_2, A_3, A_4$ любые две могут быть выбраны произвольно. Выбор $A_1 = A_2 = 0$ приводит к наиболее простым уравнениям, и обычно делается именно этот выбор.