
В.М. Куприянов, Д.П. Левин, В.В. Селиванов

Основы проектирования боеприпасов



Учебник

Под редакцией В.В. Селиванова



Москва
ИЗДАТЕЛЬСТВО
МГТУ им. Н.Э. Баумана
2019

УДК 623.45
ББК 68.8
К92



Издание доступно в электронном виде по адресу
ebooks.bmstu.press/catalog/169/book1904.html

Факультет «Специальное машиностроение»
Кафедра «Высокоточные летательные аппараты»

*Рекомендовано Научно-методическим советом
МГТУ им. Н.Э. Баумана в качестве учебника*

Рецензенты:

д-р техн. наук профессор *И.О. Артамонов*
д-р техн. наук профессор *В.Е. Смирнов*

Куприянов, В. М.
К92 Основы проектирования боеприпасов : учебник / В. М. Куприянов,
Д. П. Левин, В. В. Селиванов ; под ред. В. В. Селиванова. — Москва : Изда-
тельство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. — 128, [2] с. : ил.

ISBN 978-5-7038-5001-5

Приведен комплекс основных инженерных методик, позволяющих проводить проектирование боеприпасов для ствольных артиллерийских систем (пушек, гаубиц, минометов и т. п.) с учетом всех нагрузок, действующих на боеприпасы и их элементы в процессе выстрела начиная с момента срабатывания метательного порохового заряда до момента выхода боеприпаса из канала ствола.

Содержание учебника соответствует традиционным курсам классических лекций по проектированию боеприпасов и средств поражения, читаемых авторами в МГТУ им. Н.Э. Баумана с использованием собственного практического опыта в области разработки и испытаний боеприпасов различного типа и назначения.

Для студентов вузов, обучающихся по специальности 17.05.01 «Боеприпасы и взрыватели», аспирантов, а также для научных и инженерно-технических работников отраслевых предприятий оборонно-промышленного комплекса Российской Федерации.

УДК 623.45
ББК 68.8

ISBN 978-5-7038-5001-5

© Куприянов В.М., Левин Д.П.,
Селиванов В.В., 2019
© Оформление. Издательство
МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019

Предисловие

Учебник «Основы проектирования боеприпасов» предназначен для подготовки по специальности 17.05.01 «Боеприпасы и взрыватели» гражданских и военных специалистов высшей квалификации в области проектирования боеприпасов ствольной артиллерии, используемых в различного рода военных широкомасштабных, региональных, локальных конфликтах и в контртеррористических операциях, для студентов высших учебных заведений и слушателей военных инженерных академий, обучающихся по специальностям, связанным с разработкой, испытаниями и эксплуатацией вооружений и военной техники, а также для конструкторов и технологов предприятий оборонно-промышленного комплекса, разрабатывающих и выпускающих различные типы боеприпасов с последующим сопровождением производства серийной продукции. Получение знаний, необходимых для разработки, проектирования, испытаний и эксплуатации таких боеприпасов, соответствует компетенциям в области методов расчета всех элементов указанных боеприпасов любых типов и объекта проектирования в целом.

Авторы предлагаемого учебника — преподаватели кафедры «Высокоточные летательные аппараты».

Учебник состоит из введения, семи глав, каждая из которых заканчивается перечнем вопросов для самостоятельного контроля усвоения обучающимися знаний, и небольшого списка рекомендуемой дополнительной литературы.

Во **введении** классифицированы артиллерийские (ракетные) системы, артиллерийские выстрелы, снаряды, а также сформулированы основные тактико-технические и производственно-экономические требования к разрабатываемым боеприпасам. Кроме того, приведены основные положения ГОСТ РВ 15.203—2001 на опытно-конструкторские работы, выполняемые при создании (модернизации) изделий вооружения и военной техники по тактико-техническому заданию государственного заказчика.

В **главе 1 «Баллистическое проектирование артиллерийского выстрела»** представлены необходимые элементы внутренней баллистики в совокупности с характеристиками процесса выстрела и описанием закономерностей горения метательного заряда (пороха), описана методика решения практических задач баллистического проектирования выстрелов ствольной артиллерии. Здесь же приведены соотношения для определения конструктивных параметров камеры, в которой размещается пороховой метательный заряд, в зависимости от способа заряжания.

В **главе 2 «Силы, действующие на снаряд при выстреле»** изложены материалы учебно-методического, научно-технического и справочного характера,

позволяющие провести необходимые расчеты всех сил, воздействующих на снаряд в канале ствола, что определяет систему исходных данных для оценки прочности как самого снаряда, так и его элементов в процессе нагружения при выстреле.

Основная задача **главы 3 «Ведущие устройства»** — ознакомить читателя с особенностями расчета на прочность всего спектра ведущих устройств снаряда и сформулировать необходимые условия обеспечения прочности ведущих устройств при их взаимодействии со стенками канала ствола во время выстрела.

В **главе 4 «Осколочно-фугасные и кумулятивные снаряды»** приведена классификация широкого перечня боеприпасов, в которых используются в качестве поражающих факторов осколочное, фугасное и кумулятивное действие; описана последовательность действий, которые необходимо реализовать при конструировании таких боеприпасов, и подробно изложены методы расчета на прочность корпуса снаряда и всех его элементов, подвергающихся воздействию как со стороны пороховых газов при выстреле, так и со стороны ствола орудия в процессе его взаимодействия с движущимся снарядом.

В **главе 5 «Бронебойные снаряды»** описана методика проектирования бронебойных подкалиберных снарядов к танковым пушкам и приведены все необходимые соотношения для оценки прочности сердечника бронебойного снаряда в опасных сечениях, перьев стабилизатора и баллистического наконечника, что определяет конструктивные параметры проектируемого бронебойного снаряда.

Глава 6 «Кассетные снаряды» содержит классификатор кассетных артиллерийских снарядов (КАС) в совокупности с описанием их конструктивно-компоновочных схем, а также необходимые соотношения для расчета на прочность всех узлов и элементов КАС.

В **главе 7 «Аэродинамические характеристики артиллерийских снарядов»** изложены методы расчета траектории артиллерийских снарядов, а именно методы определения их внешнебаллистических параметров после выхода из канала ствола с учетом всех сил сопротивления (трения, волнового и донного сопротивления), подъемной силы и баллистических характеристик самого боеприпаса, и приведены критериальные зависимости, необходимые для оценки устойчивости вращающихся в полете артиллерийских снарядов, стабилизируемых как вращением, так и оперением, что в значительной степени определяет точность попадания снаряда по заданной цели.

Настоящий учебник является частью общего комплекса изданий «Средства поражения и боеприпасы: физика, техника, технологии», издаваемого в МГТУ им. Н.Э. Баумана в рамках подготовки учебной литературы для студентов, обучающихся по специальности «Боеприпасы и взрыватели», специалистов смежных специальностей, а также для научных и инженерно-технических работников отрасли.

Учебник может быть использован также для освоения дисциплины «Основы проектирования боеприпасов» в рамках учебного плана основной образовательной программы по специальности «Боеприпасы и взрыватели» в МГТУ им. Н.Э. Баумана и других вузах оборонного профиля при чтении

лекций, проведении практических занятий, для самостоятельной работы студентов и особенно для курсового и дипломного проектирования.

Авторы считают своим долгом выразить признательность и благодарность начальнику научно-исследовательского расчетно-теоретического комплекса АО «НИМИ им. В.В. Бахирева» доктору технических наук профессору А.А. Платонову за конструктивные советы и полезные замечания при подготовке данного учебника.

Заведующий кафедрой «Высокоточные летательные аппараты» доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации, академик РАН

В.В. Селиванов





Список обозначений и сокращений

A	— работа расширения (сжатия) пороховых газов
$[A_T]$	— допустимая работа силы трения
A_T	— работа силы трения на всем пути движения снаряда в канале ствола орудия
$A_T^{уд}$	— работа силы трения, отнесенная к единичной площади соприкосновения выступа ведущего пояска с гранью нареза
$a_{в.п}$	— ширина ведущего пояска
$a_{дн}$	— ширина дна нареза
a_n	— ширина поля нареза
B	— баллистический параметр
$b_{а.х}$	— длина средней аэродинамической хорды
b_k	— ширина контактной площадки зубца
$b_{кр}$	— длина корневой хорды
$b_{кц}$	— длина концевой хорды
$C_{цдк}$	— коэффициент центра давления корпуса снаряда
C_x, C_y, C_z	— аэродинамические баллистические коэффициенты по осям координат
$C_{х.г.ч}$	— коэффициент сопротивления головной части
$C_{х.д.с}$	— коэффициент донного сопротивления
$C_{х.ож}$	— коэффициент волнового сопротивления оживальной головной части
$C_{х.тр}$	— коэффициент сопротивления трения корпуса
$C_{х.х.ч}$	— коэффициент сопротивления хвостовой части
c_p	— удельная теплоемкость газа при постоянном давлении
c_v	— удельная теплоемкость газа при постоянном объеме
d	— калибр
$d_{в.п}$	— диаметр ведущего пояска
$d_{д.с}$	— диаметр донной части снаряда
d_k	— диаметр каморы
$d_{к.п}$	— наружный диаметр корпуса снаряда в зоне пояска

$d_{к.с}$	— наружный диаметр корпуса снаряда в рассматриваемом сечении
$d_{к.ч}$	— диаметр конической части снаряда
d_c	— средний диаметр резьбы сердечника
$d_{с.дн}$	— диаметр ствола или ведущего пояса по дну нарезов
$d_{с.п}$	— диаметр ствола по полям нарезов
$d_{х.ч}$	— диаметр хвостовой части корпуса подкалиберного снаряда
$d_{ц.ч}$	— диаметр цилиндрической части снаряда
d_a	— внутренний диаметр оболочки
d_0	— внешний диаметр оболочки
E	— модуль упругости
E'	— модуль упрочнения
$E_{ВВ}$	— модуль упругости снаряжения (взрывчатого вещества)
E_r	— внутренняя энергия газа
E_k	— кинетическая энергия углового движения снаряда
$E_{уд}$	— удельная энергия
\bar{F}	— действительная сила осевого сжатия
$F(v)$	— функция сопротивления
F_a	— равнодействующая аэродинамических сил со стороны воздушной среды
F_b	— сила сопротивления воздуха, действующая на переднюю полноразмерную полость опорного кольцевого сектора в момент отделения от активной части снаряда
$F_{в.п}$	— центробежная сила, действующая на ведущий пояс
$F_{зб}$	— осевая сила, действующая при выстреле на зубцы гребенки всех секторов
$F_{ин}$	— осевая сила инерции
F_k	— касательная сила инерции
F_n	— сила трения от реакций граней нарезов
$F_{нар}$	— нормальное усилие грани нарезка на выступ ведущего пояса
F_o	— осевая сила
$F_{п.г}$	— сила давления пороховых газов, действующая на уменьшенную донную полость опорного кольцевого сектора
$F_{рад}$	— радиальная сила инерции
$F_{р.в.п}$	— реакция ведущего пояса в стенках корпуса снаряда
$F_{р.п}$	— сила реакции пояса на корпус снаряда при обжатии пояса в опорном конусе каморы
$F_{р.с}$	— сила реакции стенок ствола орудия на ведущий пояс
$F_{ср}$	— усилие срезания (сила среза)

F_{τ}	— сила тяжести
$F_{с.с.}$	— сила сопротивления движению снаряда
$F_{\tau, в.п.}$	— сила трения на поверхности прилегания выступа ведущего пояска к грани нареза (сила трения от реакции ведущего пояска)
$F_{цб}$	— центробежная сила
F_i	— обобщенные силы
F_X	— сила лобового сопротивления
F_Y	— подъемная сила
F_Z	— боковая сила
$f_{п}$	— сила пороха
G	— жесткость дна снаряда при изгибе
$G_{п.г.}$	— приход газов вследствие сгорания пороха
g	— ускорение силы тяжести
$H_{д}$	— прогиб дна снаряда
$H_{н}$	— прогиб наружной стенки корпуса снаряда
$H_{фл}$	— толщина фланца дна
$h_{в.п.}$	— толщина обжатого ведущего пояска
$h_{гр}$	— высота гребенки сектора
$h_{д}$	— толщина донной части корпуса снаряда
$h_{дф}$	— толщина диафрагмы
h_3	— толщина сгоревшего слоя порохового зерна (толщина горящего свода)
\bar{h}_3	— относительная толщина сгоревшего слоя зерна
$h_{3.п.}$	— половина толщины порохового зерна
$h_{к}$	— высота зубца гребенки сектора на границе контактной площадки
$h_{кан}$	— глубина кольцевой канавки под ведущий поясок
$h_{кр}$	— толщина крышки
$h_{нар}$	— глубина нарезов
h_o	— высота кумулятивной облицовки
$h_{п}$	— высота пера стабилизатора
$h_{р}$	— высота резьбы дна снаряда
$h_{стн}$	— толщина стенок корпуса снаряда
h_0	— толщина срединной поверхности стенки корпуса снаряда
$J_{и}$	— изгибающий момент ведущего пояска
$J_{опр}$	— опрокидывающий момент
$J_{п.г.}$	— импульс давления пороховых газов
$J_{с}$	— стабилизирующий момент

J_a	— осевой момент инерции снаряда
J_b	— экваториальный момент инерции снаряда
J_x, J_y, J_z	— моменты инерции снаряда относительно осей Ox , Oy и Oz
$j_{сн}$	— ускорение снаряда в рассматриваемый момент времени
j_{max}	— максимальное ускорение при выстреле
j_{ω}	— угловое ускорение снаряда при вылете из канала ствола
$K_{п.с}$	— суммарное значение коэффициента подъемной силы всего снаряда
k	— показатель адиабаты Пуассона пороховых газов
$k_{п.к}$	— коэффициент подъемной силы корпуса снаряда
$k_{п.с}$	— коэффициент подъемной силы оперения снаряда
L_k	— длина канала ствола в калибрах
$L_{нар}$	— длина нарезной части канала ствола оружия
$L_{сн}$	— длина корпуса снаряда
$L_{ств}$	— длина ствола
l	— расстояние, длина
l_v	— расстояние от точки приложения силы сопротивления воздуха до центра масс опорного кольцевого сектора
$l_{в.п}$	— расстояние от ведущего пояска до центра масс
$l_{в.у}$	— длина ведущего устройства
l_r	— расстояние между внешней поверхностью привинтной головки и резьбовым соединением на корпусе снаряда
$l_{г.ч}$	— длина головной части корпуса снаряда
$l_{к.вр}$	— длина конуса врезания
$l_{кр}$	— полуразмах крыла
$l_{к.с}$	— длина пути снаряда в канале ствола оружия
$l_{к.з.ч}$	— длина конической запоясковой части корпуса снаряда
$l_{оп}$	— ширина оперения
$l_{п}$	— расстояние между центрующим утолщением и ведущим пояском
$l_{п.г}$	— расстояние от точки приложения результирующей силы давления пороховых газов до центра масс опорного кольцевого сектора
l_p	— ширина ведущего пояска в области контакта с нарезами
$l_{р.г}$	— длина резьбы на привинтной головке
$l_{р.ч}$	— ширина ведущего пояска в области контакта с нарезами
$l_{с.в}$	— расстояние между центром массы снаряда и центром давления воздуха
$l_{х.ч}$	— длина хвостовой части корпуса снаряда
$l_{цд}$	— расстояние от центра давления воздуха до плоскости основания головной части снаряда

$l_{ц.з.ч}$	— длина цилиндрической заповяской части корпуса снаряда
$l_{цм}$	— расстояние от центра масс до плоскости основания головной части снаряда
$l_{ц.у}$	— расстояние между верхним центрующим утолщением и ведущим пояском
$l_{ц.ч}$	— длина цилиндрической части корпуса снаряда
M	— число Маха
M_x, M_y, M_z	— внешние моменты сил, возникающие при взаимодействии снаряда с атмосферой
$N_{ж}$	— условная баллистическая живучесть ствола
$N_{эб}$	— количество зубцов гребенки сектора
$N_{нар}$	— число нарезов
p	— давление
\bar{p}	— действительное радиальное давление
$\langle p \rangle$	— среднее давление пороховых газов в заснарядном пространстве
$p_{бок}$	— давление пороховых газов на боковую поверхность корпуса снаряда
p_v	— давление газов воспламенителя
$p_{вз}$	— давление продуктов срабатывания вышибного заряда
$p_{в.п(к)}$	— кольцевое давление обтюрирующего (ведущего) пояса
p_d	— давление пороховых газов на дульном срезе
$p_{д.р}$	— распределенная нагрузка на диафрагму
p_k	— давление пороховых газов в канале ствола
$p_{кр}$	— критическое давление
$p_{ос}$	— осевое давление
$p_{п.г}$	— давление пороховых газов на дно канала ствола орудия
$p_{п.г}^{расч}$	— расчетное давление пороховых газов
$p_{рад}$	— радиальное давление
$p_{с.к}$	— давление снаряжения на стенку корпуса
$p_{ср}$	— давление среды
$p_{ст}$	— давление снаряжения на дно запального стакана
$p_{ф}$	— давление форсирования
p_{max}	— максимальное давление пороховых газов
Q	— теплота газа
$Q_{п}$	— удельная теплота сгорания пороха
q	— масса снаряда
q_v	— наседающая масса снаряда выше сечения ведущего пояса

$q_{\text{ВВ(в)}}$	— масса части снаряжения, расположенной выше некоторого сечения
$q_{\text{в.п}}$	— масса ведущего пояска
$q_{\text{г.ч}}$	— масса головной части подкалиберного снаряда
$q_{\text{д}}$	— масса донной части снаряда
$q_{\text{д.д}}$	— масса деталей, опирающихся на диафрагму
$q_{\text{дт}}$	— масса детонатора
$q_{\text{дф}}$	— масса диафрагмы
$q_{\text{з.с}}$	— масса части корпуса запального стакана
$q_{\text{н}}$	— наседаящая масса снаряда
$q_{\text{отн}}$	— относительная масса снаряда
$q_{\text{п}}$	— масса части пера от края до опасного сечения
$q_{\text{с}}$	— масса сердечника
$q_{\text{х.ч}}$	— масса хвостовой части подкалиберного снаряда со стабилизатором
R	— универсальная газовая постоянная
$R_{\text{в.п}}$	— радиус срединной поверхности обжатого ведущего пояска
$R_{\text{г}}$	— внешний радиус привинтной головки
r	— радиус контура опоры
$r_{\text{г}}$	— внутренний радиус привинтной головки
$r_{\text{д}}$	— радиус основания дна каморы
$r_{\text{мид}}$	— радиус миделевого сечения
$r_{\text{сопр}}$	— радиус сопряжения боевых элементов между собой
r_0	— радиус срединной поверхности стенки корпуса снаряда
$S_{\text{в.п}}$	— площадь поперечного сечения ведущего пояска
$S_{\text{г}}$	— площадь поверхности, омываемой газами
$S_{\text{г.з}}$	— площадь текущей поверхности горения зерна
$S_{\text{г.з(0)}}$	— площадь начальной поверхности зерна
$S_{\text{д}}$	— площадь донной части снаряда
$S_{\text{кр}}$	— обтекаемая площадь стабилизатора (площадь крыла)
$S_{\text{мид}}$	— площадь миделевого сечения
$S_{\text{оп}}$	— площадь оперения
$S_{\text{п.с}}$	— площадь поперечного сечения каморы снаряда
$S_{\text{см}}$	— площадь смятия
$S_{\text{ср}}$	— площадь среза
s	— величина форсирования (обжатия диаметра ведущего пояска)
T	— температура
$T_{\text{п}}$	— температура горения пороха
$T_{\text{ств}}$	— температура внутренней поверхности канала ствола

t	— время
$t_{\text{п}}$	— время сгорания порохового зерна
u	— скорость горения пороха (топлива)
u_r	— общее перемещение наружной поверхности стенок корпуса снаряда
u_r^*	— остаточное перемещение стенок корпуса снаряда под пояском
$V_{\text{з.п}}$	— свободный объем заснарядного пространства
$V_{\text{кам}}$	— объем каморы заряжания
$V_{\text{к.з.ч}}$	— объем конической запоясковой части снаряда
$V_{\text{кн}}$	— объем канала ствола
$V_{\text{кр}}$	— объем крышки
$V_{\text{п.ч}}$	— объем поясковой части снаряда
$V_{\text{уд}}$	— удельный объем
$V_{\text{ц.з.ч}}$	— объем цилиндрической запоясковой части снаряда
$V_{\text{ц.ч}}$	— объем цилиндрической части каморы
V_0	— свободный объем каморы заряжания
v	— скорость
$v_{\text{д}}$	— скорость снаряда на дульном срезе (дульная скорость)
$v_{\text{пр}}$	— скорость прецессионного движения оси снаряда относительно мгновенной оси вращения
$v_{\text{сн}}$	— скорость снаряда
v_0	— начальная скорость
$W_{\text{г}}$	— коволюм
$W_{\text{кн}}$	— объем канала ствола
$W_{\text{п}}$	— объем продуктов сгорания 1 кг пороха
$x_{\text{цд}}$	— координата центра давления на оси снаряда, отсчитываемая от его носика
x_i	— обобщенные координаты
$Y_{\text{к}}$	— составляющая подъемной силы снаряда, приложенная в центре давления корпуса
$Y_{\text{оп}}$	— составляющая подъемной силы снаряда, приложенная в центре давления оперения
Z	— шаг резьбы
α	— угол атаки
$\alpha_{\text{кан}}$	— угол наклона торца канавки
$\alpha_{\text{к.н}}$	— конечный угол наклона нарезов

- $\alpha_{к.с}$ — угол опорного конуса каморы ствола
- $\alpha_{нар}$ — угол наклона нарезов ствола орудия
- $\alpha_{н.н}$ — начальный угол наклона нарезов
- $\beta_{в.п}$ — угол передней грани ведущего пояска
- β_{01}° — угол при вершине головной части
- β_{02}° — угол сужения хвостовой части
- $\Delta_{к}$ — диаметральный зазор между корпусом снаряда и стенками ствола
- $\Delta_{нар}$ — глубина нарезов
- δ — угол нутации
- δ_3 — толщина слоя порохового заряда
- δ_o — толщина облицовки
- $\delta_{п}$ — толщина сечения пера стабилизатора
- ε' — деформационный предел пропорциональности
- $\varepsilon_{ВВ, r}$ — радиальная деформация снаряжения (взрывчатого вещества)
- $\varepsilon_{т}$ — относительная деформация, соответствующая пределу текучести материала
- $\zeta_{в.п}$ — коэффициент трения металла ведущего пояска о поверхность канала ствола орудия
- $\zeta_{в.п.к}$ — коэффициент, определяющий влияние конструктивных характеристик ведущего пояска и опорного конуса каморы ствола, а также условия контакта ведущего пояска на изменение давления p газов
- $\zeta_{вяз}$ — динамическая вязкость воздуха
- $\zeta_{гир}$ — коэффициент гироскопической устойчивости
- $\zeta_{д}$ — коэффициент влияния близости дна
- $\zeta_{зап}$ — плотность заполнения корпуса кассетного артиллерийского снаряда боевыми элементами
- $\zeta_{ин}$ — коэффициент инерции снаряда
- $\zeta_{опр}$ — коэффициент опрокидывающего момента
- $\zeta_{пер}$ — коэффициент перегрузки
- $\zeta_{раб}$ — коэффициент, учитывающий влияние второстепенных работ
- $\zeta_{раз}$ — коэффициент разупрочнения материала корпуса снаряда
- $\zeta_{св}$ — коэффициент, характеризующий связь между стенками корпуса и дном снаряда
- $\zeta_{фик}$ — коэффициент фиктивной массы снаряда
- $\zeta_{ф.с}$ — коэффициент формы снаряда
- $\zeta_{ц.в}$ — коэффициент центробежной взводимости

ζ_{ε}	— коэффициент запаса прочности по деформации
ζ_{σ}	— коэффициент запаса прочности по напряжению
η	— длина хода нарезов в калибрах
η_3	— коэффициент заполнения индикаторной диаграммы
Θ	— жесткость корпуса снаряда
θ	— угол наклона траектории к горизонту
θ_0	— угол бросания
ϑ	— коэффициент инерции снаряда
Λ	— плотность заряжания
$\lambda_{г.ч}$	— удлинение головной части снаряда
λ_{κ}	— удлинение всего корпуса снаряда
$\lambda_{оп}$	— удлинение оперения
μ	— коэффициент Пуассона
μ_{BB}	— коэффициент Пуассона снаряжения (взрывчатого вещества)
$\dot{\nu}_{пр}$	— угловая скорость прецессионного движения
$\xi_{ст}$	— запас статической устойчивости
$\rho_{\text{в}}$	— плотность воздуха
ρ_{BB}	— плотность взрывчатого вещества
$\rho_{\text{в.п}}$	— плотность металла ведущего пояса
$\rho_{\text{д}}$	— плотность материала донной части снаряда
$\rho_{\text{п}}$	— плотность пороха
$\rho_{\text{п.г}}$	— плотность продуктов горения пороха
$[\sigma]$	— допустимое напряжение
$\sigma_{BBx}, \sigma_{BBr}, \sigma_{BBt}$	— напряжения по главным осям деформации
$\sigma_{\text{в.п}}$	— напряжение в выступе ведущего пояса
$\sigma_{\text{в.п(к)}}$	— нагрузка на единицу площади контактной поверхности ведущего пояса
$\sigma_{\text{и}}$	— напряжение изгиба
$\sigma_{\text{кр}}$	— критическое напряжение
$\sigma_{\text{р}}$	— растягивающее напряжение
$\sigma_{\text{сж}}$	— сжимающее напряжение
$\sigma_{\text{см}}$	— напряжение смятия
$\sigma_{\text{ср}}$	— напряжение среза

σ_T	— предел текучести
σ_z	— осевое напряжение
$\sigma_{0,2}$	— условный предел текучести
$[\tau]$	— допустимое напряжение сдвига (среза)
τ_{cp}	— напряжение сдвига (среза)
Ψ	— угловое перемещение снаряда за время движения
Ψ_p	— угол скоса резьбы опорной поверхности зубца гребенки
Ω	— угловая скорость вращения снаряда
Ω_0	— угловая скорость вращения снаряда при вылете из канала ствола
ω	— масса порохового заряда
ω_r	— масса произвольного количества газов от сгоревшего порохового заряда
ω_{cr}	— масса сгоревшего порохового заряда
$\bar{\omega}_{cr}$	— относительная масса сгоревшего порохового заряда

БМП	— боевая машина пехоты
БП	— боеприпасы
БТР	— бронетранспортер
БЭ	— боевой элемент
ВВ	— взрывчатое вещество
ВЗ	— вышибной заряд
ВТ	— военная техника
ВУ	— взрывательное устройство
ГПЭ	— готовые поражающие элементы
КАС	— кассетный артиллерийский снаряд
КОБЭ	— кумулятивно-осколочный боевой элемент
ОБЭ	— осколочный боевой элемент
ОКР	— опытно-конструкторская работа
ОФС	— осколочно-фугасный снаряд
ОШС	— осколочно-шрапнельный снаряд
РСЗО	— реактивные системы залпового огня
САУ	— самоходная артиллерийская установка
СЧ ОКР	— составная часть опытно-конструкторской работы
ЦД	— центр давления
ЦМ	— центр масс
ЦТ	— центр тяжести



Определим **боеприпасы** (БП) как расходующую часть комплекса вооружения, предназначенную для решения различных боевых задач, которые можно подразделить на три класса:

1) *основные* — поражение, разрушение, уничтожение, подавление объектов и живой силы противника;

2) *специальные* — освещение, задымление, целеуказание, создание электромагнитных или иных помех и т. п.;

3) *вспомогательные* — имитация, обучение, тренировки и др.

При этом основным классификационным признаком БП является однократность их использования.

В соответствии со способом доставки БП к цели или их установки в районе возможного расположения целей (минирования) можно выделить следующие типы:

- БП ствольной артиллерии — артиллерийские и минометные выстрелы;

- БП реактивных систем залпового огня (РСЗО);

- гранатометные выстрелы;

- боевые ракеты всех видов — тактические, оперативно-тактические, зенитные управляемые, противотанковые управляемые, авиационные управляемые и неуправляемые, торпеды и др.;

- авиационные и глубинные бомбы;

- БП к различным гранатометам;

- ручные гранаты;

- инженерные и морские мины, подрывные заряды и заряды разминирования;

- патроны стрелкового оружия.

Средствами поражения будем называть технические устройства, осуществляющие непосредственное действие по цели и являющиеся, как правило, составной частью БП. Дело в том, что управляемые и неуправляемые ракеты, гранатометные выстрелы, а также торпеды в подавляющем большинстве сами по себе не являются средствами поражения и должны быть оснащены боевой частью, обладающей конкретным поражающим действием (осколочным, кумулятивным, фугасным, зажигательным и др.).

Иногда трудно выделить средства поражения в составе некоторых БП (например, в большинстве инженерных БП, авиабомб, ручных гранат и пр.).

Для решения основной боевой задачи — поражения различных целей — необходима энергия, по типу источника которой можно выделить три основных класса средств поражения:

1) с запасенной *химической энергией*, выделяемой при взрыве или горении какого-либо энергетического материала — взрывчатого вещества (ВВ), пороха (твердое ракетное топливо), топливно-воздушной смеси, термобарической смеси или активной оболочки, представляющей собой смесь алюминиевого порошка с полимерной связкой, диспергирующуюся при взрыве и перемешивающуюся с воздухом, что при последующей реакции алюминия с кислородом воздуха усиливает действие по цели;

2) с запасенной *кинетической энергией*, которая сообщается средству поражения либо при метании из ствольных систем, либо при срабатывании реактивного двигателя, либо при взрыве заряда ВВ;

3) с *комбинированными источниками энергии*. В этом случае поражение цели осуществляется как за счет запасенной кинетической энергии (пробитие защитной преграды), так и за счет выделения химической энергии (взрыв вкладного заряда ВВ, срабатывание механоактивированной реакционноспособной смеси) за преградой. По такому принципу действуют, например, средства поражения осколочно-фугасного действия (боевые части противокорабельных ракет).

По виду действия можно выделить средства поражения *фугасного, осколочного, кумулятивного, зажигательного, комбинированного* (осколочно-фугасные, фугасно-кумулятивные, осколочно-стержневые и т. п.) и *ударно-проникающего* действия.

По взаимосвязи основных элементов средств поражения различают:

- *боевые части* (вкладные, несущие, пристыковываемые, отделяемые, неотделяемые);
- *артиллерийские выстрелы* (унитарного заряжания калибром $d \leq 122$ мм, раздельно-гильзового заряжания калибром $d \leq 154,4$ мм, картузного заряжания калибром $d > 152,4$ мм).

По способу адаптации к условиям встречи с целью можно выделить *неуправляемые, управляемые и корректируемые* (управляемые на конечном участке траектории) средства поражения.

Классификация боеприпасов и средств поражения возможна также в соответствии с их принадлежностью к тому или иному комплексу вооружения.

В настоящем учебнике понятие «*артиллерийские боеприпасы*» включает в себя широкий круг элементов вооружения, необходимых для стрельбы из артиллерийских орудий, минометов и пусковых установок.

Любая **артиллерийская (ракетная) система** состоит из трех главных элементов:

- 1) орудия или пусковой установки;
- 2) снаряда;
- 3) боевого заряда.

Орудие (пусковая установка) предназначено для обеспечения метания (пуска) снаряда и сообщения ему правильного полета в требуемом направлении. *Снаряд* служит для непосредственного поражения цели. *Боевой (пороховой) заряд* сообщает снаряду необходимую скорость, обеспечивающую заданную дальность стрельбы.

Под **артиллерийским выстрелом**, в отличие от выстрела как явления, понимается *совокупность элементов*, необходимых для производства одного выстрела из орудия (миномета).

В состав боевого артиллерийского выстрела в различных сочетаниях могут входить следующие элементы:

- 1) снаряд с соответствующим снаряжением;
- 2) взрыватель или трубка;
- 3) боевой (пороховой) заряд;
- 4) гильза или картуз;
- 5) средство воспламенения боевого заряда;
- 6) вспомогательные элементы к боевому заряду (воспламенитель, пламегаситель, размеднитель, флегматизатор, фиксирующее и герметизирующее устройства).

Первые пять элементов являются обязательными для большинства боевых артиллерийских выстрелов. Исключение составляют лишь выстрелы с бронебойными снарядами без разрывного заряда, в комплект которых не входит трубка или взрыватель.

Наличие вспомогательных элементов боевого заряда в составе выстрела определяется калибром, назначением, типом выстрела и условиями стрельбы. Большинство из них, как правило, является составной частью только боевых зарядов артиллерийских выстрелов.

Артиллерийские выстрелы классифицируют по назначению, способу заряжания и степени готовности к боевому использованию.

По назначению различают следующие выстрелы:

- *боевые* — для боевых стрельб. Из определенного сочетания выстрелов различного назначения составляют боевые комплекты орудий;
- *практические* — для учебно-боевых стрельб, при проведении которых разрушающее и поражающее действие снарядов у цели не имеет особого значения. В практических выстрелах используют снаряды с инертным снаряжением;
- *холостые* — для имитации боевой стрельбы на учениях, для сигналов и салютов. Холостой выстрел состоит из порохового заряда, гильзы, пыжа и средств воспламенения;
- *учебные* — для обучения орудийного расчета действиям при орудии, обращению с выстрелами, составлению боевых зарядов, приемам заряжания и разряжания орудия и производству выстрела из орудия. Учебные выстрелы состоят из деталей, имитирующих боевые элементы, или охлажденных элементов боевых выстрелов;
- *специальные* — для опытных стрельб на полигонах. Они отличаются от боевых выстрелов устройством снарядов и боевых зарядов.

По способу заряжания различают артиллерийские боевые выстрелы *патронного* (унитарные патроны), *раздельно-гильзового* и *раздельно-картузного* заряжания.

По степени готовности к боевому использованию различают следующие артиллерийские выстрелы:

- *готовые* — все выстрелы, собранные из полного комплекта установленных элементов и, следовательно, совершенно подготовленные к стрельбе;
- *полные* — все компактные, но не собранные выстрелы, элементы которых хранятся раздельно на одном складе.

В войска артиллерийские выстрелы поставляют только готовыми, со снарядами в окончательно или неокончательно снаряженном виде.

Основным элементом выстрела является **артиллерийский снаряд**, который служит для подавления и уничтожения живой силы и огневых средств противника, поражения бронированных (танки), легкобронированных (БТР, БМП) и других бронещелей, разрушения оборонительных сооружений, подавления артиллерийских и минометных батарей и для выполнения других огневых задач, решаемых артиллерией.

Снаряды классифицируют по назначению, калибру, отношению калибра снаряда к калибру орудия, наружному очертанию и способу стабилизации в полете.

По назначению различают снаряды:

- *основного назначения* — для непосредственного уничтожения, подавления и разрушения различных целей. К снарядам этой группы относятся осколочные, фугасные, осколочно-фугасные, бронебойные, бронебойно-трассирующие, кумулятивные, бетонобойные, зажигательные и др.;
- *вспомогательного назначения* — для боевой подготовки войск и проведения различных полигонных испытаний. К снарядам этой группы относятся практические, учебные, лафетопробные, плитопробные и др.;
- *специального назначения* — для решения задач по освещению местности, занятой противником, его ослеплению, для пристрелки и целеуказания. К снарядам этой группы относятся осветительные, дымовые, пристрелочно-целеуказательные и агитационные.

По калибру различают снаряды *малых калибров* (менее 57 мм), *средних калибров* (наземной артиллерии от 57 до 155 мм, зенитной — до 100 мм включительно) и *крупных калибров* (наземной артиллерии более 155 мм, зенитной — более 100 мм).

По отношению калибра снаряда к калибру орудия, для которого он предназначается, различают калиберные и подкалиберные снаряды.

К *калиберным* относится большая часть современных снарядов, диаметр которых равен калибру орудия.

Подкалиберные снаряды имеют диаметр поражающей части, меньший калибра орудия. Для правильного ведения по каналу ствола такой снаряд снабжается поддоном, который образует ведущую часть, соответствующую калибру орудия.

По наружному очертанию снаряды подразделяют на дальнобойные и недальнобойные. *Дальнобойные* снаряды имеют удлиненную головную часть, короткую цилиндрическую и, как правило, цилиндроконическую поясковую часть. Снаряды *недальнобойные* характеризуются короткой головной и длинной цилиндрической частью.

По способу стабилизации в полете различают вращающиеся и невращающиеся (оперенные) артиллерийские снаряды. *Вращающиеся* снаряды стабилизируются за счет придания им быстрого вращательного движения; *невращающиеся* — за счет стабилизирующих устройств в виде оперения, которые придают им устойчивость в полете.

К артиллерийским снарядам предъявляются тактико-технические и производственно-экономические требования.

Тактико-технические требования:

- **могущество снаряда** — характеризует его способность поражать цель на поле боя, определяется в зависимости от назначения и характера цели;
- **дальнобойность** (для снарядов наземной артиллерии) и **высотобойность** (для снарядов зенитной артиллерии) — определяют досягаемость цели;
- **кучность боя** — одна из определяющих боевых характеристик снарядов, от которой зависит расход снарядов и время выполнения боевой задачи;
- **безопасность при стрельбе** — предусматривает исключение преждевременных разрывов снарядов в канале ствола, перед дульным срезом и на траектории;
- **стойкость снарядов при длительном хранении** — определяется способностью снарядов длительное время сохранять свои боевые качества.

К *производственно-экономическим требованиям* относятся простота конструкции и производства, унификация снарядов и их корпусов, дешевизна и недефицитность материалов.

Унификация снарядов различного назначения и их корпусов — это возможность использования одного и того же типа снарядов для решения различных задач или одного и того же корпуса для изготовления различных снарядов.

Для создания БП проводят научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы (НИОКР).

Согласно ГОСТ РВ 15.203—2001, при создании (модернизации) изделия военной техники (ВТ) по тактико-техническому заданию государственного заказчика (заказчика) выполняют опытно-конструкторскую работу (ОКР), которая включает разработку конструкторской и технологической документации на опытный образец изделия ВТ, изготовление и испытания опытного образца (опытной партии) изделия ВТ.

Составная часть опытно-конструкторской работы (СЧ ОКР) — часть ОКР, выполняемая по техническому заданию головного исполнителя ОКР или тактико-техническому заданию заказчика с целью решения отдельных самостоятельных задач создания (модернизации) изделия ВТ (составной части изделия ВТ).

Этап (подэтап) ОКР (или *СЧ ОКР*) — совокупность работ, характеризующаяся признаками их самостоятельного целевого планирования и финансирования, направленная на получение определенных конечных результатов по разработке, проверке и подтверждению соответствия характеристик изделия ВТ (составной части изделия ВТ) установленным требованиям и подлежащая приемке заказчиком.

Образец ВТ — изделие ВТ, предназначенное для выполнения боевых задач или задач технического, тылового и других видов обеспечения войск самостоятельно или в составе комплекса (системы) ВТ.

Составная часть образца (комплекса, системы) ВТ — самостоятельная часть изделия ВТ, предназначенная для выполнения определенных технических функций в составе образца (комплекса, системы) ВТ, представляющая собой совокупность сборочных единиц и (или) деталей, объединенных общим конструктивным (схемным) решением.

Комплектуемое изделие межотраслевого применения — изделие ВТ, предназначенное для выполнения определенных технических функций в составе изделий ВТ или их составных частей, создаваемое не для конкретного изделия ВТ по самостоятельным комплектам конструкторской и технологической документации и не подвергаемое изменениям в процессе создания изделия ВТ, в котором его применяют.

Опытный образец изделия ВТ — изделие ВТ, изготовленное в ходе выполнения ОКР по вновь разработанной рабочей конструкторской и технологической документации для проверки путем испытаний соответствия его параметров и характеристик требованиям тактико-технического (или технического) задания на ОКР и правильности принятых технических решений, а также для решения вопроса о возможности принятия изделия ВТ на вооружение (снабжение, эксплуатация, использование по назначению) и постановки на производство.

Макет — упрощенное воспроизведение в определенном масштабе изделия ВТ или его составной части, на котором исследуются отдельные характеристики изделия, а также оценивается правильность принятых технических и конструктивных решений.

Модель — изделие, воспроизводящее или имитирующее конкретные свойства создаваемого изделия или его составной части и изготовленное для проверки принципа их действия и определения отдельных характеристик.

Тактико-техническое задание на выполнение ОКР (или СЧ ОКР) — исходный технический документ, утверждаемый заказчиком ОКР (или СЧ ОКР) и устанавливающий комплекс тактико-технических требований к создаваемому изделию ВТ, а также требования к содержанию, объему и срокам выполнения ОКР.

Техническое задание на выполнение СЧ ОКР — исходный технический документ, утверждаемый головным исполнителем ОКР и устанавливающий комплекс технических требований к создаваемой составной части изделия ВТ, а также требования к содержанию, объему и срокам выполнения СЧ ОКР.

Государственный заказчик — федеральный орган исполнительной власти, осуществляющий заказы на разработку, производство и поставку изделий ВТ в интересах обороноспособности и безопасности Российской Федерации.

Заказчик ОКР (заказчик) — уполномоченный орган государственного заказчика, осуществляющий заказы на выполнение ОКР.

Головной исполнитель ОКР — предприятие (организация, объединение), заключившее государственный контракт с государственным заказчиком (заказчиком) на выполнение ОКР, координирующее работу исполнителей СЧ ОКР и отвечающее за выполнение ОКР в целом.

Глава 1. БАЛЛИСТИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ Артиллерийского выстрела

1.1. Прямая и обратная задачи внутренней баллистики

На этапе выполнения эскизного проекта для выстрелов реактивной и ствольной артиллерии, средств ближнего боя выбирают *баллистическое решение* — массу и объем заряда, плотность заряжания, определяющие начальную скорость полета боеприпаса. В реактивных снарядах и гранатах начальная скорость полета определяется отдельным узлом — реактивным двигателем, проектирование которого выполняют профильные специалисты на предприятиях — соисполнителях опытно-конструкторских работ. У артиллерийских выстрелов из-за больших перегрузок в канале ствола (200...800 тыс. м/с²) баллистическое решение определяет толщину стенок корпуса осколочно-фугасных, кумулятивных и бронебойных снарядов. Для этого необходимо предварительно рассчитать параметры движения снаряда в канале ствола, описываемого законами внутренней баллистики.

Внутренняя баллистика изучает горение пороха в канале ствола и описывает движение снаряда от начала выстрела до вылета его из ствола. По результатам этих исследований устанавливают закономерности изменения во времени: давления $p(t)$ и температуры $T(t)$ пороховых газов, скорости $v(t)$ снаряда и его пути $l(t)$ (рис. 1.1).

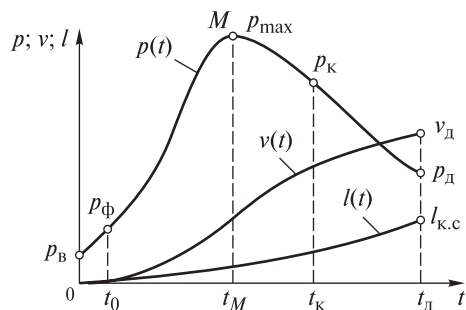


Рис. 1.1. Графики функций $p(t)$, $v(t)$ и $l(t)$:

$p_в$, $p_ф$, p_{max} , p_k , p_d — значения давления пороховых газов (воспламенителя, форсирования, максимальное, в канале ствола, на дульном срезе); v_d — скорость снаряда на дульном срезе (при выходе из канала ствола); $l_{к.с}$ — путь движения в канале ствола

Можно выделить две важные для практики задачи, решаемые в рамках внутренней баллистики:

1) определение при известных начальных условиях (система метания, параметры заряда, снаряда) основных характеристик выстрела $p(t)$, $v(t)$ и $l(t)$ (*прямая задача*);

2) определение начальных условий (параметры заряда, размеры ствола), при которых снаряд приобретает необходимую скорость (*обратная задача*).

Для описания процесса выстрела используются уравнения, характеризующие приток и расход газов, уравнения баланса энергии, уравнения движения снаряда и откатных частей.

Предварительно исследуем основные физико-химические процессы, протекающие при выстреле, и их математическое описание. Затем создадим приближенную модель выстрела, с помощью которой составим исходную систему уравнений внутренней баллистики.

1.2. Процесс выстрела артиллерийским снарядом

Начало выстрела — срабатывание капсюля-воспламенителя и зажигание воспламенителя. Воспламенитель, сгорая, создает давление газов $p_{\text{в}} \geq 50$ МПа и в течение очень малого времени воспламеняет основной заряд. Под действием возрастающего давления газов происходит врезание ведущих устройств снаряда в нарезы канала ствола. Перемещение снаряда за время врезания очень невелико, поэтому некоторый промежуток времени порох горит почти в постоянном объеме.

Одновременно с началом движения снаряда приходят в движение откатные части орудия. Далее давление газов продолжает нарастать, достигает максимального значения $p_{\text{п.г}}^{\text{max}}$, после чего уменьшается, а скорость снаряда непрерывно возрастает.

В правильно спроектированном орудии горение пороха заканчивается до вылета снаряда из канала ствола. После сгорания пороха кинетическая энергия снаряда продолжает возрастать за счет энергии, выделяемой при расширении пороховых газов. В момент вылета из канала ствола (прохождения дна снаряда или центрующего утолщения через дульный срез ствола) снаряд имеет скорость $v_{\text{д}}$ (дульная скорость). После вылета из ствола скорость снаряда еще немного возрастает до значения v_0 (начальная скорость) под действием газов, вытекающих вслед за снарядом из канала ствола. Увеличение скорости снаряда в период последствия газов примерно равно скорости отката ствола в момент вылета снаряда. Вследствие этого обычно скорость $v_{\text{д}}$ принимают за начальную скорость v_0 снаряда.

При решении задач внутренней баллистики весь процесс выстрела упрощенно разбивают на четыре периода: предварительный, первый и второй периоды движения снаряда, период последствия газов.

Предварительный период протекает от начала выстрела до полного врезания ведущей части снаряда в нарезы канала ствола. Условно считается, что порох в этот период горит в неизменном объеме. Давление газов в конце предварительного периода достигает значения $p_{\text{ф}}$, условно называемого давлением форсирования. При расчетах орудий в среднем принимается $p_{\text{ф}} \approx 30$ МПа. В гладкоствольных орудиях $p_{\text{ф}} \approx 0$.

Первый период движения снаряда по каналу ствола протекает в переменном объеме, начинается от конца предварительного периода и продолжается до полного сгорания пороха. Затем наступает *второй период движения снаряда*, который длится до момента вылета снаряда из канала ствола.

Период последствия газов протекает от момента вылета снаряда из канала ствола до прекращения воздействия газов на снаряд и систему.

1.3. Порох и закономерности его горения

Основным источником энергии в артиллерийской технике служат твердые топлива. Для ствольных систем в качестве топлива применяют, как правило, порох. Широкое распространение получили так называемые *бездымные* пороха на основе пироксилина и нитроглицерина. В меньшей мере используют *смесевые* пороха, являющиеся смесью тонко измельченного минерального окислителя и органического горючего — связки. *Дымные* пороха (механическая смесь селитры, угля и серы) применяют только в качестве воспламенителя заряда.

При выстреле давление пороховых газов достигает 400...500 МПа, а температура газов — 3000...3500 К. При этих условиях для описания связи между параметрами газа наиболее пригодно упрощенное уравнение состояния Ван-дер-Ваальса:



$$p(V_{\text{уд}} - W_{\text{г}}) = RT, \quad (1.1)$$

где p , $V_{\text{уд}}$ и T — давление, удельный объем и температура газа соответственно; $W_{\text{г}}$ — коволюм (величина, характеризующая объем молекул газа); R — универсальная газовая постоянная.

Свойства пороха как топлива характеризуются составом продуктов сгорания, удельной теплотой $Q_{\text{п}}$ сгорания, объемом $W_{\text{п}}$ газообразных продуктов, образующихся при сгорании 1 кг пороха, коволюмом $W_{\text{г}}$, температурой $T_{\text{п}}$ горения, химическим составом, а также плотностью $\rho_{\text{п.г}}$ продуктов горения пороха, формой и размерами порохового зерна.

Удельная теплота $Q_{\text{п}}$ сгорания пороха — это количество теплоты, выделяющейся при полном сгорании 1 кг пороха. Для экспериментального определения теплового эффекта сгорания в бомбе постоянного объема сжигается навеска пороха, имеющего начальную температуру 17 °С, после чего продукты сгорания охлаждаются до 17 °С в калориметрической установке.

Объем $W_{\text{п}}$ газообразных продуктов сгорания 1 кг пороха, определяемый после приведения газов к нормальным условиям (температуре 0 °С и давлению 760 мм рт. ст. при парообразной воде), зависит от природы и состава пороха, а также от условий горения.

Коволюм $W_{\text{г}}$ пороховых газов при давлении до 450...500 МПа можно принимать постоянным и равным $0,001 W_{\text{п}}$.

Температура $T_{\text{п}}$ горения пороха определяется при сгорании пороха в условиях постоянного объема и отсутствия тепловых потерь.

Химический состав продуктов сгорания зависит от рецептуры пороха и условий его сгорания. Обычно при сгорании артиллерийских порохов образуются следующие продукты горения: H_2O , H_2 , CO , CO_2 , N_2 .

Работоспособность пороха в оружии определяют **баллистические характеристики**: сила $f_{\text{п}}$ пороха, импульс $J_{\text{п.г}}$ давления пороховых газов, плотность Λ заряжания.

В общем случае сила пороха

$$f_{\text{п}} = RT_{\text{п}}. \quad (1.2)$$

Сила пороха связана с его удельной теплотой Q_n сгорания зависимостью

$$f_n = Q_n(k - 1), \quad (1.3)$$

где k — показатель адиабаты Пуассона пороховых газов.

Из опыта известно, что скорость u горения зависит от химического состава топлива, давления p окружающих газов и характера его изменения во времени, начальной температуры заряда и скорости омывающих заряд газов.

Данные о скорости u , полученные экспериментальным путем, обычно аппроксимируются более удобными для использования на практике аналитическими выражениями. В частности, применяют следующие формулы для зависимости скорости горения от давления:

$$u(p) = U_1 p \quad \text{при } 1 \leq p \leq 15 \text{ МПа};$$

$$u(p) = U_2 + U_3 p \quad \text{при } 15 \leq p \leq 30 \text{ МПа};$$

$$u(p) = \xi p \quad \text{при } p > 30 \text{ МПа},$$

где U_1, U_2, U_3, ξ — постоянные для данного топлива коэффициенты.

В стволе орудия порох горит в основном при давлении газа $p > 40 \dots 50$ МПа. Скорость u горения пороха в этих условиях изменяется почти по линейному закону:

$$u = \frac{dh_3}{dt} = \xi p, \quad (1.4)$$

где h_3 — толщина сгоревшего слоя порохового зерна.

Толщина сгоревшего слоя определяет время горения порохового элемента, который может иметь различную форму (рис. 1.2).

Параметр ξ в процессе горения несколько изменяется из-за неравномерности распределения компонентов пороха по толщине зерна (содержания летучих веществ, нитроглицерина и др.). Однако это изменение незначительно и при решении задач внутренней баллистики скорость u обычно принимают постоянной.

Скорость u горения влияет на импульс $J_{п.г}$ давления пороховых газов:

$$J_{п.г} = \int_0^{t_n} p dt = \int_0^{\delta_3} \frac{dh_3}{u} = \frac{h_{3.п}}{u}, \quad (1.5)$$

где t_n — время сгорания порохового зерна; $h_{3.п}$ — половина толщины порохового зерна.

Плотность заряжения вычисляют по формуле

$$\Lambda = \frac{\omega}{V_{кам}}, \quad (1.6)$$

где ω — масса заряда; $V_{кам}$ — объем каморы заряжения.

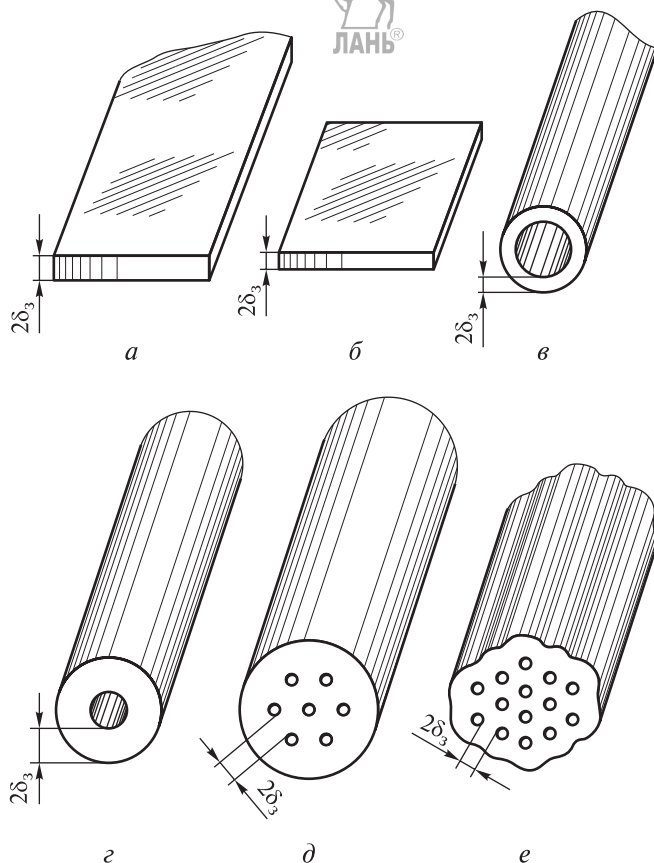


Рис. 1.2. Форма и размеры пороховых элементов
(δ_3 — толщина слоя порохового заряда):

a — лента; *б* — пластинка; *в* — трубка; *г* — одноканальное зерно, *д* — семиканальное зерно; *е* — четырнадцатиканальное зерно

Практически верхний предел плотности Λ заряжения определяется технологией сборки выстрела и варьирует в диапазоне значений 200...950 кг/м³.

Обычно принимают, что современные пороха в камере орудия горят параллельными слоями.

При давлении газов воспламенителя $p_{\text{в}} \geq 50$ МПа воспламенение заряда протекает практически мгновенно. Число зерен в заряде довольно велико. Размеры и характеристики пороховых зерен более или менее одинаковы. Значения давления газов, окружающих пороховые зерна, также одинаковы. Эти факторы предопределяют одинаковые условия горения зерен заряда и позволяют рассчитать относительную массу сгоревшей части заряда по характеристикам единичного среднего порохового зерна:



$$\bar{\omega}_{\text{сг}} = \frac{\omega_{\text{сг}}}{\omega}, \quad (1.7)$$

где $\omega_{\text{сг}}$ — масса сгоревшего порохового заряда.

Геометрический закон горения в общем случае описывается трехчленной формулой

$$\bar{\omega}(\bar{h}) = \kappa_1 \bar{h}_3 (1 + \kappa_2 \bar{h}_3 + \kappa_3 \bar{h}_3^2), \quad (1.8)$$

где $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$ — характеристики формы порохового зерна; $\bar{h}_3 = h_3 / h_{3,\text{п}}$ — относительная толщина сгоревшего заряда.

Геометрический закон горения среднего порохового зерна можно задать не только функцией $\bar{\omega}$, но и *относительной площадью $\bar{S}_{\text{г.з}}$ поверхности горения зерна*, также зависящей от относительной толщины \bar{h}_3 сгоревшего слоя зерна и характеристик его формы. По определению,

$$\bar{S}_{\text{г.з}} = \frac{S_{\text{г.з}}}{S_{\text{г.з}(0)}}, \quad (1.9)$$

где $S_{\text{г.з}}$ — площадь текущей поверхности горения зерна; $S_{\text{г.з}(0)}$ — площадь начальной поверхности горения зерна.

Найдем аналитическое выражение функции $\bar{S}_{\text{г.з}}$. Для зерна любой формы справедливо соотношение

$$\frac{d\omega_{\text{сг}}}{dt} = S_{\text{г.з}} u \rho_{\text{п}} = S_{\text{г.з}(0)} \bar{S}_{\text{г.з}} u \rho_{\text{п}}, \quad (1.10)$$

где $\rho_{\text{п}}$ — плотность пороха.

Используя формулы (1.4) и (1.10), а также условие $\bar{S}_{\text{г.з}} = 1$ при $\bar{h}_3 = 0$, после дифференцирования по \bar{h}_3 выражения (1.8) найдем κ_1 и $\bar{S}_{\text{г.з}}(\bar{h}_3)$:

$$\kappa_1 = \frac{S_{\text{г.з}(0)} \rho_{\text{п}} h_{3,\text{п}}}{\omega}; \quad \bar{S}_{\text{г.з}}(\bar{h}_3) = 1 + 2\kappa_2 \bar{h}_3 \bar{\omega}(\bar{h}_3) + 3\kappa_3 \bar{h}_3^2. \quad (1.11)$$

Выражение (1.11) описывает зависимость изменения относительной площади поверхности горения зерна от его характеристик формы в процессе горения.

1.4. Система уравнений внутренней баллистики

Прикладная термогазодинамика позволяет описать процесс выстрела в классическом артиллерийском оружии одной системой уравнений, базирующейся на единой теплофизической модели.

Исходную систему уравнений запишем при следующих допущениях:

1) прорыв пороховых газов через ведущие устройства артиллерийского снаряда отсутствует;

- 2) горение пороха происходит параллельными слоями;
- 3) давление p , температура T и плотность газопороховой смеси в заснарядном пространстве для каждого момента времени t равны их средним по объему значениям (гипотеза квазистационарности процесса);
- 4) состав продуктов сгорания не изменяется во время выстрела, а удельные теплоемкости газов $c_p = \frac{kR}{k-1}$ при постоянном давлении и $c_v = \frac{R}{k-1}$ при постоянном объеме равны их средним значениям для всего диапазона изменения температуры, следовательно, показатель адиабаты Пуассона $k = c_p/c_v = \text{const}$;
- 5) воспламенение пороховых газов происходит мгновенно;
- 6) выброс несгоревших частиц пороха отсутствует;
- 7) деформация стенок ствола и снаряда отсутствует.

При выводе системы уравнений применим основные законы термодинамики.

Уравнение первого закона термодинамики (закон сохранения энергии) запишем в форме

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{dE_r}{dt} + \frac{dA}{dt}. \quad (1.12)$$

Здесь $\frac{dQ}{dt}$ — скорость изменения теплоты Q в газе, масса которого к рассматриваемому моменту времени составит ω_r , вследствие его взаимодействия с окружающей средой; $\frac{dE_r}{dt}$ — скорость изменения внутренней энергии E_r газа, где

$$E_r = \omega_r c_v T = \frac{\omega_r RT}{k-1}; \quad (1.13)$$

$\frac{dA}{dt}$ — мощность, развиваемая газом при его расширении или сжатии.

Применительно к периоду движения снаряда при горящем заряде

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{dQ_{np}}{dt} + \frac{dQ_r}{dt}. \quad (1.14)$$

Здесь $\frac{dQ_{np}}{dt} = Q_n G_{n,r}$ — скорость подвода теплоты вследствие сгорания порохового заряда (где Q_n — удельная теплота сгорания пороха; $G_{n,r} = \frac{d\omega_{cr}}{dt}$ — приход продуктов сгорания); $\frac{dQ_r}{dt} = -\frac{\tilde{d}Q_{mn}}{dt}$ — скорость изменения теплоты вследствие теплопередачи между газами и стенками ствола (символ \tilde{d} показывает, что $\tilde{d}Q_{mn}$ не является полным дифференциалом).

Скорость отвода теплоты из заснарядного пространства в стенки канала ствола

$$\frac{dQ_{\text{тп}}}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{S_r} \zeta_{\text{т}} (T - T_{\text{стб}}) dS, \quad (1.15)$$

где S_r — площадь поверхности, омываемой газами; $\zeta_{\text{т}}$ — коэффициент теплоотдачи от газа к стенкам; $T_{\text{стб}}$ — температура внутренней поверхности канала ствола.

Точно уравнение (1.15) решается совместно с уравнением теплопроводности материала стенки при соответствующих краевых условиях.

Величина $\frac{dA}{dt}$ в общем случае выражается уравнением

$$\frac{dA}{dt} = p \frac{dV_{\text{з.п}}}{dt} = p \frac{G_{\text{п.г}}}{\rho_{\text{п}}} + p \frac{d}{dt}(Sl). \quad (1.16)$$

Здесь $V_{\text{з.п}}$ — свободный объем заснарядного пространства; $p \frac{G_{\text{п.г}}}{\rho_{\text{п}}}$ — мощность,

создаваемая газом вследствие сгорания заряда; $p \frac{d}{dt}(Sl)$ — мощность, расходуемая на поступательное движение снаряда с учетом второстепенных работ (перемещение газопороховой смеси, вращение снаряда и преодоление трения между снарядом и стенками канала ствола, перемещение откатных частей системы, выталкивание столба воздуха снарядом из канала ствола); S — площадь поперечного сечения канала ствола; l — длина пути снаряда относительно стенок канала ствола.

Мощность

$$p \frac{d}{dt}(Sl) = pSv. \quad (1.17)$$

С учетом выражений (1.14)–(1.17) закон сохранения энергии (1.12) примет следующий вид:

$$Q_{\text{п}} G_{\text{п.г}} - \frac{dQ_{\text{тп}}}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\omega_{\text{г}} RT}{k-1} \right) + p \left(\frac{G_{\text{п.г}}}{\rho_{\text{п}}} + Sv \right). \quad (1.18)$$

Соотношение (1.18) называют также *основным уравнением внутренней баллистики*.

Закон сохранения массы может быть записан в виде

$$G_{\text{п.г}} = \frac{d\omega_{\text{ср}}}{dt}. \quad (1.19)$$

Величина $\frac{d\omega_{\text{ср}}}{dt}$ характеризует скорость изменения количества газов в заснарядном пространстве.

Уравнение движения снаряда найдем из формулы (1.17). Можно показать, что второстепенные работы газа при выстреле пропорциональны основной работе на поступательное движение снаряда массой q , поэтому

$$pSv = \frac{d}{dt} \left(\frac{\zeta_{\text{фик}} q}{2} v^2 \right). \quad (1.20)$$

Коэффициент $\zeta_{\text{фик}}$ фиктивной массы снаряда, учитывающий второстепенную работу, рассчитывается по довольно сложным зависимостям. Обычно при его определении используют приближенную формулу

$$\zeta_{\text{фик}} = \zeta_{\text{раб}} + \frac{1}{3} \frac{\omega}{q}, \quad (1.21)$$

где $\zeta_{\text{раб}}$ — коэффициент, учитывающий влияние второстепенных работ; q — масса снаряда без учета ее изменения за время выстрела.

В зависимости от калибра и начальной скорости для снаряда с ведущим пояском коэффициент $\zeta_{\text{раб}} = 1,02 \dots 1,05$. С уменьшением калибра значение $\zeta_{\text{раб}}$ возрастает, а с ростом начальной скорости снаряда — уменьшается.

После дифференцирования соотношения (1.20) получим *уравнение движения снаряда* через давление пороховых газов:

$$\zeta_{\text{фик}} q \frac{dv}{dt} = pS. \quad (1.22)$$

Уравнение состояния пороховых газов в заснарядном пространстве обычно записывается в виде (1.1) или, для массы ω_r произвольного количества газов,

$$pV_{\text{з.п}} = \omega_r RT. \quad (1.23)$$

В соответствии с выражениями (1.7), (1.8) и (1.16) *свободный объем*

$$V_{\text{з.п}} = V_{\text{кам}} - \frac{\omega}{\rho_{\text{п}}} + \frac{\omega_{\text{ср}}}{\rho_{\text{п}}} - W_r \omega_r + Sl = V_{\text{кам}} - \frac{\omega}{\rho_{\text{п}}} (1 - \bar{\omega}_{\text{ср}}) - W_r \omega_r + Sl, \quad (1.24)$$

так как

$$\omega_{\text{ср}} = \int_0^t G_{\text{п.г}} dt.$$

Для решения прямой задачи внутренней баллистики должны быть известны законы скорости u горения пороха и изменения площади поверхности порохового зерна в функции толщины h_3 сгоревшего слоя зерна (или относительной толщины \bar{h}_3).

Кинематическое соотношение между изменением пути и скоростью снаряда имеет вид

$$\frac{dl}{dt} = v. \quad (1.25)$$

Изменение толщины сгоревшего слоя зерна с учетом выражений (1.4) и (1.5) можно записать следующим образом:

$$\frac{dh_3}{dt} = \frac{p}{J_{п.г}}. \quad (1.26)$$

Преобразовав выражение (1.7) с учетом (1.8), запишем уравнение массы сгоревшего пороха:

$$\omega_{сг} = \bar{\omega}_{сг}(\bar{h}_3). \quad (1.27)$$

Таким образом, система уравнений внутренней баллистики для классического артиллерийского орудия примет вид

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_{п} G_{п.г} - \frac{dQ_{тп}}{dt} = \frac{dQ}{dt} \left(\frac{\omega_r RT}{k-1} \right) + p \left(\frac{G_{п.г}}{\rho_{п}} + Sv \right); \\ \frac{dQ_{тп}}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{S_r} \zeta_r (T - T_{сгв}) dS; \\ G_{п.г} = \frac{d\omega_{сг}}{dt}; \\ \zeta_{фик} q \frac{dv}{dt} = pS; \\ pV_{3.п} = \omega_r RT; \\ V_{3.п} = V_{кам} - \frac{\omega}{\rho_{п}} (1 - \bar{\omega}_{сг}) - W_r \omega_r + Sl; \\ \frac{dl}{dt} = v; \\ \omega_{сг} = \bar{\omega}_{сг}(\bar{h}_3); \\ u = U_1 p; \\ \frac{dh_3}{dt} = \frac{p}{J_{п.г}}. \end{array} \right. \quad (1.28)$$

Система уравнений (1.28) решается численно.

1.5. Баллистическое проектирование выстрела ствольной артиллерии

Баллистическое проектирование выстрела ствольной артиллерии заключается в установлении характеристик заряда и орудия, при которых наилучшим образом (в определенном смысле) выполняются тактико-технические требования.

Задача баллистического проектирования обычно расчленяется на две части:

- 1) установить калибр орудия, тип, массу и начальную скорость снаряда, обеспечивающие решение поставленной боевой задачи;
- 2) определить размеры канала ствола и характеристики заряда.

Первая часть задачи имеет сравнительно мало вариантов решения, поскольку тактико-технические требования обычно более или менее однозначно определяют массу снаряда, что, в свою очередь, определяет калибр системы и начальную скорость снаряда. Решение второй части задачи баллистического проектирования получают перебором множества вариантов решений системы (1.28) на персональном компьютере.

Исходя из результатов решения системы (1.28) вычисляют длину L_k канала в калибрах (клб), условную баллистическую живучесть $N_{ж}$ ствола и коэффициент η заполнения индикаторной диаграммы:

$$N_{ж} = 200 \frac{1 + \Lambda_r}{\omega/q};$$

$$\eta_z = \frac{p_{ср}}{p_{\max}},$$

где $\Lambda_r = l_{к.с}/l_0$ — число объемов расширения газов в заснарядном пространстве ($l_{к.с}$ — длина пути снаряда по каналу ствола; $l_0 = V_{\text{кам}}/S$ — приведенная

длина каморы); $p_{ср} = \frac{\zeta_{\text{фик}} q v_d^2}{2 S l_{к.с}}$ — среднее давление газов за время выстрела,

соответствующее моменту времени, когда ведущий поясок проходит через дульный срез орудия; p_{\max} — максимальное давление пороховых газов.

При поиске оптимального варианта решения следует учитывать назначение орудия, способ его транспортировки, уровень автоматизации и т. п., а также необходимость удовлетворения выходных параметров заданным ограничениям. Рекомендации по условиям выбора основных параметров баллистики приведены в табл. 1.1, где V_0 — свободный объем каморы заряжания; $W_{кн}$ — объем канала ствола.

Если текущий расчетный вариант не отвечает требованиям технического задания и поставленным ограничениям, его корректируют, изменяя значение максимального давления, массу порохового заряда либо плотность заряжания.

Таблица 1.1

Основные параметры баллистического решения для артиллерийских орудий различных типов

Тип орудия	L_k , клб	V_0 , дм ³	$W_{кн}$, дм ³	η_z	p_d , МПа	N_j	p_{max} , МПа
Танковое	min	min	min	$\leq 0,5$	Расчет- ное	Расчет- ное	≤ 500
Самоход- ная артил- лерийская установка	min	min	min	$\leq 0,45$	≤ 100	max	≤ 350
Противо- танковое полевое	К	К	К	$\leq 0,5$	≤ 100	max	≤ 500
Неавтoma- тическое	$35 \leq L_k \leq 60$	К	К	$\leq 0,5$	≤ 100	max	≤ 300
Автомати- ческое	К	min	min	$\leq 0,5$	≤ 100	max	≤ 350
Гаубица	$35 \leq L_k \leq 45$	К	К	$\leq 0,4$	60–70	max	< 300
Корабель- ное	К	min	min	$\leq 0,5$	≤ 100	max	< 450

Примечание. Символ «К» означает, что значение параметра определяется компоновкой элементов артиллерийского орудия.

1.6. Способ заряжания и выбор размеров каморы

Способ заряжания определяется типом орудия и его калибром. В современных артиллерийских орудиях применяют **два способа заряжания**:

- 1) гильзовое;
- 2) картузное (безгильзовое).

Гильзовое заряжание, в свою очередь, подразделяют на унитарное (патронное) и раздельное.

Использование *унитарного патрона* при ручном заряжании ограничивается его предельными длиной и массой (30...35 кг). В современных орудиях для увеличения скорострельности применяют досылатели. В этих случаях унитарный патрон может иметь большую массу. Унитарный патрон используют в орудиях калибра до 100 мм, а для корабельных автоматических артиллерийских установок — до 130 мм.

Раздельно-гильзовое заряжание применяют в орудиях с большой массой боеприпаса и в орудиях, имеющих переменный метательный заряд, причем

не обязательно, чтобы весь заряд помещался в гильзе. Раздельно-гильзовое зарядание используют обычно для калибров 122,0...152,4 мм.

Картузное зарядание применяют для калибров более 152,4 мм — в этом случае необходим поршневой затвор со специальным упругим obturatorом.

Устройство каморы определяется прежде всего выбранным способом зарядания. На рис. 1.3 представлены конфигурации камор различных типов. При проектировании каморы необходимо увязать ее размеры с расчетными параметрами внутренней баллистики (в первую очередь со свободным объемом V_0 каморы) и размерами поясковой и запоясковой частей снаряда.

При неизвестных конструктивных размерах поясковой и запоясковой частей снаряда можно пользоваться следующими приближенными среднестатистическими соотношениями:

- диаметр ведущего пояса снаряда

$$d_{в.п} = d + 2h_{нар} + (0,25...0,50) \text{ мм},$$

где d — калибр снаряда; $h_{нар}$ — глубина нарезов;

- ширина ведущего пояса $a_{в.п} = 10...25$ мм в зависимости от калибра (уточняется в ходе проектирования нарезов);
- длина цилиндрической и конической запоясковых частей снаряда соответственно

$$l_{ц.з.ч} = 0,15d; \quad l_{к.з.ч} = 0,45d;$$

- диаметр донной части снаряда

$$d_{д.с} = d - 2l_{к.з.ч} \operatorname{tg}(10...12^\circ).$$

Объем **каморы под унитарный патрон** (рис. 1.3, а) рассчитывают из соотношения объемов с учетом 10%-й добавки на объем металла гильзы:

$$1,1V_0 = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 - V_{сн}, \quad (1.29)$$

где $V_1 = \frac{\pi}{12}(d_k^2 + d_k d_1 + d_1^2)l_1$ — объем основного конуса (d_k — диаметр каморы);

$V_2 = \frac{\pi}{12}(d_3^2 + d_3 d_1 + d_1^2)l_2$ — объем переходного конуса; $V_3 = \frac{\pi}{4}d_3^2 l_3$ — объ-

ем цилиндрического участка; $V_4 = \frac{\pi}{12}(d_3^2 + d_3 d + d^2)\frac{l_4}{3}$ — 1/3 объема конуса

врезания; $V_{сн} = V_{п.ч} + V_{ц.з.ч} + V_{к.з.ч}$ — суммарный объем поясковой и запоясковой частей снаряда.

Объем **каморы под раздельно-гильзовое зарядание** (рис. 1.3, б) рассчитывают с учетом 5%-й добавки на объем металла гильзы и наличия крышки, предназначенной для сохранности заряда:

$$1,05V_0 = V_1 + V_4 - V_{кр} - V_{сн}. \quad (1.30)$$

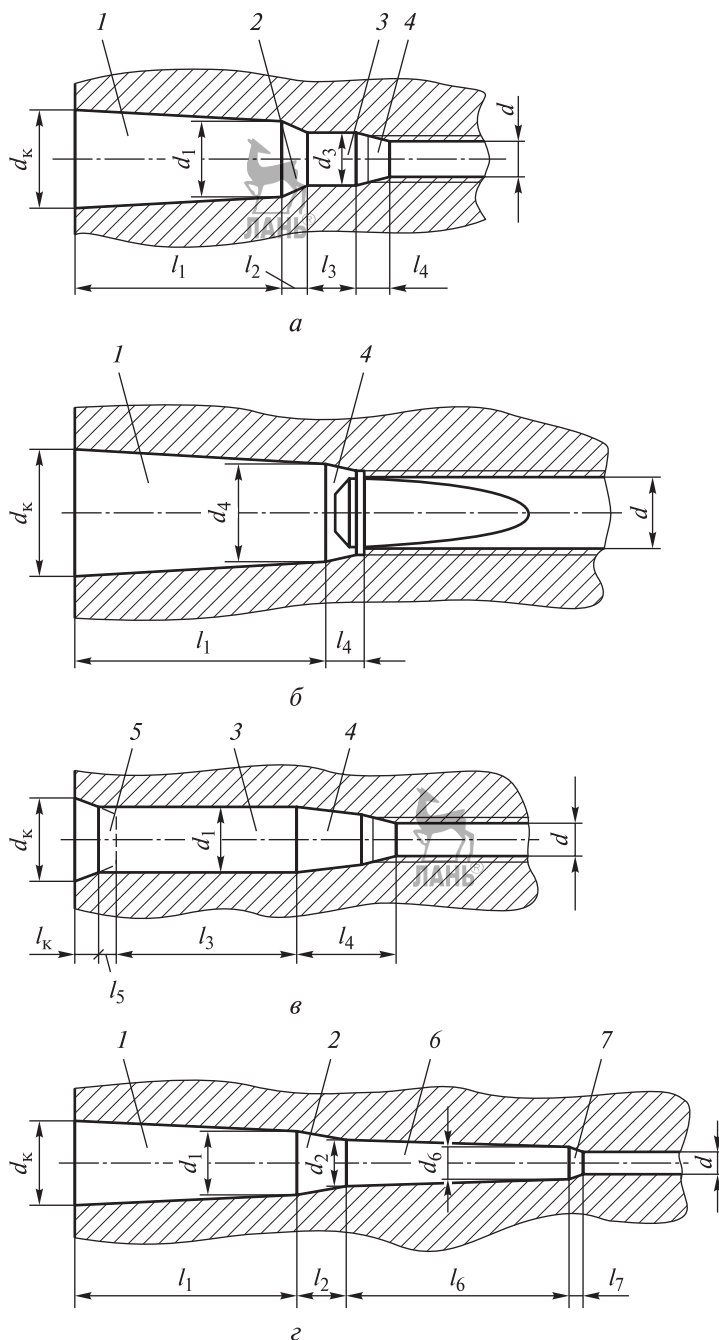


Рис. 1.3. Схемы камер артиллерийских стволов для унитарного (*a*), раздельно-гильзового (*б*), картузного (*в*) заряжания, гладкоствольных стволов танковых и противотанковых пушек (*г*):

1 — основной конус; 2 — переходный конус; 3 — цилиндрический участок; 4 — конус врезания; 5 — obturatorный конус; 6 — дополнительный конус под дульце гильзы; 7 — упорный конус

Здесь $V_4 = \frac{\pi}{12}(d_4^2 + dd_4 + d^2)l_4$ — объем части конуса врезания; $V_{кр} = \frac{\pi}{4}d^2h_{кр}$ — объем крышки ($h_{кр}$ — толщина крышки).

Объемы V_1 и $V_{сн}$ вычисляют так же, как при унитарном зарядании. Для **камеры под картузное зарядание** (рис. 1.3, в) свободный объем

$$V_0 = V_{ц.ч} + V_4 - V_5 - V_{сн}, \quad (1.31)$$

где $V_{ц.ч} = \pi d_k^2(l_k + l_3)/4$ — объем цилиндрической части камеры; $V_5 = \frac{0,75\pi}{12} \times (d_1^2 + d_1d_k + d_k^2)l_k$ — объем выступающей части грибовидного стержня (принимается ориентировочно 75 % объема обтюраторного конуса, уточняется при проектировании затвора).

Объем V_4 вычисляют так же, как при отдельно-гильзовом зарядании, а $V_{сн}$ — как при унитарном зарядании.

Камеры для гладкостенных стволов танковых и противотанковых пушек калибра 100, 115 или 125 мм (рис. 1.3, г) несколько отличаются по форме, размерам и конусностям от камер нарезных орудий унитарного зарядания. При составлении соотношения объемов следует учесть, кроме 10%-й добавки на объем металла гильзы, более длинный участок камеры под дульце гильзы малой конусности и рекомендуемые соотношения диаметров и длин:

$$1,1V_0 = V_1 + V_2 + V_6 + V_7 - V_{сн}, \quad (1.32)$$

где $V_2 = \frac{\pi}{12}(d_1^2 + d_1d_2 + d_2^2)l_2$ — объем переходного конуса; $V_6 = \frac{\pi}{12}(d_2^2 + d_2d_6 + d_6^2)l_6$ — объем участка *б* малой конусности; V_7 — объем упорного конуса 7.

Объемы V_1 и $V_{сн}$ рассчитывают так же, как при унитарном зарядании.

Свободный объем в упорном конусе 7 довольно мал, и в первом приближении его можно не учитывать: $V_7 = 0$.

Размеры камеры должны удовлетворять соотношению объемов для выбранного способа зарядания, требуемым конусностям и рекомендуемому для данного вида зарядания отношению d_k/d (диаметральной бутылочности).

Для **камеры унитарного зарядания** (см. рис. 1.3, а) бутылочность принимается в диапазоне значений 1,1...1,4; для гладких стволов — в пределах 1,4...1,7, а в автоматических артиллерийских установках доходит до 2 — для уменьшения длины досылки и увеличения темпа стрельбы.

Диаметр цилиндрического участка под дульце гильзы для нарезных стволов принимается в зависимости от диаметра ведущего пояса:

$$d_3 = d + (0,3...0,6) \text{ мм.}$$

Длина конуса врезания получается исходя из требуемой конусности:

$$l_4 = (d_3 - d)/(0,05...0,10).$$

Для гладких стволов диаметр d_6 (см. рис. 1.3, з) вычисляют после нахождения длины упорного конуса $l_7 = (0,05...0,15)d$ по его конусности:

$$d_6 = d + (0,025...0,050)l_7.$$

По конусности определяют также диаметр d_2 :

$$d_2 = d_6 + 0,005l_6.$$

Длина переходного конуса принимается в зависимости от диаметральной бутылочности каморы d_k/d , найденной при расчете параметров внутренней баллистики:

$$l_2 = \begin{cases} (0,4...0,7)d & \text{при } \sqrt{d_k/d} \leq 1,25, \\ (0,7...1,2)d & \text{при } \sqrt{d_k/d} > 1,25. \end{cases}$$

Переходный диаметр d_2 определяют по конусности:

- для нарезных стволов (см. рис. 1.3, а)

$$d_2 = (0,1...0,2)l_2 + d;$$

- для гладких стволов (см. рис. 1.3, з)

$$d_2 = (0,7...1,2)l_2 + d.$$

Длина цилиндрического участка нарезных стволов (см. рис. 1.3, а) $l_3 = (0,6...1,0)d$, а для гладких стволов (см. рис. 1.3, з) длина участка под дульце $l_6 = (2...3)d$.

Объем $V_{п.ч}$ поясковой части снаряда, а также объем $V_{ц.з.ч}$ цилиндрической и $V_{к.з.ч}$ конической заповясковых частей нарезных стволов рассчитывают с учетом заданных или принятых по приближенным соотношениям размеров снаряда:

$$V_{п.ч} = \frac{\pi d_{в.п}^2 a_{в.п}}{4}; \quad V_{ц.з.ч} = \frac{\pi d^2 l_{ц.з.ч}}{4}; \quad V_{к.з.ч} = \frac{\pi}{12} (d^2 + dd_{д.с} + d_{д.с}^2) l_{к.з.ч}.$$

Эти же соотношения можно в первом приближении использовать и для гладких стволов, приближенно полагая $d_{в.п} = d$ и $a_{в.п} = 2...3$ мм.

Для каморы раздельно-гильзового заряджания (см. рис. 1.3, б) диаметральной бутылочность $d_k/d = 1,12...1,20$.

Длина конуса врезания до переднего торца ведущего пояса

$$l_4 = h_{кр} + l_{к.з.ч} + l_4 + (5...8) \text{ мм.}$$

Диаметр $d_4 = (0,05...0,10)l_4 + d$. Полная длина конуса врезания $l_4^{\text{полн}} = (10...20)(d_4 - d)$.

Толщина крышки (гофрированный картон) $h_{кр} = 5...10$ мм.

Для каморы под картузное зарядание диаметральной бутылочность лежит в диапазоне значений 1,14...1,20.

Длину l_4 конуса врезания (см. рис. 1.3, в) определяют в соответствии с выбранной диаметральной бутылочностью и требуемой конусностью:

$$l_4 = (d_k - d)/(0,05...0,10).$$

Угол ската обтюраторного конуса 5 принимается в пределах 14...18°, что позволяет определить выходной диаметр d_k каморы при длине обтюраторного конуса

$$l_5 = (0,25...0,30)d_k.$$

Длина выступающей части грибовидного стержня

$$l_k = (0,3...0,4)d_k.$$

Соотношения (1.29)–(1.32) позволяют вычислить основной объем V_1 , по которому с учетом требуемой бутылочности $\chi \cong \left(\frac{d_k}{d}\right)^2$ можно определить либо длину l_1 основного конуса для раздельно-гильзового зарядания (см. рис. 1.3, б), либо длину l_3 цилиндрической части для картузного зарядания (см. рис. 1.3, в):

$$l_1 = \frac{12V_1}{\pi(d_k^2 + d_k d_4 + d_4^2)};$$

$$l_3 = \frac{4V_{ц.ч.}}{\pi d_k^2}.$$

В результате расчета получают конструктивные размеры каморы, по которым корректируют положения начальных точек кривых давлений пороховых газов (их начало должно соответствовать дну снаряда) и кривой давления на стенки ствола (ее начало должно соответствовать дну каморы).

Определение конструктивных размеров каморы завершает эскизное проектирование метательного заряда.

1.7. Техническое проектирование метательного заряда к выстрелам различных типов зарядания

На этапе технического проекта необходимо изготовить *опытный образец* метательного заряда.

Метательный заряд — основной элемент артиллерийского выстрела, обеспечивающий сообщение начальной скорости снаряду за счет работы пороховых газов в канале ствола орудия.

В зависимости от назначения различают следующие виды метательных зарядов:

- *боевой* — для боевой стрельбы;
- *разрядочный* — для удаления из канала ствола стрельбой застрявшего метаемого тела;
- *прогревной* — для прогрева канала ствола орудия или удаления из ствола остатков смазки перед стрельбой;
- *усиленный* — для получения заданных повышенных значений максимального давления пороховых газов и скорости при испытаниях боеприпасов;
- *холостой* — для имитации боевой стрельбы и производства салютов;
- *образцовый* — для определения значений поправок и проверки правильности работы аппаратуры при проведении баллистических испытаний;
- *учебно-тренировочный* (имитатор метательного заряда) — для обучения личного состава приемам заряжания-разряжания артиллерийского орудия;
- *учебный* (макет метательного заряда из инертных материалов) — для изучения устройства заряда;
- *постоянный* (с неизменяемой массой пороховых элементов) — для получения какой-то одной начальной скорости метаемого тела;
- *переменный* (с изменяемой массой пороховых элементов) — для получения какой-то одной из нескольких возможных начальных скоростей метаемого тела;
- *полный* (с неизменяемой максимальной массой пороховых элементов) — для получения максимальной начальной скорости метаемого тела;
- *полный постоянный* — для получения максимальной по шкале скоростей начальной скорости метаемого тела;
- *полный переменный* — для получения требуемой начальной скорости метаемого тела в диапазоне от некоторой начальной скорости до максимального ее значения;
- *уменьшенный* (с неизменяемой и не максимальной массой пороховых элементов) — для получения какой-то одной начальной скорости метаемого тела;
- *уменьшенный постоянный* — для получения минимальной по шкале скоростей начальной скорости метаемого тела;
- *уменьшенный переменный* — для получения требуемой начальной скорости метаемого тела в диапазоне от ее минимального значения до некоторого уменьшенного значения;
- *пониженный* (постоянный) — для получения начальной скорости метаемого тела, расположенной в интервале скоростей, соответствующих стрельбе полным или уменьшенным зарядом;
- *дальнобойный* — для получения большей начальной скорости, чем при стрельбе полным постоянным зарядом;
- *специальный* (постоянный) — для стрельбы конкретным снарядом из числа штатных, начальная скорость которого отличается от начальной скорости штатных снарядов, входящих в боевой комплект орудия.

В зависимости от используемой марки пороха различают следующие метательные заряды:

- *простой* (из пороха одной марки);
- *комбинированный* (из нескольких порохов различных марок).

Метательный заряд артиллерийского выстрела состоит из навески пороха одной или нескольких марок и вспомогательных элементов, собранных в гильзе или картузе. *Картуз* представляет собой оболочку из ткани и предназначен для размещения всего заряда или его части.

Для выполнения ряда тактико-технических и эксплуатационных требований в метательный заряд могут входить следующие **вспомогательные элементы**:

- воспламенитель;
- пламегаситель;
- размеднитель;
- флегматизатор;
- фиксирующее устройство;
- герметизирующее устройство;
- обтюратор.

Наличие в метательном заряде всех перечисленных вспомогательных элементов не обязательно. Применение каждого из них зависит от свойств пороха, устройства, назначения метательного заряда и предъявляемых к нему требований, а также от условий стрельбы.

Воспламенитель служит для усиления импульса от средства инициирования, для быстрого и однообразного воспламенения и устойчивого горения метательного заряда. Изготавливают его обычно из дымного или пористого пироксилинового пороха, помещаемого в шелковый или хлопчатобумажный картуз либо в перфорированную трубку. Воспламенитель в картузе пришивается между основным зарядом (к его нижней части) и средством воспламенения. Осевой воспламенитель в перфорированной трубчатой оболочке располагается по оси заряда над соском гильзы.

Пламегаситель предназначен для гашения обратного пламени или для уменьшения и гашения дульного пламени при стрельбе. Пламегаситель представляет собой навеску пламегасящей соли (сульфата калия K_2SO_4) или пламегасящего пироксилинового пороха с добавкой перхлорвиниловой смолы, помещенной в хлопчатобумажный или шелковый картуз тороидаальной формы, который находится в нижней части заряда. Пламегасящие добавки в составе пороховых газов снижают вероятность возникновения реакции между вылетающими из ствола пороховыми газами, несгоревшими частицами порохового заряда и кислородом воздуха.

Размеднитель служит для удаления медного налета, остающегося на поверхности канала ствола от ведущего пояска снаряда при стрельбе. Размеднитель представляет собой моток свинцовой (или выполненной из других легкоплавких металлов и сплавов) проволоки, размещаемый над зарядом. При выстреле свинец расплавляется и, взаимодействуя с медью, образует соединение, которое легко удаляется с поверхности канала ствола при следующем выстреле ведущими устройствами снаряда. За счет этого повышается живучесть ствола.

Флегматизатор предназначен для снижения разгарно-эрозионного износа канала ствола и повышения его живучести.

Фиксирующее устройство обеспечивает неизменное положение составных частей метательного заряда в гильзе и, соответственно, сохранность его кон-

струкции к моменту стрельбы. Устройства используют в зарядах к выстрелам унитарного и отдельно-гильзового заряжения. Фиксирующие устройства представляют собой бумажные и картонные элементы метательного заряда. В выстрелах унитарного заряжения они включают в себя кружки, цилиндрики, обтюраторы. Кружки и цилиндрики занимают свободный объем в гильзе между поверхностью заряда и дном снаряда, поджимают порох к дну гильзы.

Герметизирующее устройство предназначено для изоляции элементов метательного заряда от внешней среды в целях сохранения его боевых и эксплуатационных свойств в течение гарантийного срока хранения. К герметизирующему устройству относится совокупность крышек из бумаги, картона, полимерных материалов, металла в сочетании с герметизирующими или уплотнительными элементами.

Обтюратор — конструкция из плотного и жесткого картона, служит для устранения прорыва пороховых газов в начальный период выстрела до врезания ведущего пояса снаряда в нарезы ствола и прилегания дульца гильзы к стенкам камеры.

Метательные заряды к выстрелам *унитарного* заряжения являются постоянными (полными или уменьшенными). Навеска пороха, как правило, состоит из одной или двух марок порохов. В большинстве случаев применяют зерновые пироксилиновые пороха с семью каналами. Для облегчения воспламенения зерен пороха в длинных зарядах используют направляющие пучки из трубчатого пироксилинового пороха. Некоторые заряды (например, к 100-миллиметровой пушке Т-12) состоят только из трубчатого пороха. Порох можно помещать в гильзе россыпью или в картузе. Картуз служит для фиксации положения воспламенителя (если он есть), а также для увеличения длины уменьшенного заряда не менее чем до $\frac{2}{3}$ длины зарядной камеры, что необходимо для стабильности баллистических свойств заряда (иногда применяют картуз бутылочной формы). Конструктивно возможно разделение заряда на верхнюю и нижнюю части. К выстрелам унитарного заряжения можно использовать все разновидности вспомогательных элементов метательного заряда, особенно в полных зарядах.

Метательные заряды к выстрелам *отдельно-гильзового* заряжения (см. рис. 1.3, б) чаще всего переменные. Исключение составляют дальноточные заряды и заряды к танковым и противотанковым пушкам, которые бывают только постоянными. Переменные метательные заряды гаубичных выстрелов состоят из зерновых пироксилиновых порохов двух марок, а заряды пушечных выстрелов, как правило, из трубчатых пироксилиновых и баллиститных порохов двух марок и реже — одной марки. Зерновые пороха помещаются в картузах, а трубчатые могут находиться в пучках — собранных вместе и скрепленных пороховых трубках.

Переменный заряд состоит из основного пакета или пучка (как правило, одного) и нескольких дополнительных пакетов или пучков. Под *пакетом* понимается составная часть переменного метательного заряда в картузе, которая в процессе подготовки к стрельбе может быть отделена от остального заряда.

Основной заряд (пакет) предназначен для получения минимальной скорости метаемого тела. Если в заряде используют две марки пороха, то ос-

новой заряд готовят обычно из тонкосводчатого пороха, чтобы обеспечить на наименьшем заряде требуемое давление и скорость снаряда, при которых происходит надежное взведение взрывателя.

Дополнительные пакеты в процессе подготовки к стрельбе могут отделяться от остального заряда в целях получения промежуточных зарядов. Дополнительные пакеты заряда могут быть равновесными (с одинаковой массой пороха) и неравновесными (с различной массой пороха).

Метательные заряды к выстрелам *картузного* заряжания переменные, состоят из основного заряда и дополнительных пакетов, чаще равновесных. Заряды готовят из порохов одной или двух марок. Используют как пироксилиновые (зерновые и трубчатые), так и баллиститные пороха. И основной, и дополнительный заряды помещают в картузы, изготовленные из прочной легкосгорающей ткани.

Дополнительный заряд и воспламенитель скрепляют с основным зарядом (картузом) с помощью широких лент-лямок. Для равномерного распределения малой навески пороха по всей длине зарядной камеры могут применяться основные пакеты бутылочной формы и дополнительные пакеты в виде торцов. Скомплектованные заряды (полный переменный или уменьшенный переменный) хранят и перевозят каждый отдельно в герметичных оцинкованных коробах, вставленных в деревянные ящики, или в оцинкованных упаковках (пеналах).

Изготовленный на этапе технического проекта опытный образец метательного заряда должен удовлетворять баллистическим, тактико-техническим, эксплуатационным и производственно-экономическим требованиям.

Баллистические требования предъявляются:

- к температуре заряда;
- типу снаряда, используемого при стрельбе;
- средней начальной скорости снаряда;
- вероятному отклонению начальной скорости;
- максимальному (среднему из группы выстрелов) давлению пороховых газов;
- максимально допустимому отклонению давления пороховых газов для отдельных выстрелов от среднего давления в группе.

Тактико-технические требования:

- однообразие действия при стрельбе;
- возможно меньшее влияние на износ ствола;
- возможно меньшая дымность и пламенность выстрелов;
- отсутствие обратного пламени;
- безопасность и простота обращения с зарядами в боевых условиях.

Эксплуатационные требования:

- высокая физико-химическая стабильность свойств при хранении в различных климатических условиях;
- устойчивость к действию транспортных нагрузок;
- возможность доставки любым видом транспорта;
- исключение возможности преждевременного срабатывания отдельных элементов в период хранения, погрузочно-разгрузочных работ и транспортирования.

Производственно-экономические требования:

- простота сборки в условиях массового производства;
- дешевизна и недефицитность материалов;
- простота и технологичность изготовления отдельных элементов;
- нетоксичность заряда.

После изготовления опытного образца метательного заряда проводят *предварительные испытания артиллерийских снарядов на прочность и функционирование* согласно действующим нормативным документам.

Контрольные вопросы

1. Что такое процесс выстрела и какими этапами он характеризуется?
2. Какие типы порохов используют в современных метательных зарядах артиллерийских выстрелов и почему?
3. Как влияет форма порохового зерна на процесс горения?
4. Что является причиной несоответствия расчетных результатов основной (прямой) задачи внутренней баллистики и данных экспериментов?
5. С чего нужно начинать поиск баллистического решения?
6. Как изменение плотности заряжания влияет на дульную скорость снаряда?
7. Какими способами можно уменьшить давление пороховых газов в канале ствола?
8. Каковы достоинства и недостатки существующих способов заряжания для артиллерийских систем?



Глава 2. СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА СНАРЯД ПРИ ВЫСТРЕЛЕ

2.1. Давление пороховых газов

На этапе эскизного проектирования артиллерийских снарядов для проведения расчетов на прочность необходимо знать *силы, действующие во время движения снарядов в канале ствола*. Эти силы зависят от давления пороховых газов, определяемого при выборе баллистического решения.

При движении снаряда по каналу ствола давление пороховых газов на дно и стенки оболочки снаряда будет меньше, чем давление пороховых газов на дно канала ствола орудия, которое можно считать неподвижным.

Введем следующие обозначения: $p_{п.г}^{ст}$ — давление пороховых газов на дно канала ствола орудия; $j_{сн}$ — ускорение снаряда в рассматриваемый момент времени.

Допустим, что масса ω пороховых газов и несгоревших частиц пороха в любой момент времени распределена равномерно по всей длине заснарядного пространства, и примем закон изменения ускорения газов и несгоревших частиц пороха в виде линейной функции (рис. 2.1).

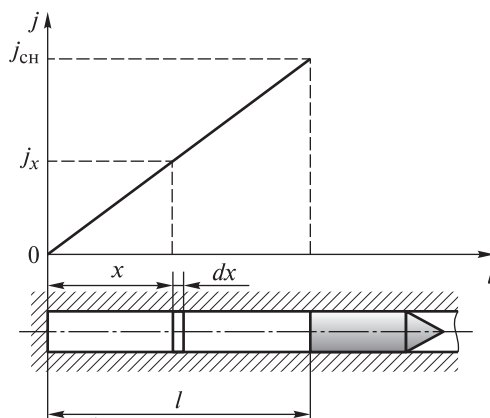


Рис. 2.1. График ускорения пороховых газов в заснарядном пространстве

Рассмотрим какой-либо момент движения снаряда по каналу ствола орудия. Пусть в этот момент снаряд находится от дна канала ствола на расстоянии l . Выделим элементарный объем пороховых газов и несгоревших

частиц порохового заряда; длина выделенного объема dx , а его удаление от дна канала ствола орудия x .

Масса выделенной элементарной части пороховых газов и несгоревших частиц порохового заряда $d\omega = \omega dx/l$, ускорение пороховых газов $j_x = j_{\text{сн}} x/l$, где ускорение снаряда $j_{\text{сн}} = p_{\text{п.г}}^{\text{сн}} S_{\text{д}}/q$ ($p_{\text{п.г}}^{\text{сн}}$ — давление пороховых газов на дно снаряда; $S_{\text{д}}$ — площадь донной части снаряда; q — масса снаряда). Тогда уравнение равновесия сил, действующих на дно канала ствола орудия, на пороховой заряд и на снаряд можно записать в виде

$$p_{\text{п.г}}^{\text{сн}} S_{\text{д}} = p_{\text{п.г}}^{\text{сн}} S_{\text{д}} + \int_{\omega} j_x d\omega.$$

Подставив в последнее уравнение выражения для j_x и $d\omega$, получим *давление пороховых газов на дно снаряда*:

$$p_{\text{п.г}}^{\text{сн}} = p_{\text{п.г}}^{\text{сн}} \left(1 + \frac{\omega}{2q} \right).$$

Среднее давление пороховых газов в заснарядном пространстве в любой момент движения снаряда по каналу ствола определяется из выражения

$$p_{\text{п.г}}^{\text{сн}} = \langle p \rangle \left(1 + 0,25 \frac{\omega}{2q} \right)^{-1}, \quad (2.1)$$

т. е. давление пороховых газов на дно снаряда всегда меньше среднего давления, которое генерируется пороховыми газами.

Расчетным называется давление пороховых газов, которое принимается за основу удельной силовой нагрузки при расчете прочности корпуса снаряда и его деталей. За расчетное давление пороховых газов принимают $p_{\text{п.г}}^{\text{расч}} = 1,1 p_{\text{п.г}}^{\text{сн}}$, т. е. повышение максимального давления пороховых газов обеспечивает запас прочности оболочки снаряда на 10 %.

2.2. Силы инерции

Силы инерции, действующие на снаряд во время его ускоренного движения по каналу ствола орудия, подразделяют на осевые, радиальные и касательные.

Осевые силы инерции возникают в результате *ускоренного поступательного* движения снаряда. Уравнение поступательного движения снаряда при условии, что энергия пороховых газов расходуется только на сообщение ему этого движения, имеет вид

$$q \frac{dv}{dt} = p_{\text{п.г}} S_{\text{д}} - F_{\text{с.с}},$$

где v — скорость снаряда; $F_{\text{с.с}}$ — сила сопротивления движению снаряда.

Введем понятие *коэффициента перегрузки*, или *коэффициента линейной взводимости*:

$$\zeta_{\text{пер}} = \frac{1}{g} \frac{dv}{dt} = \frac{1}{g} \frac{pS_d}{\zeta_{\text{фик}} q},$$

где $\zeta_{\text{фик}}$ — коэффициент фиктивной массы снаряда.

Коэффициент перегрузки показывает, во сколько раз ускорение снаряда больше ускорения силы тяжести, и зависит от давления пороховых газов в рассматриваемый момент времени.

Осевая сила инерции определяется как произведение элемента массы q_i оболочки или любого другого элемента (детали) вращающегося снаряда на ускорение снаряда при его движении по каналу ствола орудия:

$$F_{\text{ин}} = q_i \frac{dv}{dt} = q_i \frac{pS_d}{\zeta_{\text{фик}} q}. \quad (2.2)$$

Радиальные силы инерции возникают при *центростремительном ускорении* во вращающемся снаряде (эти силы также называются **центробежными**).

Радиальная сила инерции, действующая на элемент массы оболочки (рис. 2.2),

$$F_{\text{рад}} = q_i r \Omega^2,$$

где r — удаление этого элемента от оси вращения; Ω — угловая скорость вращения снаряда.

Угловую скорость Ω снаряда при постоянном угле $\alpha_{\text{нар}}$ наклона нарезов ствола орудия ($\alpha_{\text{нар}} = \text{const}$) можно определить, рассмотрев движение снаряда по винтовой линии (рис. 2.3). При перемещении снаряда вдоль оси канала ствола орудия на расстояние ηd (η — длина хода нарезов в калибрах) фиксированная точка на поверхности снаряда из нулевого положения переместится

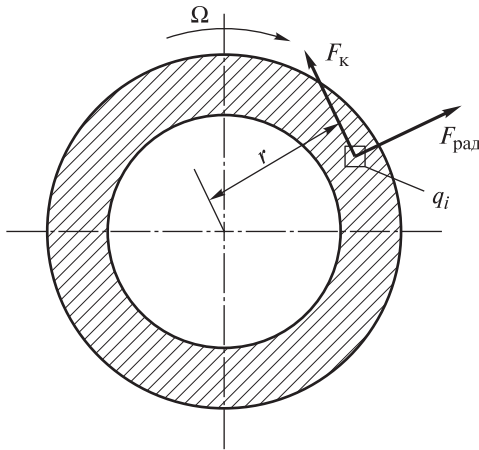


Рис. 2.2. Радиальная $F_{\text{рад}}$ и касательная F_k силы инерции

в положение B , совершив при этом полный оборот. Связь между линейным и угловым перемещением в произвольном положении корпуса снаряда определяется соотношением $x = y \text{ctg} \alpha_{\text{нар}}$. Дифференцируя это соотношение по времени, получаем зависимость между линейной и угловой скоростями

в виде $v = \Omega \frac{d}{2\pi}$, откуда

$$\Omega = \frac{2\pi v}{\eta d}.$$

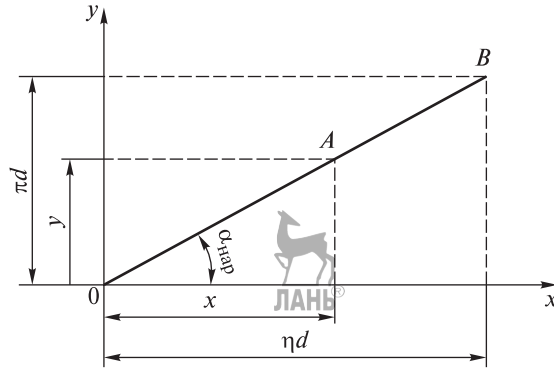


Рис. 2.3. Развертка нареза канала ствола орудия

Вследствие ускоренного поступательного и вращательного движения снаряда в канале ствола радиальные силы инерции непрерывно возрастают.

Максимальное значение *осевых* сил инерции не совпадает во времени с максимальным значением *радиальных* сил инерции. Первые достигают своего наибольшего значения при максимальном давлении, а вторые — при вылете снаряда из канала ствола. Радиальные силы инерции в момент достижения осевыми силами инерции максимального значения малы и, будучи направлены под прямым углом к осевым силам инерции, почти не влияют на значение результирующей силы. В связи с этим радиальными силами инерции при расчете корпуса снаряда на прочность при выстреле пренебрегают. Однако они существенно влияют на функционирование деталей взрывателей. Для расчета параметров предохранительных устройств взрывателей вводят коэффициент $\zeta_{ц.в}$ *центробежной взводимости*:

$$\zeta_{ц.в} = \frac{F_{\text{рад}}}{q_i g r} = \frac{\Omega^2}{g}.$$

Касательные силы инерции возникают в результате действия *углового ускорения* снаряда (иначе они называются **силами инерции от касательного ускорения**).

Касательная сила инерции (см. рис. 2.2) выделенного элемента массы оболочки определяется соотношением

$$F_k = q_i r \frac{d\Omega}{dt} = q_i r \frac{p S_d}{\zeta_{\text{фик}} q \eta d} \frac{2\pi}{d}. \quad (2.3)$$

Отсюда следует, что касательные силы инерции достигают наибольшего значения в момент максимума давления пороховых газов, т. е. одновременно с осевыми силами инерции.

Касательные силы инерции создают крутящий момент, который направлен в сторону, противоположную вращению снаряда. Однако этот крутящий момент не оказывает существенного влияния на прочность оболочки снаряда, так как он сравнительно мал и в случае недостаточно прочного

ведущего пояска, ненадежно закрепленного на корпусе снаряда, может вызвать только увеличение ширины отпечатков полей нарезов на центрующих утолщениях, срезание или проворот ведущего пояска. По этим причинам касательными силами инерции при расчете прочности оболочки снаряда при выстреле пренебрегают.

2.3. Давление снаряжения

Силы инерции снаряжения возникают при ускоренном движении снаряда по каналу ствола орудия. Их можно подразделить на осевые, радиальные и касательные. *Радиальные* и *касательные* силы инерции снаряжения относительно малы, поэтому их не учитывают при расчете на прочность оболочки снаряда.

Рассмотрим нормальное сечение $n-n$, которое разделяет снаряжение на две части (рис. 2.4), и введем следующие обозначения: $q_{\text{ВВ(в)}}$ — масса части снаряжения, расположенной выше этого сечения; r_n — радиус каморы снаряда в сечении $n-n$.

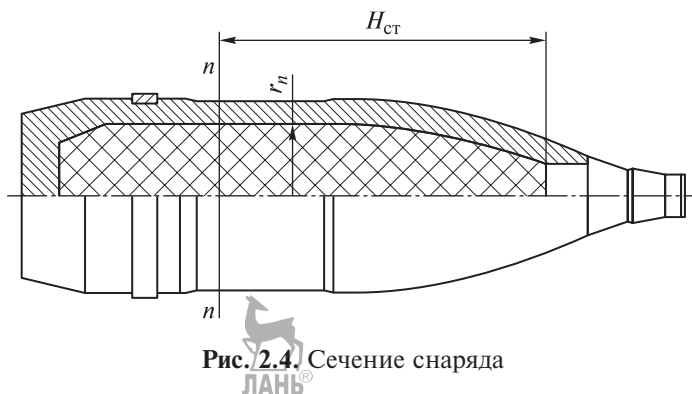


Рис. 2.4. Сечение снаряда

Осевая сила инерции твердого снаряжения в головной или цилиндрической части каморы снаряда в зависимости от массы $q_{\text{ВВ(в)}}$ определяется по формуле (2.2), в которой коэффициент $\zeta_{\text{фик}}$ фиктивной массы можно принять равным единице, т. е.

$$F_{\text{ин}} = q_{\text{ВВ(в)}} \frac{dv}{dt} = q_{\text{ВВ(в)}} \frac{p\pi R^2}{q},$$

где $R = d/2$ (d — калибр снаряда).

Осевые напряжения в поперечном сечении твердого снаряжения в головной или цилиндрической части каморы снаряда определяют следующим образом:

$$|\sigma_z| = F_x / S_{\text{п.с}}, \quad (2.4)$$

где F_x — продольная сила, численно равная силе инерции, т. е. $F_x = F_{ин}$; $S_{п.с} = \pi r_n^2$ — площадь поперечного сечения каморы снаряда.

Подставив выражения для $F_{ин}$ и $S_{п.с}$ в формулу (2.4), получим

$$|\sigma_z| = p \frac{R^2}{r_n^2} \frac{q_{BB(b)}}{q}. \quad (2.5)$$

Для определения осевой силы инерции в жидком снаряжении в любом сечении каморы снаряда необходимо массу части снаряжения, расположенной выше сечения $n-n$, заменить массой столба жидкости, высота которого $H_{ст}$, тогда

$$q_{BB(b)} = \pi r_n^2 H_{ст} \rho_{BB},$$

где ρ_{BB} — плотность жидкого снаряжения.

Давление снаряжения на стенки корпуса снаряда возникает в результате воздействия осевых сил инерции снаряжения. Осевые силы инерции сжимают снаряжение в осевом направлении, и оно, деформируясь в радиальном направлении, оказывает давление на стенки оболочки снаряда.

Примем следующие допущения:

- 1) снаряжение является *упругим* телом;
- 2) корпус снаряда от воздействия давления снаряжения не деформируется, т. е. остается *абсолютно жестким* (это допущение возможно, так как модуль упругости снаряжения в 100–200 раз меньше модуля упругости металла);
- 3) давление снаряжения действует *радиально* на стенки корпуса снаряда.

Из соотношений теории упругости известно, что радиальная деформация снаряжения

$$\epsilon_{BBr} = \frac{1}{E_{BB}} [\sigma_{BBr} - \mu_{BB}(\sigma_{BBx} + \sigma_{BB\tau})],$$

где E_{BB} — модуль упругости снаряжения; σ_{BBx} , σ_{BBr} , $\sigma_{BB\tau}$ — напряжения по главным осям деформации; μ_{BB} — коэффициент Пуассона снаряжения.

В силу принятого допущения об абсолютной жесткости корпуса радиальная деформация снаряжения на его поверхности $\epsilon_{BBr} = 0$. В этом случае $\sigma_{BBr} = \mu_{BB}(\sigma_{BBx} + \sigma_{BB\tau})$. Поскольку снаряжение — симметричное тело, то $\sigma_{BBr} = \sigma_{BB\tau}$. Напряжения в слоях снаряжения, прилегающих к стенке корпуса, равны давлению снаряжения на стенки корпуса, т. е. $p_{с.к} = |\sigma_{BBr}|$, или

$$p_{с.к} = \frac{\mu_{BB}}{1 - \mu_{BB}} |\sigma_{BBx}| = \frac{\mu_{BB}}{1 - \mu_{BB}} p \frac{R^2}{r_n^2} \frac{q_{BB(b)}}{q}. \quad (2.6)$$

Формула (2.6) справедлива для вычисления давления твердого снаряжения на стенки корпуса в *головной* и *цилиндрической* частях каморы снаряда.

В конической части камеры давление снарядения на стенки корпуса снаряда в значительной мере отличается от давления снарядения в цилиндрической и головной частях камеры снаряда. В связи с этим расчетные формулы для определения давления твердого снарядения на стенки оболочки в конической части камеры снаряда (рис. 2.5) будут другими.

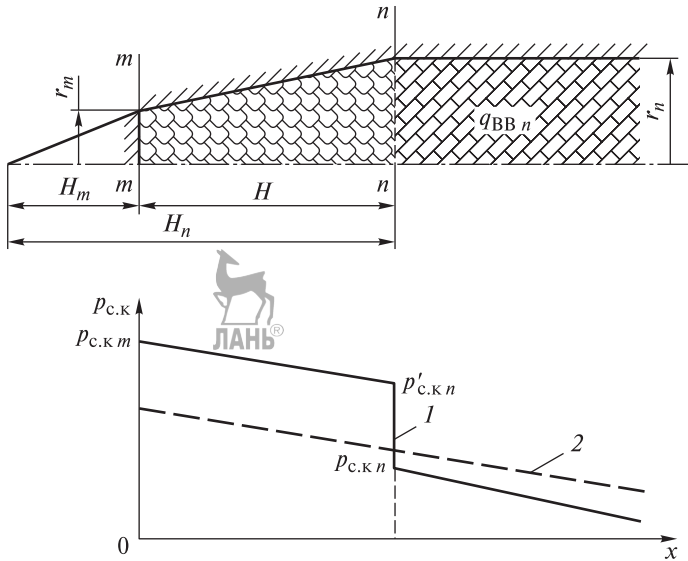


Рис. 2.5. Давление твердого (1) и жидкого (2) снарядения на стенки конической части камеры снаряда

При переходе цилиндрической части камеры в коническую (сечение $n-n$) происходит скачок давления снарядения до значения

$$p'_{c,к} = p_{c,к} \zeta_{BB n}. \quad (2.7)$$

Здесь $p_{c,к}$ — давление снарядения в сечении $n-n$, определяемое из (2.6);

$$\zeta_{BB n} = \frac{(1 - \mu_{BB})[1 + \mu_{BB} - (1 - 2\mu_{BB})\bar{r}^3]}{\mu_{BB}[1 + \mu_{BB} + 2(1 - 2\mu_{BB})\bar{r}^3]} + \frac{(1 + \mu_{BB})(1 - 2\mu_{BB})(1 - \bar{r})(1 + 2\bar{r} + 3\bar{r}^2)}{4\mu_{BB}[1 + \mu_{BB} + 2(1 - 2\mu_{BB})\bar{r}^3]} K_V,$$

где $\bar{r} = r_d/r_n$ (r_d — радиус основания дна камеры); $K_V = H\pi r_n^2 \left(\frac{q_{BB n}}{\rho_{BB}} \right)^{-1}$ — соотношение объемов воображаемых цилиндров слева и справа от сечения $n-n$ (см. рис. 2.5) (H — высота конической части камеры).

У дна камеры (сечение $m-m$) давление снарядения вычисляют по следующей формуле:



$$p'_{с.к} = p_{с.к} \zeta_{ВВ\ m},$$

(2.8)

где

$$\zeta_{ВВ\ m} = \frac{6(1 - \mu_{ВВ}) + K_V(1 - \bar{r})^{-1} [3 - (1 - 2\mu_{ВВ})\bar{r}^4 - 2(1 + \mu_{ВВ})\bar{r}]}{2(1 + \mu_{ВВ}) + 4(1 - 2\mu_{ВВ})\bar{r}^3}.$$

Коэффициенты Пуассона $\mu_{ВВ}$ снаряжения имеют следующие значения: 0,5 для жидкого и пластичного снаряжения; 0,4 для литого; 0,35 для шнекованного и прессованного.

2.4. Силы сопротивления движению снаряда в канале ствола орудия

Сила сопротивления движению снаряда в канале ствола артиллерийского орудия

$$F_{с.с} = F_{\text{н}} + F_{\text{т.в.п}},$$

где $F_{\text{н}}$ — сила трения от реакций граней нарезов; $F_{\text{т.в.п}}$ — сила трения от реакций ведущего пояска.

Сила трения от реакции ведущего пояска

$$F_{\text{т.в.п}} = F_{\text{р.в.п}} N_{\text{нар}} (a_{\text{н}} + a_{\text{дн}}) l_{\text{р}} \zeta_{\text{в}}^{\text{тр}} \cos \alpha_{\text{нар}},$$

где $F_{\text{р.в.п}} = 0,6 F_{\text{р.в.п}}^{\text{max}}$ — реакция ведущего пояска; $N_{\text{нар}}$ — число нарезов; $a_{\text{н}}$ — ширина поля нареза; $a_{\text{дн}}$ — ширина дна нареза; $l_{\text{р}} = 0,9 a_{\text{в.п}}$ — ширина ведущего пояска в области контакта с нарезами; $\zeta_{\text{в}}^{\text{тр}} = \frac{1 + 0,0213v}{1 + 0,113v} \zeta_{\text{в.п}}$ — коэффициент трения с учетом скорости движения снаряда ($\zeta_{\text{в.п}} = 0,167$ — коэффициент трения медного ведущего пояска о поверхность канала ствола).

Для определения силы трения $F_{\text{н}}$ от реакций граней нарезов необходимо знать силу реакции $F_{\text{нар}}$ грани нареза, которая обусловлена силой воздействия грани на выступ ведущего пояска.

Реакция грани нареза возникает в результате инерционного сопротивления снаряда вовлечению его во вращательное движение. При выводе расчетной формулы для определения реакции грани нареза считают, что ствол орудия и снаряд изготовлены без погрешностей, а врезание ведущего пояска в нарезы происходит симметрично относительно канала ствола орудия. При этих допущениях первичная реакция ведущего пояска будет одинаковой по всему периметру ведущего пояска.

Развернем поверхность канала ствола орудия в плоскость (рис. 2.6) и нанесем на развертку систему прямоугольных координат таким образом, чтобы ось Ox была параллельна оси канала ствола орудия, а один из нарезов ствола орудия проходил своей гранью через начало координат.

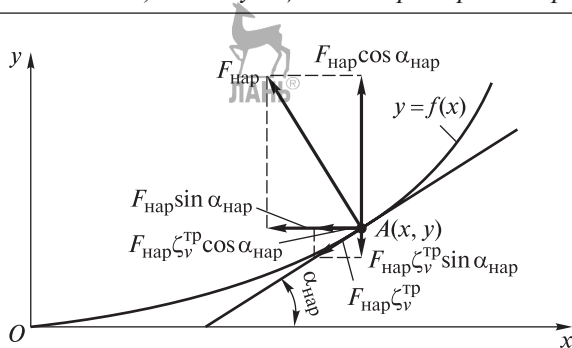


Рис. 2.6. Сила реакции грани нареза

Уравнение линии грани нареза имеет вид $y = f(x)$. Допустим, что за промежуток времени t от начала движения снаряда некоторая точка на его поверхности переместилась в положение $A(x, y)$. Сила $F_{\text{нар}}$ реакции грани нареза, направленная по нормали к нарезу, создает силу $F_{\text{н}}$ трения между выступом ведущего пояска и гранью нареза.

Уравнение вращательного движения снаряда имеет вид

$$J_a \frac{d^2 \Psi}{dt^2} = F_{\text{нар}} R N_{\text{нар}} (\cos \alpha_{\text{нар}} - \zeta_v^{\text{тр}} \sin \alpha_{\text{нар}}),$$

где J_a — осевой момент инерции снаряда; Ψ — угловое перемещение снаряда за время движения; $R = d/2$ (d — калибр снаряда); $\alpha_{\text{нар}}$ — угол наклона нарезов канала ствола.

Ордината точки $A(x, y)$ зависит от углового перемещения Ψ снаряда, т. е. $y = R\Psi$, следовательно, $\Psi = f(x)/R$. Продифференцировав это уравнение по времени, получим угловую скорость снаряда:

$$\frac{d\Psi}{dt} = \frac{1}{R} \frac{df(x)}{dx} \frac{dx}{dt}.$$

Тогда угловое ускорение снаряда

$$\frac{d^2 \Psi}{dt^2} = \frac{1}{R} \left(\frac{d^2 f(x)}{dx^2} \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 + \frac{df(x)}{dx} \frac{d^2 x}{dt^2} \right).$$

Поскольку $\frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{dv}{dt}$, $\frac{dx}{dt} = v$, $\frac{df(x)}{dx} = \text{tg } \alpha_{\text{нар}}$, то

$$\frac{d^2 \Psi}{dt^2} = \frac{1}{R} \left(\frac{d^2 f(x)}{dx^2} v^2 + \frac{dv}{dt} \text{tg } \alpha_{\text{нар}} \right).$$

Подставив это выражение в уравнение вращательного движения снаряда, найдем реакцию грани нарезав:

$$F_{\text{нар}} = \frac{J_a}{R^2 N_{\text{нар}}} \left(v^2 \frac{d}{dx} \operatorname{tg} \alpha_{\text{нар}} + \operatorname{tg} \alpha_{\text{нар}} \frac{dv}{dt} \right) \frac{1}{\cos \alpha_{\text{нар}} - \zeta_v^{\text{тр}} \sin \alpha_{\text{нар}}}. \quad (2.9)$$

Запишем ускорение снаряда в форме $\frac{dv}{dt} = \frac{p\pi R^2}{q}$ и введем следующие обозначения:

$$\vartheta = \frac{J_a}{qR^2} \text{ — коэффициент инерции снаряда;}$$

$$\frac{d \operatorname{tg} \alpha_{\text{нар}}}{dx} = K,$$

где $K = (\operatorname{tg} \alpha_{\text{к.н}} - \operatorname{tg} \alpha_{\text{н.н}}) / L_{\text{нар}}$ — коэффициент, учитывающий прогрессивность нарезов; $\alpha_{\text{н.н}}$, $\alpha_{\text{к.н}}$ — начальный и конечный угол наклона нарезов соответственно; $L_{\text{нар}}$ — длина нарезной части канала ствола орудия.

Тогда реакция грани нарезав определится соотношением

$$F_{\text{нар}} = \frac{\vartheta}{N_{\text{нар}}} (p\pi R^2 \operatorname{tg} \alpha_{\text{нар}} + \zeta_{\text{фик}} q v^2) (\cos \alpha_{\text{нар}} - \zeta_v^{\text{тр}} \sin \alpha_{\text{нар}})^{-1}, \quad (2.10)$$

где угол $\alpha_{\text{нар}}$ и скорость v снаряда соответствуют положению его в стволе.

При постоянном угле $\alpha_{\text{нар}}$ нарезов, т. е. при $\frac{d \operatorname{tg} \alpha_{\text{нар}}}{dx} = 0$ и, если принять $\cos \alpha_{\text{нар}} \cong 1$, при $\zeta_v^{\text{тр}} \sin \alpha_{\text{нар}} = 0$, реакция грани нарезав

$$F_{\text{нар}} = \frac{\vartheta}{N_{\text{нар}}} p\pi R^2 \operatorname{tg} \alpha_{\text{нар}}.$$

В этом случае реакция грани нарезав будет максимальна при $p \cong p_{\text{п.г}}^{\text{расч}}$.

В стволе с переменным углом $\alpha_{\text{нар}}$ необходимо найти наибольшее значение реакции грани нарезав по формуле (2.10).

Общая сила сопротивления движению снаряда от реакций граней нарезов задается уравнением

$$\begin{aligned} F_{\text{общ}} &= F_{\text{нар}} (\sin \alpha_{\text{нар}} + \zeta_v^{\text{тр}} \cos \alpha_{\text{нар}}) = \\ &= \vartheta [p\pi R^2 \operatorname{tg} \alpha_{\text{нар}} + \zeta_{\text{фик}} q v^2] \cos \alpha_{\text{нар}} (\operatorname{tg} \alpha_{\text{нар}} + \zeta_v^{\text{тр}}) (\cos \alpha_{\text{нар}} - \zeta_v^{\text{тр}} \sin \alpha_{\text{нар}})^{-1}. \end{aligned}$$

Кроме того, для определения суммарного сопротивления движению необходимо учесть силу трения от реакции ведущего пояса.

Контрольные вопросы

1. Где выше давление пороховых газов — на дне ствола или на дне снаряда?
2. Как влияет температура на максимальное давление пороховых газов?
3. Какие составляющие сил инерции, действующих на снаряд, значимы при проектных расчетах?
4. Какие факторы учитывает коэффициент фиктивной массы снаряда?
5. Какие негативные явления при выстреле могут вызвать касательные силы инерции?
6. Можно ли допустить при расчетах на прочность, что снаряжение артиллерийского снаряда является жидким?
7. Как угол наклона нарезов влияет на силу сопротивления движению снаряда по каналу ствола орудия?

Глава 3. ВЕДУЩИЕ УСТРОЙСТВА

3.1. Расчет на прочность ведущих поясков по истиранию и давлению грани нарезов

На этапе технического проекта после определения нагрузок, действующих на снаряд в канале ствола, определяют *размеры ведущих устройств снаряда*, обеспечивающие их надежное крепление к снаряду во время его движения по стволу.

К **ведущим устройствам**, которые предназначены для центрирования снаряда в канале ствола, предотвращения прорыва пороховых газов и повышения начальной скорости бронебойного сердечника, относятся *ведущие и обтюрирующие пояски* в калиберных снарядах и *поддоны* в подкалиберных. Поддоны бывают тянущего и толкающего типов. Тянущие ведущие устройства могут быть разжимными, прижимными, катушечными и бугельными. Поддоны подкалиберных снарядов состоят из секторов, отделяемых от сердечника при вылете из ствола под воздействием давления пороховых газов и аэродинамического сопротивления воздуха.

Ведущие и обтюрирующие пояски изготовляют из меди, поддоны — из алюминиевых сплавов и композитных материалов.

Размеры ведущих и обтюрирующих поясков выбирают исходя из условий прочности в канале ствола орудия, для чего необходимо знать давление пороховых газов и усилия грани нареза, действующие на пояс.

Нормальное усилие $F_{\text{нар}}$ грани нареза на выступ ведущего пояска, возникающее вследствие сопротивления снаряда вращательному движению (при постоянном угле $\alpha_{\text{нар}}$ наклона нарезав ствол орудия), вычисляют по следующей формуле:

$$F_{\text{нар}} = \pi \frac{p_{\text{п.г}}^{\text{расч}}}{N_{\text{нар}}} \frac{J_a}{q} \operatorname{tg} \alpha_{\text{нар}}, \quad (3.1)$$

где $p_{\text{п.г}}^{\text{расч}}$ — расчетное давление пороховых газов, $p_{\text{п.г}}^{\text{расч}} \approx 1,1 p_{\text{п.г}}^{\text{max}}$; $N_{\text{нар}}$ — число нарезав; J_a — осевой момент инерции; q — масса снаряда.

Напряжение $\sigma_{\text{в.п}}$ в выступе ведущего пояска определяют как отношение усилия $F_{\text{нар}}$ грани нареза к площади $S_{\text{в.п}}$ рабочей стороны выступа ведущего пояска (рис. 3.1):

$$\sigma_{\text{в.п}} = \frac{F_{\text{нар}}}{S_{\text{в.п}}} = \pi \frac{p_{\text{п.г}}^{\text{расч}}}{N_{\text{нар}} S_{\text{в.п}}} \frac{J_a}{q} \operatorname{tg} \alpha_{\text{нар}}, \quad (3.2)$$

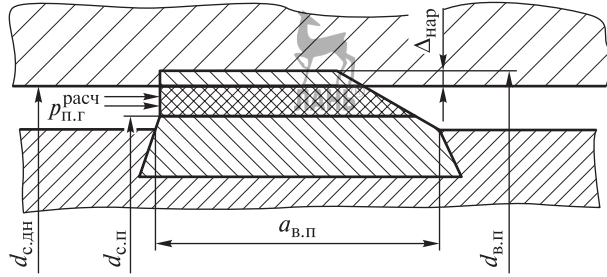


Рис. 3.1. Ведущий поясок, врезающийся в нарезы под действием давления пороховых газов:

$d_{с.дн}$ — диаметр ствола по дну нарезов; $d_{с.п}$ — диаметр ствола по полям нарезов; $d_{в.п}$ — диаметр ведущего пояска

причем $S_{в.п}$ вычисляют по формуле

$$S_{в.п} = a_{в.п} \Delta_{нар}, \quad (3.3)$$

где $a_{в.п}$ — ширина ведущего пояска; $\Delta_{нар}$ — глубина нарезов.

Выразив потребную *ширину* $a_{в.п}$ *ведущего пояска* из формул (3.2) и (3.3), получим зависимость

$$a_{в.п} = \pi \frac{p_{п.г}^{расч}}{N_{нар} \Delta_{нар} [\sigma]} \frac{J_a}{q} \operatorname{tg} \alpha_{нар}, \quad (3.4)$$

где $[\sigma]$ — допустимое напряжение.

Выступы на ведущем пояске, образующиеся в процессе его врезания в нарезы ствола, не должны чрезмерно истираться о грани нарезов при движении снаряда по каналу ствола орудия. Характеристикой истираемости ведущего пояска служит *работа A_t силы трения выступа ведущего пояска о грань нареза ствола орудия.*

Сила трения на поверхности прилегания выступа ведущего пояска к грани нареза задается равенством

$$F_{т.в.п} = \zeta_{в.п} F_{нар},$$

где $\zeta_{в.п}$ — коэффициент трения металла ведущего пояска о металл стенок ствола орудия.

Работа силы трения на всем пути $l_{к.с}$ движения снаряда в канале ствола орудия

$$A_t = \int_0^{l_{к.с}} \zeta_{в.п} F_{нар} \frac{dl}{\cos \alpha_{нар}}. \quad (3.5)$$

Удельная работа силы трения, т. е. работа, отнесенная к единице площади соприкосновения выступа ведущего пояска с гранью нареза,

$$A_{\tau}^{\text{уд}} = \frac{A_{\tau}}{\Delta_{\text{нар}} a_{\text{в.п}}} = \frac{\zeta_{\text{в.п}}}{\Delta_{\text{нар}} a_{\text{в.п}} \cos \alpha_{\text{нар}}} \int_0^{l_{\text{к.с}}} F_{\text{нар}} dl. \quad (3.6)$$

Подставив в формулу (3.6) значение усилия грани нареза с постоянным углом $\alpha_{\text{нар}}$ наклона, вычисляемое по формуле (3.1), получим выражение для работы A_{τ} силы трения:

$$A_{\tau} = \frac{J_a}{q} \frac{\pi \zeta_{\text{в.п}} \operatorname{tg} \alpha_{\text{нар}}}{\Delta_{\text{нар}} a_{\text{в.п}} \cos \alpha_{\text{нар}}} \int_0^{l_{\text{к.с}}} p dl, \quad (3.7)$$

где p — давление пороховых газов.

Поскольку работа пороховых газов приближенно равна кинетической энергии снаряда, т. е. $\pi R^2 \int_0^{l_{\text{к.с}}} p dl = \frac{q v_0^2}{2}$ (здесь $R = d/2$ (d — калибр снаряда); v_0 — дульная (начальная) скорость снаряда), работа силы трения

$$A_{\tau} = \frac{J_a v_0^2}{2 R^2} \frac{\zeta_{\text{в.п}} \operatorname{tg} \alpha_{\text{нар}}}{\Delta_{\text{нар}} a_{\text{в.п}} \cos \alpha_{\text{нар}}}. \quad (3.8)$$

Условие прочности ведущего пояска при выстреле задано неравенством

$$A_{\tau} \leq [A_{\tau}],$$

где $[A_{\tau}]$ — допустимая работа силы трения, при которой грань не истирается при выстреле.

Выразив потребную ширину ведущего пояска из формулы (3.8), получим зависимость

$$a_{\text{в.п}} = \frac{J_a v_0^2}{2 R^2} \frac{\zeta_{\text{в.п}} \operatorname{tg} \alpha_{\text{нар}}}{\Delta_{\text{нар}} [A_{\tau}] \cos \alpha_{\text{нар}}}. \quad (3.9)$$

За ширину ведущего пояска принимается наибольшее из вычисленных по формулам (3.4) и (3.9) значений.

На этапе технического проекта необходимо определить также *способ крепления ведущего пояска к корпусу снаряда* — это может быть запрессовка или контактная сварка.

3.2. Прочность ведущего пояска под действием центробежных сил

Рассмотрим часть объема ведущего пояска, выделенную двумя плоскостями, которые проходят через ось симметрии снаряда и образуют между собой малый угол $d\varphi$ (рис. 3.2).

На рис. 3.2 приняты следующие обозначения: $R_{\text{в.п}}$ — радиус срединной поверхности обжато́го ведущего пояска; φ — угол наклона одной из выбранных плоскостей; $d\varphi$ — двугранный угол между плоскостями, отсекающими

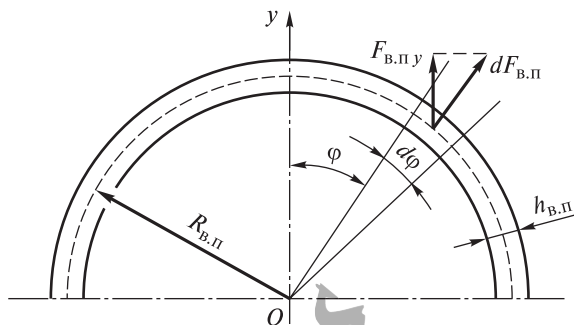


Рис. 3.2. Разрывающее усилие ведущего пояса

элемент ведущего пояса; $F_{\text{в.п.у}}$ — проекция центробежной силы на ось Oy ; $dF_{\text{в.п.}}$ — центробежная сила, действующая на выделенный элемент; $h_{\text{в.п.}}$ — толщина обжатого ведущего пояса, которая примерно равна половине разности диаметра канала ствола орудия по дну нарезов и диаметра канавки под ведущий пояс.

Масса выделенного элемента ведущего пояса $dq_{\text{в.п.}} = a_{\text{в.п.}} h_{\text{в.п.}} R_{\text{в.п.}} \rho_{\text{в.п.}} d\varphi$ (где $\rho_{\text{в.п.}}$ — плотность металла ведущего пояса), а центробежная сила, действующая на выделенный элемент,

$$dF_{\text{в.п.}} = R_{\text{в.п.}} \Omega^2 dq_{\text{в.п.}},$$

где Ω — угловая скорость вращения снаряда.

Наибольшая центробежная сила развивается при выходе снаряда из канала ствола, т. е. при начальной угловой скорости $\Omega_0 = \frac{\pi v_0}{\eta R}$, где η — длина хода нарезов в калибрах.

Радиус срединной поверхности обжатого ведущего пояса близок по значению к $R = d/2$, т. е. $R_{\text{в.п.}} \cong R$, тогда

$$dF_{\text{в.п.}} = a_{\text{в.п.}} h_{\text{в.п.}} \rho_{\text{в.п.}} \frac{\pi^2}{\eta^2} v_0^2 d\varphi.$$

Проекция центробежной силы на ось Oy

$$dF_{\text{в.п.у}} = dF_{\text{в.п.}} \cos \varphi.$$

Разрывающее усилие состоит из суммы проекций на ось Oy центробежных сил элементарных масс ведущего пояса:

$$F_{\text{в.п.}} = a_{\text{в.п.}} h_{\text{в.п.}} \rho_{\text{в.п.}} \frac{\pi^2}{\eta^2} v_0^2 \int_0^{\pi/2} \cos \varphi d\varphi = a_{\text{в.п.}} h_{\text{в.п.}} \rho_{\text{в.п.}} \frac{\pi^2}{\eta^2} v_0^2.$$

В металле ведущего пояса возникают напряжения растяжения

$$\sigma_{\text{в.п.}} = F_{\text{в.п.}} / S_{\text{в.п.}},$$

где $S_{в.п} = a_{в.п}(h_{в.п} - \Delta_{нар})$ — площадь поперечного сечения ведущего пояска, по которому может произойти его разрыв.

Если глубина нарезов по отношению к толщине ведущего пояска мала ($\Delta_{нар} \ll h_{в.п}$), то

$$\sigma_{в.п} = \frac{\rho_{в.п} \pi^2 v_0^2}{\eta^2}.$$

Напряжения растяжения, возникающие в металле ведущего пояска из кольцевой заготовки, не зависят от его конструкции, а определяются углом $\alpha_{нар}$ наклона нарезов ствола, начальной скоростью v_0 снаряда и плотностью $\rho_{в.п}$ материала ведущего пояска.

Условие прочности крепления ведущего пояска задается неравенством $\sigma_{в.п} \leq [\sigma_{в.п}]$. Значение допустимых напряжений $[\sigma_{в.п}]$ можно рассчитать по пределу прочности материала с учетом коэффициента запаса, рекомендуемое значение которого лежит в диапазоне 1,6...2,0.

Для ведущего пояска из прутковой заготовки на корпусе снаряда выполняют кольцевую канавку с профилем в виде ласточкиного хвоста, при установке в которую образуется стык торцов, являющийся слабым местом ведущего пояска.

Центробежную силу, действующую на единицу ширины $a_{в.п}$ ведущего пояска (рис. 3.3), можно определить с помощью соотношения

$$dF_{в.п} = \frac{F_{в.п}}{a_{в.п}} = dq_{в.п} R_{в.п} \Omega^2 = h_{в.п} \rho_{в.п} \frac{\pi^2 v_0^2}{\eta^2 R}.$$

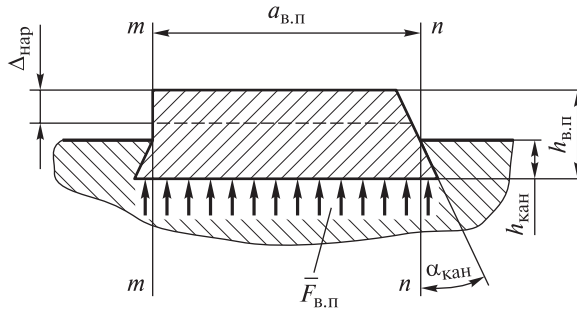


Рис. 3.3. Схема действия центробежных сил на ведущий пояс

Представим выделенную часть ведущего пояска в виде опирающейся на две опоры балки, нагруженной равномерно распределенной силой $\bar{F}_{в.п}$:

$$\bar{F}_{в.п} = \frac{F_{в.п}}{a_{в.п}} = h_{в.п} \rho_{в.п} \frac{\pi^2 v_0^2}{\eta^2 R}.$$

Под действием этой нагрузки балка может быть смята, срезана на опорах или прогнута.

Реакции опор в сечениях $m-m$ и $n-n$ (см. рис. 3.3) равны между собой:

$$F_m = F_n = \frac{F_{в.п} a_{в.п}}{2} = \frac{1}{2} a_{в.п}^2 h_{в.п} \rho_{в.п} \frac{\pi^2 v_0^2}{\eta^2 R}.$$

Напряжение смятия определено выражением

$$\sigma_{см} = \frac{F_m}{S_{см}} = \frac{1}{2} a_{в.п} h_{в.п} \rho_{в.п} \frac{\pi^2 v_0^2}{\eta^2 R h_{кан} \operatorname{tg} \alpha_{кан}},$$

где $S_{см} = a_{в.п} h_{кан} \operatorname{tg} \alpha_{кан}$ — площадь смятия; $h_{кан}$ — глубина кольцевой канавки под ведущий пояс; $\alpha_{кан}$ — угол наклона торца канавки.

Для того чтобы не произошло смятия ведущего пояса на его опорах, значение $\sigma_{см}$ не должно превышать допустимого напряжения смятия $[\sigma_{см}]$ металла ведущего пояса. Поэтому *первым условием прочности крепления ведущего пояса* является неравенство

$$\frac{1}{2} a_{в.п} h_{в.п} \rho_{в.п} \frac{\pi^2 v_0^2}{\eta^2 R h_{кан} \operatorname{tg} \alpha_{кан}} \leq [\sigma_{см}]. \quad (3.10)$$

Усилие, которое может срезать опорные выступы части ведущего пояса по линиям $m-m$ или $n-n$, равно реакциям опор $F_m = F_n$, причем площадь среза $S_{ср} = a_{в.п} h_{кан}$.

Для удобства расчетов запишем выражение (3.10) через $h_{кан}$:

$$h_{кан} \geq \frac{1}{2} a_{в.п} h_{в.п} \rho_{в.п} \frac{\pi^2 v_0^2}{\eta^2 R [\sigma_{см}] \operatorname{tg} \alpha_{кан}}. \quad (3.11)$$

Поскольку допустимое напряжение среза $[\tau] = 0,5[\sigma]$, *вторым условием прочности крепления ведущего пояса* является неравенство

$$a_{в.п} h_{в.п} \rho_{в.п} \frac{\pi^2 v_0^2}{\eta^2 R h_{кан} \operatorname{tg} \alpha_{кан}} \leq [\tau]. \quad (3.12)$$

Для удобства расчетов выражение (3.12) запишем через $h_{кан}$:

$$h_{кан} \geq a_{в.п} h_{в.п} \rho_{в.п} \frac{\pi^2 v_0^2}{\eta^2 R [\tau] \operatorname{tg} \alpha_{кан}}. \quad (3.13)$$

Если рассматривать часть ведущего пояса как балку, расположенную на двух опорах и нагруженную равномерно распределенной силой $\bar{F}_{в.п}$, то наибольший изгибающий момент в середине пролета $J_{и}^{\max} = \frac{1}{8} \bar{F}_{в.п} a_{в.п}^2$, а момент сопротивления изгибу сечения части ведущего пояса без отпечатков нарезав канала ствола орудия

$$J_{\text{сопр}} = \frac{a_{\text{в.п}}}{6} \left(\frac{h_{\text{в.п}} - \Delta_{\text{нар}}}{2} \right)^2.$$

Третьим условием прочности крепления ведущего пояска является неравенство

$$\frac{3}{4} a_{\text{в.п}} h_{\text{в.п}} \rho_{\text{в.п}} \frac{\pi^2 v_0^2}{\eta^2 R (h_{\text{в.п}} - 0,5 \Delta_{\text{нар}})^2} \leq [\sigma_{\text{и}}], \quad (3.14)$$

где $[\sigma_{\text{и}}]$ — допустимое напряжение изгиба.

Следовательно, прочность крепления ведущего пояска, изготовленного из прутковой заготовки, зависит от калибра d снаряда, ширины $a_{\text{в.п}}$ и толщины $h_{\text{в.п}}$ ведущего пояска, угла $\alpha_{\text{нар}}$ наклона нарезов ствола орудия, начальной скорости v_0 снаряда и угла $\alpha_{\text{кан}}$ наклона торца канавки под ведущий поясок.

С увеличением калибра снаряда при прочих равных условиях пропорционально увеличивается предельно возможная ширина пруткового ведущего пояска. Глубину канавки под ведущий поясок рекомендуется принимать не более $(0,02 \dots 0,03)d$. Угол $\alpha_{\text{кан}}$ наклона торца канавки под ведущий поясок влияет на значение напряжений смятия на поверхности торцов. Увеличение этого угла ограничивается возможностью запрессовки заготовки в кольцевую канавку, так как при больших значениях $\alpha_{\text{кан}}$ не удастся заполнить металлом острые углы канавки. В связи с этим угол наклона торца канавки под ведущий поясок рекомендуется делать не более $15 \dots 20^\circ$ и сопрягать его с поверхностью дна канавки по дуге окружности, радиус которой $r = 0,5 \dots 1,0$ мм.

Расчет на прочность ведущих устройств бронебойных подкалиберных снарядов различных схем (рис. 3.4) проводится по напряжениям среза.

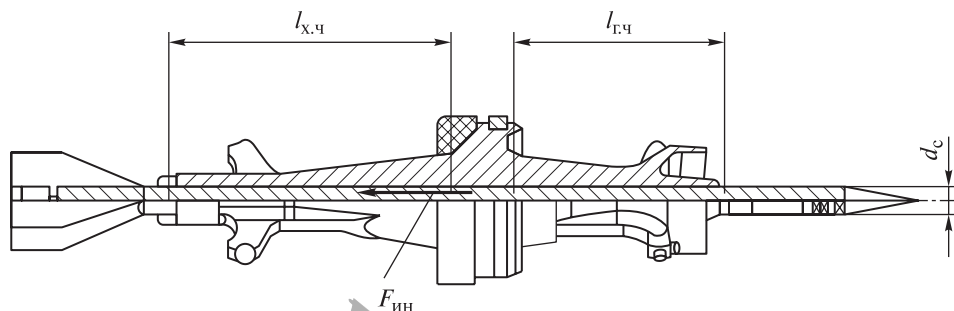


Рис. 3.4. Ведущее устройство бронебойного подкалиберного снаряда

Напряжение $\tau_{\text{ср}}$ среза не должно превышать допустимого значения:

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{F_{\text{ин}}}{\pi d_c l_{\text{р.ч}}} \leq [\tau], \quad (3.15)$$

где $F_{\text{ин}}$ — осевая сила инерции; d_c — средний диаметр резьбы сердечника; $l_{\text{р.ч}}$ — длина резьбы.

В выражении (3.15) для головной части корпуса снаряда

$$F_{\text{ин}} = p_{\text{п.г}}^{\text{расч}} \frac{\pi d^2}{4} \frac{q_{\text{г.ч}}}{q}; \quad l_{\text{р.ч}} = l_{\text{г.ч}},$$

а для хвостовой части

$$F_{\text{ин}} = p_{\text{п.г}}^{\text{расч}} \frac{\pi d^2}{4} \frac{q_{\text{х.ч}}}{q}; \quad l_{\text{р.ч}} = l_{\text{х.ч}},$$

где $q_{\text{г.ч}}, l_{\text{г.ч}}$ — масса и длина головной части корпуса снаряда (со стабилизатором) соответственно; $q_{\text{х.ч}}, l_{\text{х.ч}}$ — масса и длина хвостовой части корпуса снаряда (со стабилизатором) соответственно.

На этапе технического проекта по изготовлению ведущих устройств бронебойных подкалиберных снарядов необходимо найти предприятие-исполнителя, которое способно изготовить секторы ведущего устройства в соответствии с заданными требованиями к параллельности и форме поверхностей для обеспечения надежного их отделения на траектории полета.

3.3. Расчет на прочность зубцов гребенки подкалиберного снаряда

При выстреле бронебойным подкалиберным снарядом на зубцы ходовой резьбы секторов его ведущего устройства действует осевая сила $F_{\text{зб}}$, равная разности силы инерции от массы подкалиберного снаряда и силы, обусловленной давлением пороховых газов на хвостовую (донную) часть корпуса, т. е.

$$F_{\text{зб}} = p_{\text{п.г}}^{\text{расч}} \frac{\pi d^2}{4} \frac{q_{\text{н}}}{q} - p_{\text{п.г}}^{\text{расч}} \frac{\pi d_{\text{х.ч}}^2}{4},$$

или

$$F_{\text{зб}} = p_{\text{п.г}}^{\text{расч}} \frac{\pi d^2}{4} \left[\frac{q_{\text{н}}}{q} - \left(\frac{d_{\text{х.ч}}}{d} \right)^2 \right], \quad (3.16)$$

где $q_{\text{н}}$ — наседающая масса; $d_{\text{х.ч}}$ — диаметр хвостовой части корпуса снаряда.

Количество зубцов гребенки сектора задается равенством

$$N_{\text{зб}} = h_{\text{тр}} / Z,$$

где $h_{\text{тр}}$ — высота гребенки сектора; Z — шаг резьбы.

Для штатных бронебойно-подкалиберных оперенных снарядов принят профиль зубцов резьбовой гребенки сектора, представленный на рис. 3.5, а. Резьба гребенки — прямоугольная. Контакт зубцов гребенки сектора с соответствующими зубцами гребенки корпуса подкалиберного снаряда приведен на рис. 3.5, б.

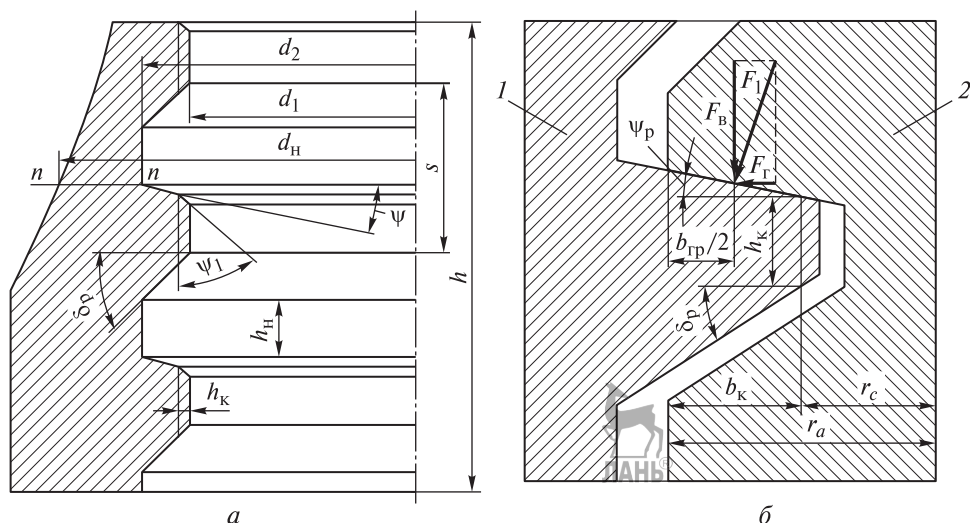


Рис. 3.5. Профиль резьбовой гребенки сектора (а) и контакт зубцов гребенки сектора с зубцами корпуса (б):

1 — сектор; 2 — корпус

Примем допущение о равномерном распределении силы между зубцами гребенки, тогда сила, действующая на один виток гребенки сектора,

$$F_1 = F_{36}/N_{36}.$$

Расхождение зубцов гребенки сектора относительно зубцов корпуса подкалиберного снаряда происходит вследствие износа канала ствола, истирания обтюрирующего пояска и колебаний допусков (на калибр ствола и снаряда).

При наличии у опорной поверхности зубца гребенки угла \$\psi_p\$ скоса резьбы сила \$F_1\$ распределяется на вертикальную \$F_B\$ и горизонтальную \$F_r\$ составляющие:

$$F_B = F_1 \cos \psi_p; \quad F_r = F_1 \sin \psi_p.$$

Для малых углов \$\psi_p\$ можно принять, что

$$F_B = F_1; \quad F_r = F_1 \cos \psi_p. \quad (3.17)$$

Отношение $\frac{F_r}{F_B} = \tan \psi_p$.

Под действием вертикальной составляющей силы \$F_B = F_1\$ в каждом зубце гребенки сектора возникают напряжения \$\tau_{ср}\$ среза, \$\sigma_{см}\$ смятия и \$\sigma_{изг}\$ изгиба.

Напряжения среза

$$\tau_{ср} = \frac{F_1}{S_{ср}}.$$

Здесь площадь среза

$$S_{\text{ср}} = 2\pi \left(r_a - \frac{b_{\text{к}}}{2} \right) \left[h_{\text{к}} - \frac{b_{\text{к}}}{2} (\text{tg} \psi_{\text{п}} + \text{tg} \delta_{\text{п}}) \right], \quad (3.18)$$

где r_a , $b_{\text{к}}$, $\psi_{\text{п}}$, $\delta_{\text{п}}$ — размеры зубца резьбовой канавки (см. рис. 3.5, б); $h_{\text{к}}$ — высота зубца гребенки сектора на границе контактной площадки (см. рис. 3.5, а);

Используя формулы (3.16)–(3.18), для числа $N_{\text{зб}}$ зубцов получим выражение для напряжений среза

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{p_{\text{п.г}}^{\text{расч}} d^2}{4N_{\text{зб}}(2r_a - b_{\text{гр}}) \left[h_{\text{в}} + 0,5b_{\text{гр}} (\text{tg} \psi_{\text{п}} + \text{tg} \delta_{\text{п}}) \right]} \left[\frac{q_{\text{н}}}{q} - \left(\frac{d_{\text{н}}}{d} \right)^2 \right], \quad (3.19)$$

где $b_{\text{гр}}$ — ширина зубца гребенки сектора (см. рис. 3.5, б).

Условие прочности определено неравенством

$$\tau_{\text{ср}} \leq \frac{\sigma_{0,2}}{\sqrt{3}} = 0,57\sigma_{0,2},$$

где $\sigma_{0,2}$ — условный предел текучести материала сектора.

Напряжения смятия зубца гребенки сектора

$$\sigma_{\text{см}} = \frac{F_1}{S_{\text{см}}}, \quad (3.20)$$

где $S_{\text{см}} = \pi(r_a^2 - r_c^2)$ — площадь смятия.

Подставив в (3.20) выражение (3.16) для $F_{\text{зб}}$, получим

$$\sigma_{\text{см}} = \frac{p_{\text{п.г}}^{\text{расч}} d^2}{4N_{\text{зб}}(r_a^2 - r_c^2)} \left[\frac{q_{\text{н}}}{q} - \left(\frac{d_{\text{н}}}{d} \right)^2 \right]. \quad (3.21)$$

При этом условие прочности имеет вид $\sigma_{\text{см}} < \sigma_{0,2}$.

Напряжения изгиба зубца гребенки сектора можно вычислить следующим образом:

$$\sigma_{\text{н}} = \frac{F_1}{J} \left(r_a - \frac{b_{\text{гр}}}{2} \right) = \frac{6F_1}{2\pi r_a h_{\text{к}}^2} \left(r_a - \frac{b_{\text{гр}}}{2} \right) = \frac{3F_1}{\pi r_a h_{\text{к}}^2} \left(r_a - \frac{b_{\text{гр}}}{2} \right),$$

где $J = \frac{2\pi}{6} r_a h_{\text{к}}^2$ — момент сопротивления изгибу.

Используя выражение (3.16), получим

$$\sigma_n = \frac{3p_{п.г}^{расч} d^2}{4N_{зб} r_a h_k^2} \left[\frac{q_n}{q} - \left(\frac{d_n}{d} \right)^2 \right] \left[\left(\frac{r_a}{2} + \frac{b_{гр}}{2} \right) \right]. \quad (3.22)$$

При этом условие прочности имеет вид $\sigma_n < \sigma_{0,2}$.

На этапе технического проекта необходимо определить также *способ изготовления резьбовой канавки* на ведущем устройстве, обеспечивающий заданные прочностные характеристики.

Контрольные вопросы

1. Какие факторы являются определяющими при выборе размеров ведущих поясков артиллерийских снарядов?
2. Как допустимая работа силы трения влияет на размеры ведущего пояска?
3. Как изменятся размеры ведущего пояска при увеличении:
 - а) числа нарезов ствола орудия;
 - б) угловой скорости вращения снаряда?
4. Почему в ведущих устройствах бронебойных подкалиберных снарядов применяется ходовая резьба? Почему нельзя использовать винтовую резьбу?
5. Каковы причины расхождения зубцов гребенки ведущего устройства относительно зубцов корпуса снаряда?
6. Как повлияет изменение калибра снаряда на ширину ведущего пояска при прочих равных условиях?
7. К каким негативным последствиям приведет увеличение глубины канавки под ведущий поясок?



Глава 4. ОСКОЛОЧНО-ФУГАСНЫЕ И КУМУЛЯТИВНЫЕ СНАРЯДЫ

4.1. Назначение и классификация осколочно-фугасных снарядов

Осколочно-фугасные снаряды (ОФС) (рис. 4.1) поражают цель за счет инициируемого взрывателем подрыва разрывного заряда взрывчатого вещества (ВВ) и потока осколков, возникающих при естественном дроблении корпуса. Взрыватель ОФС срабатывает либо в момент встречи снаряда с преградой, либо на некотором расстоянии от нее. Срабатывание взрывателя может происходить с некоторой задержкой.

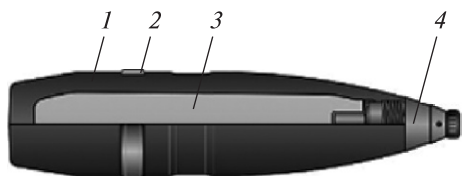


Рис. 4.1. Конструкция ОФС:

1 — корпус; 2 — ведущий пояс; 3 — разрывной заряд; 4 — взрыватель

Осколочно-фугасные снаряды предназначены для поражения огневых средств пехоты, живой силы, полевых сооружений, малоразмерных и слабобронированных боевых машин и

военных машин обеспечения. Благодаря своей универсальности и возможности поражения широкого спектра целей они входят практически во все боевые комплекты наземных, морских и танковых ствольных артиллерийских систем.

В ОФС используются такие ВВ, как тротил и А-IX-2, снаряжаемые литьем и порционным прессованием соответственно.

Осколочно-фугасные снаряды классифицируют следующим образом.

По типу стабилизации на траектории различают ОФС, стабилизируемые вращением или оперением.

По типу систем оружия ОФС подразделяют на используемые в морских, наземных, танковых, береговых системах, а также в противотанковых и малокалиберных авиационных пушках.

По типу выстрела различают ОФС, применяемые для унитарного выстрела и выстрела с раздельно-гильзовым или картузным заряданием.

В ОФС используются механические контактные взрывательные устройства (ВУ) многоцелевого назначения, головные по размещению и имеющие несколько установок времени срабатывания взрывателя — мгновенное, инерционное и замедленное. Различаются взрыватели для пушечных и гаубичных систем. В ОФС к малокалиберным выстрелам зенитной и авиационной артиллерии предъявляют требование срабатывания от преград из

дюралюминия толщиной 2 мм при скорости встречи 300 м/с и требование разрыва 10...30 см за обшивкой самолета.

Для повышения эффективности действия в ОФС применяют *электронные ВУ*, управление которыми осуществляется с помощью сигналов от системы управления огнем по индуктивной связи между установщиком и взрывателем (на требуемое время дистанционного действия взрыватели устанавливаются автоматически). Электронные ВУ предназначены для мгновенного действия по преграде, замедленного действия по грунту и авторегулируемому запреградному действию при стрельбе по прочным преградам (кирпичным и бетонным сооружениям); на требуемый вид действия электронные ВУ устанавливаются автоматически.

Для стрельбы из самоходной артиллерийской установки (САУ) на большие дальности по площадям и укрытой в окопах живой силе противника применяют ОФС с *многофункциональным взрывателем*. Данный взрыватель имеет контактное (мгновенное и авторегулируемое запреградное) и неконтактное действие на требуемой высоте подрыва, которая устанавливается во взрывателе перед выстрелом.

К снарядам 100- и 130-миллиметровых пушек морской артиллерии разработан многофункциональный электронный неконтактно-контактный взрыватель для осколочных снарядов и ОФС. Такой взрыватель, обладая всеми характеристиками артиллерийского взрывателя к САУ, может поражать как высоколетящие воздушные цели, так и низколетящие противокорабельные крылатые ракеты. В этом случае датчик работает не только в режиме дальномера, но и в режиме Доплера с соответствующей обработкой сигнала.

В противокорабельных снарядах морской артиллерии применяют контактные механические ВУ донного размещения, срабатывающие после проникновения в заброневое пространство. При ударе снаряда о броню взрыватель испытывает значительные механические воздействия, поэтому необходимо обеспечить высокую прочность конструкции взрывателя и его надежное крепление в донной части снаряда. Многообразие целей и разная толщина брони обусловили использование авторегулируемого замедления.

Для повышения могущества осколочного действия ОФС могут быть выполнены с блоками готовых поражающих элементов (ГПЭ), которые обладают более высоким пробивающим действием и улучшенными аэродинамическими свойствами в отличие от осколков, возникающих при дроблении корпусов ОФС. Такие снаряды называются *осколочно-шрапнельными снарядами* (ОШС). Они состоят из корпуса, блока готовых поражающих элементов, разрывного заряда и ВУ с неконтактным воздушным подрывом (рис. 4.2).

Возможность пробивания прочных преград обеспечивается за счет бронебойного свода (рис. 4.3). Снаряды с бронебойным сводом называются *полубронебойными*. В таком снаряде используется контактный взрыватель с установками на инерционное и замедленное действие, он размещается в донной части.

В настоящее время ОФС, *стабилизируемые вращением*, применяют в наземных артиллерийских системах калибра 30, 100 и 152 мм, в корабельных артиллерийских системах калибра 100 и 130 мм, а ОФС, *стабилизируемые оперением*, — в танковых пушках калибра 125 мм.

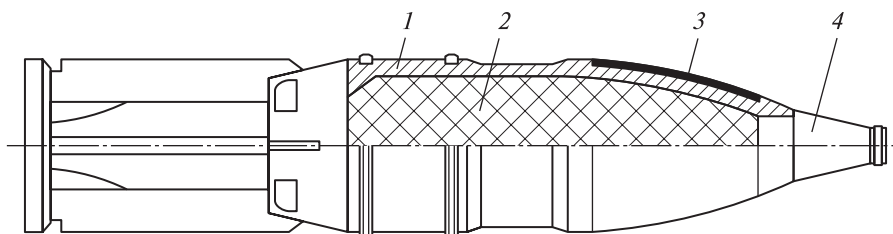


Рис. 4.2. Конструкция ОШС:

1 — корпус; 2 — разрывной заряд; 3 — блок ГПЭ; 4 — взрыватель

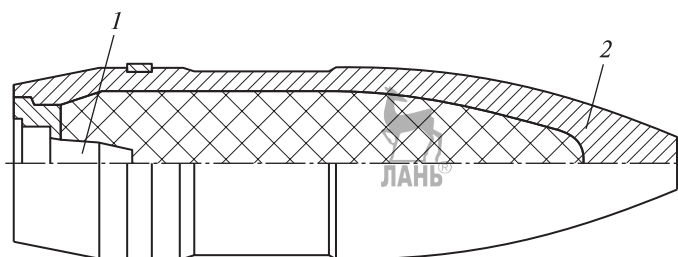


Рис. 4.3. Конструкция полубронебойного снаряда:

1 — донный узел инициирования; 2 — бронебойный свод

Максимальная эффективность поражающего действия у ОФС достигается при коэффициенте наполнения снаряда (отношения массы разрывного заряда к массе снаряда), равном 0,21...0,22. Для ОФС корабельной артиллерии коэффициент наполнения равен 0,11. Корпус ОФС и его составные части должны выдерживать нагрузки, возникающие в момент действия максимального давления пороховых газов в канале ствола.

На этапе *эскизного проектирования* необходимо:

- назначить толщину стенки корпуса ОФС — внутренний радиус цилиндрической части корпуса в сечениях 2—2, 3—3 (рис. 4.4) равен примерно

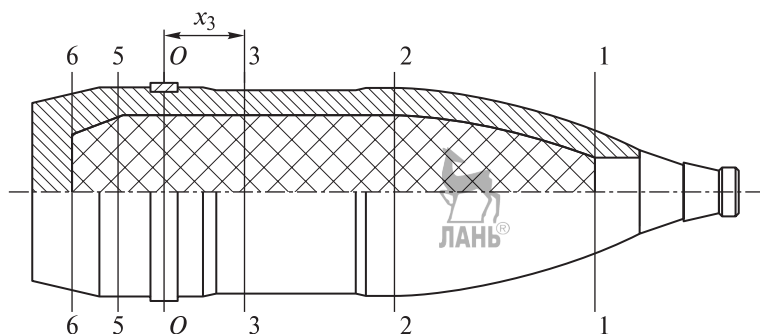


Рис. 4.4. Расчетные сечения в ОФС

$0,375d$ (где d — калибр снаряда); толщина дна и толщина стенки в сечении 6—6 составляют 1,2 толщины стенки в сечении 3—3;

- выбрать тип и расположение взрывателя, соответствующие целевому назначению ОФС;

- вычислить массу ОФС, которая может отклоняться от массы штатного снаряда не более чем на 5 % в большую или меньшую сторону. Для снарядов к наземным артиллерийским системам калибра 30, 100 и 152 мм масса равна 0,4, 15,6 и 43,56 кг соответственно, для снарядов к корабельным артиллерийским системам калибра 100 и 130 мм — 15,6 и 33,4 кг соответственно. Для снарядов к танковым пушкам калибра 125 мм масса равна 23 кг;

- провести расчет на прочность стенок корпуса и дна ОФС;
- провести расчет на прочность составных частей ОФС — привинтной головки, диафрагмы и запального стакана;

- определить внешнюю форму ОФС, обеспечивающую наилучшие аэродинамические свойства;

- определить величину нарезов или параметры оперения для снарядов, стабилизируемых соответственно вращением или оперением на траектории.

На этапе *технического проекта* необходимо обеспечить возможность изготовления корпуса ОФС из стали с требуемыми характеристиками (пределом прочности $\sigma_{0,2}$ и относительным удлинением после разрыва). В настоящее время таким характеристикам наилучшим образом удовлетворяет сталь 60С2.

На этапе *предварительных испытаний* ОФС проверяют на полноту разрыва, прочность функционирования, стойкость снаряжения при выстреле, а также на осколочное действие в броняе и щитовой мишенной обстановке.

4.2. Назначение и принципы проектирования кумулятивных снарядов

Кумулятивные снаряды предназначены для поражения сильнозащищенных бронеобъектов с помощью высокоскоростной металлической струи (скорость 7...12 км/с), формируемой при обжатии, например, кумулятивной медной облицовки кумулятивного узла продуктами взрыва разрывного заряда, и входят в состав боевых комплектов танковых и противотанковых пушек.

Кумулятивные снаряды содержат следующие конструктивные узлы:

- кумулятивный узел, который помещен в корпус, выполненный из высокопрочной стали;

- привинтная головная часть (как правило, ступенчатой формы), высота которой достаточна для нормального формирования кумулятивной струи при подрыве кумулятивного узла;

- обтюрирующий пояс;

- оперение, предназначенное для стабилизации кумулятивного снаряда на траектории;

- головное или головодонное ВУ.

Взрывательные устройства к кумулятивным снарядам должны обладать минимальным временем срабатывания, обеспечивать срабатывание при различных углах встречи с броней вплоть до $70...80^\circ$ от нормали. Конструктивные элементы ВУ не должны снижать могущество действия кумулятивного узла, поэтому корпус и другие детали головных взрывателей изготавливают из легких алюминиевых сплавов и небольших габаритных размеров. Кроме того, к ВУ кумулятивных снарядов предъявляются требования по избирательности действия: они не должны срабатывать при встрече с легкими естественными преградами (ветки деревьев, кустарников), с маскировочными сетями и искусственными экранами, устанавливаемыми перед броней. Предъявляется также требование по их срабатыванию при первом падении на грунт (в случае промаха по цели), что обеспечивает эффект поражения пехоты и небронированной техники, сопровождающей танки.

Кумулятивные снаряды применяют в гладкоствольных танковых и противотанковых пушках калибра 100, 115 и 125 мм.

Для обеспечения ведения кумулятивного снаряда по гладкому стволу используется обтюрирующий поясok 3 (рис. 4.5).

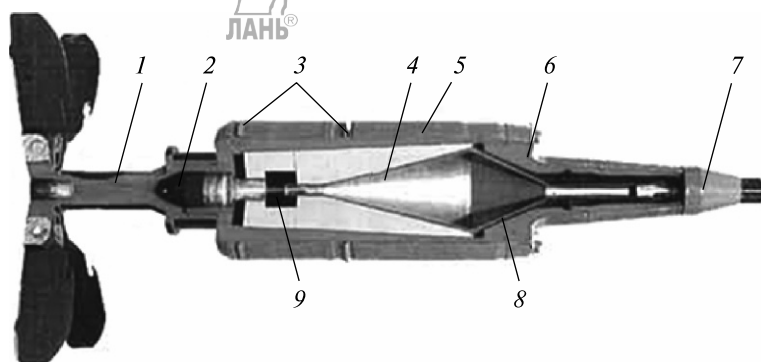


Рис. 4.5. Кумулятивный снаряд к танковой пушке:

1 — блок оперения; 2 — донный узел инициирования; 3 — обтюрирующий поясok; 4 — кумулятивная облицовка; 5 — корпус; 6 — головная часть; 7 — взрыватель контактного типа; 8 — защитный конус; 9 — линза кумулятивного узла

На этапе *эскизного проектирования* кумулятивного снаряда необходимо:

- задать размеры кумулятивного узла, головной части, узла оперения, корпуса снаряда (толщина стенки корпуса кумулятивного снаряда $h_{\text{стн}} = (0,07...0,10)d$; отношение диаметра линзы к диаметру заряда $d_{\text{л}}/d_3 = 0,50...0,65$; отношение высоты кумулятивной облицовки к диаметру заряда $h_0/d_3 = 1,7...1,9$; отношение толщины облицовки к диаметру заряда $\delta_0/d_3 = 0,025...0,035$; общая длина снаряда $L_{\text{сн}} = (5...7)d$;
- провести расчет на прочность привинтной головной части;
- провести расчет на прочность корпуса кумулятивного снаряда;
- провести расчет на прочность хвостовой части блока оперения и пьезов стабилизатора;

- выбрать параметры узла оперения для обеспечения статической устойчивости.

На этапе *технического проекта* необходимо обеспечить:

- изготовление кумулятивной облицовки с заданными отклонениями допусков по овальности, разностенности, размеров зерна;
- изготовление корпуса кумулятивного снаряда с заданными отклонениями от толщины стенки;
- изготовление заряда ВВ с допустимыми отклонениями по разноплотности, разностенности, асимметрии зазора между корпусом и зарядом ВВ;
- соосность линзового узла с кумулятивной облицовкой и разрывным зарядом ВВ;
- отсутствие зазоров и перекосов между отдельными деталями (составными элементами) кумулятивного узла, возникающих при снаряжении и сборке кумулятивного заряда.

На этапе *предварительных испытаний* проводят проверку на прочность и функционирование, на бронепробиваемость при неподвижном расположении кумулятивного узла перед преградой и при стрельбе снарядом по преграде.

4.3. Расчет на прочность корпуса осколочно-фугасных и кумулятивных снарядов при максимальном давлении пороховых газов

Расчет на прочность корпусов ОФС проводится в сечениях, отмеченных на рис. 4.4.

Сечение *O—O* проходит через середину ведущего (обтюрирующего) пояска снаряда, а сечение 1—1 — через начало относительно тонкостенной оживальной части каморы (в этом сечении возникает концентрация напряжений и деформаций). В сечении 2—2 оживальная часть каморы переходит в цилиндрическую (в этом сечении резко изменяется радиус кривизны поверхности), а в сечении 3—3 цилиндрическая часть каморы переходит в коническую часть (в данном сечении возможны скачкообразное изменение давления снаряжения при его упругом состоянии и концентрация напряжений).

Сечение 3—3 находится на расстоянии x_3 от ведущего пояска:

$$x_3 = \frac{2,43}{\sqrt{3}} \sqrt{r_0 h_0} = 1,94 \sqrt{r_0 h_0},$$

где r_0 , h_0 — радиус срединной поверхности и толщина стенки корпуса соответственно.

Значение x_3 получено из теории краевого эффекта оболочек при их упругой и пластической изгибной деформациях. На расстоянии x_3 , т. е. в тех сечениях, которые расположены выше сечения 3—3, уже не сказывается влияние реакции ведущего пояска и возникающих в результате ее действия деформаций на напряженно-деформированное состояние стенок корпуса.

Сечение 5–5 проходит посередине расстояния между сечением $O-O$ и дном каморы корпуса. В этом сечении определяют остаточные деформации корпуса после воздействия на него осевых перегрузок и давления пороховых газов в период достижения ими максимального значения.

Расчетными формулами для определения *напряжений* во всех опасных сечениях стенок корпуса снаряда, расположенных выше ведущего пояса (см. рис. 4.4, сечения 1–1, 2–2, 3–3), являются следующие зависимости:

$$\sigma_z = \frac{q_b \zeta_{\text{пер}}}{\pi(r_2^2 - r_1^2)} = p_{\text{п.г}}^{\text{расч}} \frac{d^2 q_b}{4 q} \frac{1}{r_2^2 - r_1^2}; \quad \sigma_t = p_{\text{с.к}} \frac{\bar{r}^2 + 1}{\bar{r}^2 - 1}; \quad \sigma_r = -p_{\text{с.к}}, \quad (4.1)$$

где q_b — наседающая масса снаряда выше сечения ведущего пояса; $\zeta_{\text{пер}} = p_{\text{п.г}}^{\text{расч}} \frac{\pi d^2}{4 q}$ — коэффициент перегрузки ($p_{\text{п.г}}^{\text{расч}}$ — расчетное давление пороховых газов; q — масса снаряда); r_2, r_1 — наружный и внутренний радиусы стенки корпуса соответственно; $p_{\text{с.к}}$ — давление снаряжения на стенки корпуса; $\bar{r} = r_2/r_1$ — относительный радиус стенки корпуса.

Условие прочности стенок корпуса снаряда в соответствии с критерием пластичности Мизеса (четвертая теория прочности) имеет вид

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_t - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_t)^2} \leq \sigma_t, \quad (4.2)$$

где σ_t — предел текучести материала корпуса снаряда.

При известном значении напряжения σ_i , превышающем предел текучести σ_t материала корпуса снаряда или условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, общую u_{r_2} и остаточную $u_{r_2}^*$ деформации наружной поверхности стенок можно определить по следующим зависимостям, известным из теории упругости для цилиндрических оболочек:

$$2u_{r_2} = \frac{\sigma_i - \sigma_{0,2} \zeta_{\text{раз}}}{E(1 - \zeta_{\text{раз}})} \frac{r_1}{2\bar{r} \sigma_i} (\bar{r} + 1)^2 (\sigma_t - \mu \sigma_z); \quad (4.3)$$

$$2u_{r_2}^* = \frac{(\sigma_i - \sigma_{0,2}) \zeta_{\text{раз}}}{E(1 - \zeta_{\text{раз}})} \frac{r_1}{2\bar{r} \sigma_i} (\bar{r} + 1)^2 (\sigma_t - \mu \sigma_z). \quad (4.4)$$

где $\zeta_{\text{раз}}$ — коэффициент разупрочнения материала корпуса снаряда; E — модуль упругости материала корпуса; μ — коэффициент Пуассона.

В сечениях, расположенных выше ведущего пояса, условия невыпучиваемости стенок корпуса

$$d - (d_{\text{к.с}} + \Delta_{\text{к}}) > 2u_{r_2}; \quad d - (d_{\text{к.с}} + \Delta_{\text{к}}) > 2u_{r_2}^*,$$

где $d_{\text{к.с}}$ — наружный диаметр корпуса снаряда в рассматриваемом сечении; $\Delta_{\text{к}}$ — диаметральный зазор между корпусом и стенками ствола, равный абсолютной величине верхнего предела допуска на диаметр $d_{\text{к.с}}$.

По формулам (4.1)–(4.4) проводят расчеты корпусов и хвостовых частей оперенных ОФС и кумулятивных снарядов.

В сечениях, расположенных ниже ведущего пояска (см. рис. 4.4, сечение 5–5), к осевым силам $F_{ин}$ инерции и давлению $p_{с.к}$ снаряжения добавляется давление $p_{п.г}^{расч}$ пороховых газов на боковую поверхность стенок корпуса снаряда (рис. 4.6).

Осевые напряжения

$$\sigma_z = -\frac{F_{ин(5-5)}}{S_{5-5}},$$

где $F_{ин(5-5)}$ — силы инерции в сечении 5–5; S_{5-5} — площадь корпуса в сечении 5–5.

Силы инерции

$$F_{ин(5-5)} = p_{п.г}^{расч} \frac{\pi d^2}{4} \left[\left(\frac{d_{5-5}}{d} \right)^2 - \frac{q_B}{q} \right] = p_{п.г}^{расч} \frac{\pi d^2}{4} \left(\frac{q_B}{q} - 1 + \left(\frac{d_{5-5}}{d} \right)^2 \right),$$

где d_{5-5} — диаметр корпуса снаряда в сечении 5–5.

Тогда с учетом $S_{5-5} = \pi(R_{5-5}^2 - r_{5-5}^2)$ имеем

$$\sigma_z = -\frac{p_{п.г}^{расч} d^2}{4(R_{5-5}^2 - r_{5-5}^2)} \left[\frac{q_B}{q} - 1 + \left(\frac{d_{5-5}}{d} \right)^2 \right], \quad (4.5)$$

где R_{5-5} , r_{5-5} — наружный и внутренний радиусы запоясковой стенки корпуса снаряда соответственно.

Для определения величины деформации рассмотрим условия равновесия стенок цилиндра при данной нагрузке:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_z}{r} = 0;$$

$$F_{ин(5-5)} = 2\pi \int_{r_{5-5}}^{R_{5-5}} \sigma_z dr,$$

где r — текущее значение радиуса элементарного слоя запоясковой стенки корпуса снаряда.

Тогда осевые, тангенциальные и радиальные деформации

$$\varepsilon_z = 0; \quad \varepsilon_r = \frac{w}{r}; \quad \varepsilon_r = \frac{dw}{dr}; \quad \varepsilon_z + \varepsilon_r + \varepsilon_r = 0, \quad (4.6)$$

где w — абсолютная радиальная деформация.

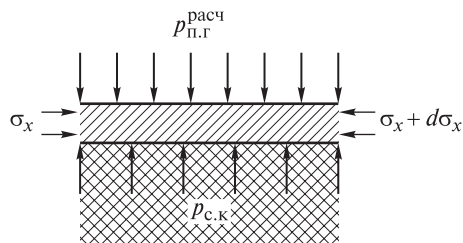


Рис. 4.6. Нагрузки на запоясковую часть корпуса

При совместном решении уравнений (4.6) и условия равновесия стенок цилиндра получим

$$\frac{F_{ин(5-5)} - \pi(p_{с.к} R_{5-5}^2 - p_{п.г} r_{5-5}^2)}{\pi r_{5-5}^2} = \varepsilon_i \sqrt{\varepsilon_{iR}^2 - \varepsilon_z^2} \int_{\varepsilon_{ir}}^{\varepsilon_{iR}} \frac{\sigma_i}{(\varepsilon_{iR}^2 - \varepsilon_z^2)^{3/2}} d\varepsilon_i; \quad (4.7)$$

$$p_{п.г}^{расч} - p_{с.к} = \frac{1}{\sqrt{3}} \int_{\varepsilon_{ir}}^{\varepsilon_{iR}} \frac{\sigma_i}{(\varepsilon_{iR}^2 - \varepsilon_z^2)^{3/2}} d\varepsilon_i.$$

Здесь

$$F_{ин(5-5)} = -\pi r_{5-5}^2 \sqrt{\varepsilon_{iR}^2 - \varepsilon_z^2} \left\{ \int_{\varepsilon_{ir}}^{\varepsilon_{iR}} \frac{\sigma_i \varepsilon_i}{(\varepsilon_{iR}^2 - \varepsilon_z^2)^{3/2}} d\varepsilon_i + \frac{1}{\sqrt{3}} \int_{\varepsilon_{ir}}^{\varepsilon_{iR}} \sigma_i \left[\frac{1}{\varepsilon_{iR}^2 - \varepsilon_z^2} - \frac{\sqrt{3} \varepsilon_i}{(\varepsilon_{iR}^2 - \varepsilon_z^2)^{3/2}} \right] d\varepsilon_i \right\};$$

$$\varepsilon_{iR} = \sqrt{\varepsilon_z^2 + \bar{R}_{5-5}^2 (\varepsilon_{ir}^2 - \varepsilon_z^2)},$$

где $\bar{R}_{5-5} = \frac{R_{5-5}}{r_{5-5}}$ — отношение радиусов в сечении 5–5.

Последние два уравнения определяют связь нагрузок $p_{п.г}^{расч}$, $p_{с.к}$, $F_{ин(5-5)}$, действующих на стенки запоясковой части корпуса, с ее размерами R_{5-5} , r_{5-5} и относительными деформациями ε_z , ε_i , ε_{ir} , ε_{iR} при известной для его материала кривой $\sigma_i - \varepsilon_i$.

После вычисления интегралов и выполнения преобразований уравнения (4.6) и (4.7) можно записать с использованием безразмерных параметров:

$$\frac{\sqrt{3}(p_{п.г}^{расч} - p_{с.к})}{(1 - \bar{R}_{5-5}^2) \sigma_\tau} = \sqrt{e_{iR}^2 - e_z^2} +$$

$$+ \frac{\zeta_{раз}}{1 - \bar{R}_{5-5}^2} \left[\sqrt{1 - e_z^2} - \sqrt{e_{iR}^2 - e_z^2} + \ln \frac{e_{ir} + \sqrt{e_{ir}^2 - e_z^2}}{1 + \sqrt{1 - e_z^2}} \right]; \quad (4.8)$$

$$\frac{F_{ин(5-5)} \frac{\bar{R}_{5-5}^2}{r_{5-5}^2} + \pi(p_{п.г}^{расч} \bar{R}_{5-5}^2 - p_{с.к})}{\sigma_\tau \pi (1 - \bar{R}_{5-5}^2)} = e_z + \frac{\zeta_{раз} \bar{R}_{5-5}^2}{1 - \bar{R}_{5-5}^2} \left[e_z - \frac{e_{ir}}{e_z} + \frac{1}{e_z} \sqrt{(1 - e_z^2) e_{ir}^2 - e_z^2} \right],$$

где $e_z = \varepsilon_z / \varepsilon_\tau$ — относительная безразмерная деформация стенок корпуса в осевом направлении (ε_τ — относительная деформация, соответствующая пределу текучести материала σ_τ); $e_{ir} = \varepsilon_{ir} / \varepsilon_\tau$, $e_{iR} = \varepsilon_{iR} / \varepsilon_\tau$ — относительная безразмерная деформация на внутренней и наружной поверхности стенок цилиндра соответственно.

При $\varepsilon_{ir} = \varepsilon_R$ стенки цилиндра под действием нагрузок $p_{п.г}^{расч}$, $p_{с.к}$, $F_{ин(5-5)}$ полностью переходят в пластическое состояние.

Нагрузки, соответствующие напряженно-деформированному состоянию материала стенок при равенстве деформаций ε_{ir} и ε_R , называются *критическими по жесткости*.

Расчетные зависимости для определения критических нагрузок можно получить из уравнений (4.8) при условии, что $\varepsilon_{ir} = \sqrt{\varepsilon_z^2 + \bar{R}_{5-5}^2 (\varepsilon_{ir}^2 - \varepsilon_z^2)} \geq \varepsilon_T$ (где ε_T — деформация, соответствующая пределу текучести материала), а $e_{ir} \geq 1$.

Определим действительные радиальное давление \bar{p} и силу \bar{F} осевого сжатия следующим образом:

$$\bar{p} = (1 - \zeta_{раз}) \sqrt{e_{ir}^2 - e_z^2} + \frac{\zeta_{раз}}{1 - \bar{R}_{5-5}^2} \ln \frac{e_{ir} + \sqrt{e_{ir}^2 - e_z^2}}{\bar{R}_{5-5}^2 \sqrt{e_{ir}^2 - e_z^2} + \sqrt{e_z^2 + \bar{R}_{5-5}^2 (e_{ir}^2 - e_z^2)}};$$

$$\bar{F} = \frac{F_{ин(5-5)} \frac{\bar{R}_{5-5}^2}{r_{5-5}^2} + \pi (p_{п.г}^{расч} \bar{R}_{5-5}^2 - p_{с.к})}{\sigma_T \pi (1 - \bar{R}_{5-5}^2)},$$

в безразмерной форме можно записать

$$\bar{p} = \frac{\sqrt{3} (p_{п.г}^{расч} - p_{с.к})}{(1 - \bar{R}_{5-5}^2) \sigma_T};$$

$$\bar{F} = (1 - \zeta_{раз}) e_z + \frac{\zeta_{раз}}{e_z (1 - \bar{R}_{5-5}^2)} \left[-e_{ir} \bar{R}_{5-5}^2 + \sqrt{e_z^2 + \bar{R}_{5-5}^2 (e_{ir}^2 - e_z^2)} \right].$$

Если принять относительную безразмерную деформацию стенок запоясковой части корпуса на его наружной поверхности равной единице, т. е.

$$e_{ir} = \sqrt{e_z^2 + \bar{R}_{5-5}^2 (e_{ir}^2 - e_z^2)} = 1,$$

можно получить значения *критических нагрузок* $\bar{p}_{кр}$ и $\bar{F}_{кр}$ в форме

$$\bar{p}_{кр} = (1 - \zeta_{раз}) \frac{1}{\bar{R}_{5-5}^2} \sqrt{1 - e_z^2} + \frac{\zeta_{раз}}{1 - \bar{R}_{5-5}^2} \ln \frac{\sqrt{1 + (\bar{R}_{5-5}^2 - 1) e_z^2} + \sqrt{1 - e_z^2}}{\bar{R}_{5-5}^2 (1 + \sqrt{1 - e_z^2})};$$

$$\bar{F}_{кр} = (1 - \zeta_{раз}) e_z + \frac{\zeta_{раз}}{e_z (1 - \bar{R}_{5-5}^2)} \left[1 - \sqrt{1 + (\bar{R}_{5-5}^2 - 1) e_z^2} \right]. \quad (4.9)$$

При $\zeta_{\text{раз}} = 1$ (кривая $\sigma_i - \varepsilon_i$ имеет «площадку текучести») выражения (4.9) для $\bar{p}_{\text{кр}}$ и $\bar{F}_{\text{кр}}$ примут вид

$$\bar{p} = \frac{\sqrt{3}(p_{\text{п.г}}^{\text{расч}} - p_{\text{с.к}})}{\sigma_{0,2}(1 - \bar{R}_{5-5}^2)}; \quad \bar{F} = \frac{\sigma_z}{\sigma_{0,2}} - \frac{p_{\text{п.г}}^{\text{расч}} - p_{\text{с.к}} \bar{R}_{5-5}^2}{\sigma_{0,2}(1 - \bar{R}_{5-5}^2)}. \quad (4.10)$$

Первое критическое давление задано выражением

$$\bar{p}'_{\text{кр}} = \frac{1}{1 - \bar{R}_{5-5}^2} \ln \frac{\bar{u} + \sqrt{1 + \bar{u}^2}}{\bar{R}_{5-5}^2 \bar{u} + \sqrt{1 + \bar{R}_{5-5}^4 \bar{u}^2}}, \quad (4.11)$$

где $\bar{u} = \frac{1 - \bar{R}_{5-5}^2}{2\bar{R}_{5-5}^2 |\bar{F}|} \sqrt{\left[\left(\frac{1 + \bar{R}_{5-5}^2}{1 - \bar{R}_{5-5}^2} \right)^2 - \bar{F}^2 \right] (1 - \bar{F}^2)}.$

Если действительное радиальное давление меньше первого критического давления ($\bar{p} < \bar{p}'_{\text{кр}}$), металл стенок корпуса находится только в упругом состоянии.

Если действительное радиальное давление больше первого критического давления ($\bar{p} > \bar{p}'_{\text{кр}}$), еще нельзя установить вид напряженного состояния стенок корпуса запоясковой части снаряда, можно только утверждать, что напряженное состояние не во всей запоясковой части осталось упругим. Для того чтобы установить вид напряженного состояния металла стенок запоясковой части снаряда, необходимо сравнить действительное радиальное давление со вторым критическим давлением $\bar{p}''_{\text{кр}}$.

Второе критическое давление увеличивается по сравнению с первым критическим давлением в результате перехода металла в зону пластических деформаций по всей толщине стенки запоясковой части снаряда и, как следствие, упрочнения металла при пластических деформациях. Поэтому *второе критическое давление* можно выразить через первое критическое давление и его приращение:

$$\bar{p}''_{\text{кр}} = \bar{p}'_{\text{кр}} + \Delta \bar{p}'_{\text{кр}} (1 - \zeta_{\text{раз}}), \quad (4.12)$$

где $\Delta \bar{p}'_{\text{кр}} = \left(\bar{u} + \frac{1}{\bar{R}_{5-5}^2 \bar{u}} \right) \frac{1}{\sqrt{1 + \bar{R}_{5-5}^4 \bar{u}^2}} - \frac{|\bar{F}|}{\bar{R}_{5-5}^2 \bar{u}} - \bar{p}'_{\text{кр}}.$

Если действительное радиальное давление больше первого критического давления и меньше второго ($\bar{p}'_{\text{кр}} < \bar{p} < \bar{p}''_{\text{кр}}$), металл стенок корпуса снаряда находится в сложном напряженном состоянии, т. е. наряду с упругой зоной существует и пластическая. Однако деформации запоясковой части корпуса снаряда в этом случае еще малы и корпус снаряда сохраняет жесткость конструкции.

Прогиб наружной поверхности запоясковой части корпуса снаряда можно определить из соотношения

$$H'_n = \frac{\sqrt{3}}{2} \bar{R}_{5-5} \varepsilon' \frac{1}{\sqrt{1 + \bar{u}^2 \bar{R}_{5-5}^4}} \left(\bar{u} \pm \frac{1}{\sqrt{3} \bar{R}_{5-5}} \right), \quad (4.13)$$

где ε' — деформационный предел пропорциональности.

В выражении (4.13) знак последнего множителя берется обратным знаком действительного осевого давления \bar{F} .

Влияние близости дна учитывается коэффициентом

$$\zeta_d = 1 - (\cos Y_{5-5} + \sin Y_{5-5}) e^{-Y_{5-5}},$$

где $Y_{5-5} = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{l}{\sqrt{r_{cp(5-5)} h_{5-5}}}$ (l — расстояние от середины ведущего пояса

до дна каморы; $r_{cp(5-5)} = 0,5(R_{5-5} + r_{5-5})$ — радиус срединной поверхности; $h_{5-5} = R_{5-5} - r_{5-5}$ — толщина стенки в сечении 5–5).

Тогда прогиб наружной стенки корпуса снаряда

$$H_n = H'_n \zeta_d, \quad (4.14)$$

а прогиб срединной поверхности

$$H = H_n \left(1 + \frac{h_{5-5}}{2r_{cp(5-5)}} \right). \quad (4.15)$$

Если действительное радиальное давление окажется больше второго критического ($\bar{p} > \bar{p}_{кр}''$), металл стенок запоясковой части корпуса перейдет в пластическую зону, корпус снаряда потеряет жесткость и деформация запоясковой части снаряда будет сравнительно большой.

В этом случае общий прогиб наружной поверхности корпуса снаряда

$$H'_{n.общ} = \frac{\sqrt{3}}{2} r_{5-5} \varepsilon' \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \bar{u}^2 \bar{R}_{5-5}^4}} + \frac{\bar{R}_{5-5}^2 \bar{u}}{1 + \bar{R}_{5-5}^2 \bar{u}} \frac{\bar{p} - \bar{p}_{кр}''}{1 - \zeta_{раз}} \right) \left(\bar{u} \pm \frac{1}{\sqrt{3} \bar{R}_{5-5}} \right), \quad (4.16)$$

его упругая составляющая

$$H'_{n.упр} = \frac{\sqrt{3}}{2} r_{5-5} \varepsilon' \left(\bar{p} - \frac{\bar{F}}{\sqrt{3} \bar{R}_{5-5}} \right),$$

а остаточный прогиб по наружному диаметру корпуса в сечении 5–5

$$2H_{n(5-5)}^* = 2(H'_{n(5-5)} - H'_{n.упр(5-5)}) \zeta_d. \quad (4.17)$$

Условием прочности в данном случае является

$$2H_{н(5-5)}^* \leq [2H_{н(5-5)}^*], \quad (4.18)$$

где $[2H_{н(5-5)}^*]$ — допустимое значение остаточного прогиба наружной поверхности корпуса снаряда в сечении 5–5.

4.4. Расчет на прочность привинтной головки

Привинтная головка (рис. 4.7) служит для обеспечения технологического процесса снаряжения камеры снаряда взрывчатим веществом. В привинтной головке может быть установлен дополнительный детонатор.

Расчет на прочность привинтной головки при выстреле проводится в сечении ее контакта с корпусом снаряда.

Напряжение смятия при расчетном давлении пороховых газов не должно превышать допустимого значения $[\sigma] = \sigma_{0,2}$:

$$\sigma_{см} = \frac{F_{ин}}{\pi(R_r^2 - r_r^2)} = p_{п.г}^{расч} \frac{R^2}{R_r^2 - r_r^2} \frac{q_v}{q} \leq [\sigma], \quad (4.19)$$

где R_r, r_r — внешний и внутренний радиусы привинтной головки соответственно; $R = d/2$ (d — калибр снаряда).

Напряжение среза при тех же условиях

$$\begin{aligned} \tau_{ср} &= \frac{F_{ин}}{2\pi r_r (l_r + 0,5l_{р.г})} = \\ &= p_{п.г}^{расч} \frac{R^2}{2r_r (l_r + 0,5l_{р.г})} \frac{q_v}{q} \leq [\tau], \end{aligned} \quad (4.20)$$

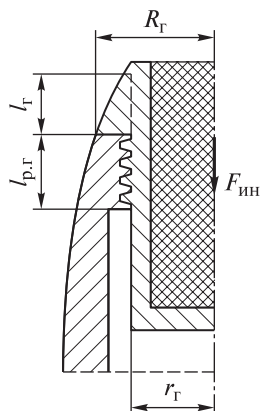


Рис. 4.7. Конструкция привинтной головки

где l_r — расстояние между внешней поверхностью привинтной головки и резьбовым соединением на корпусе снаряда; $l_{р.г}$ — длина резьбы на привинтной головке.

Привинтная головка и ее резьбовое соединение с корпусом снаряда должны сохранять прочность и при ударе в преграду. Если длина резьбовой части мала, то при небольших углах встречи снаряда с преградой головка может быть выломана из корпуса. Недостаточно закрепленная привинтная головка может развинтиться при рикошетах. Длину резьбовой части головки и корпуса, а также способ их крепления, обеспечивающий защиту от развинчивания привинтной головки, выбирают на основании имеющегося опыта разработки снарядов.

4.5. Расчет на прочность диафрагмы

Формулу для расчета минимально допустимой толщины диафрагмы (рис. 4.8) можно вывести, если рассматривать диафрагму как свободно опертую по краю круглую плиту, нагруженную равномерно распределенной нагрузкой.

Введем следующие обозначения: $q_{д.д}$ — масса деталей, опирающихся на диафрагму; $q_{дф}$ — масса диафрагмы; $h_{дф}$ — толщина диафрагмы; r — радиус контура опоры; $R = d/2$ (d — калибр снаряда).

Выражение для осевой силы инерции

$$F_{ин} = p_{п.г}^{расч} \pi R^2 \frac{q_{д.д} + q_{дф}}{q}$$

позволяет определить *равномерно распределенную нагрузку*, действующую на диафрагму при выстреле, в виде

$$p_{д.р} = F_{ин} / (\pi r^2).$$

Толщину диафрагмы можно рассчитать из условия $h_{дф} \geq (r/2) \sqrt{5p_{д.р} / \sigma_t}$. Кроме того, толщину диафрагмы можно определить исходя из условия ее прочности на срезание $\tau_{ср} = \frac{F_{ин}}{2\pi r h_{дф}} \leq [\tau]$. В этом случае

$$h_{дф} \geq \frac{p_{п.г}^{расч}}{\sigma_t} \frac{R^2}{r} \frac{q_{д.д} + q_{дф}}{q}.$$

При этом *толщина диафрагмы* принимается равной большому из двух значений, полученных из разных условий.

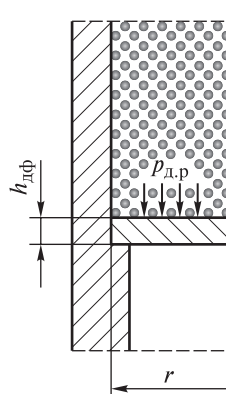


Рис. 4.8. Схема сил и размеров диафрагмы

4.6. Расчет на прочность запального стакана

Расчет на прочность запального стакана (рис. 4.9) сводится к определению размеров, обеспечивающих его прочность на растяжение от действия силы $F_{ин}$ инерции с учетом давления $p_{ст}$ снаряда на дно запального стакана, которое частично разгружает осевые силы инерции. Для этого определяют *опасное сечение*, в котором напряжения растяжения достигают наибольших значений.

Введем следующие обозначения: $q_{дт}$ — масса детонатора; $q_{з.с}$ — масса части корпуса запального стакана, расположенной ниже сечения $n-n$ (на рис. 4.9 — справа от сечения $n-n$); $r_{ст}$, $R_{ст}$ — внутренний и наружный радиусы корпуса запального стакана в сечении $n-n$ соответственно; $R_{д.з}$ — радиус дна запального стакана; $R = d/2$ (d — калибр снаряда).

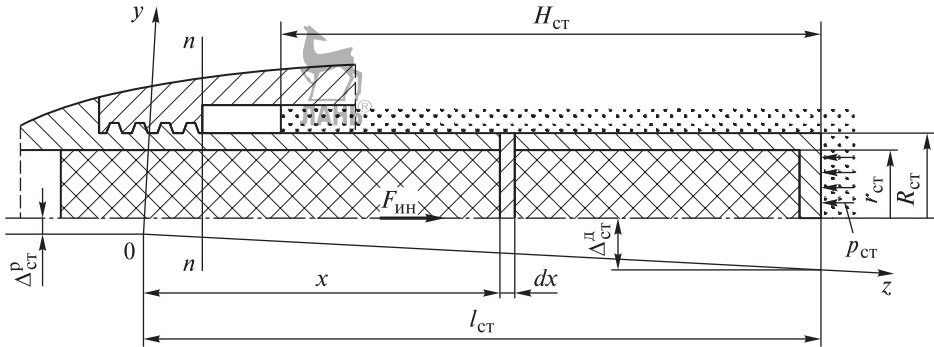


Рис. 4.9. Схема сил, действующих на запальный стакан

Запишем осевую силу $F_{ин}$ инерции и давление $p_{ст}$ снаряда на дно запального стакана в следующем виде:

$$F_{ин} = p_{п.г}^{расч} \pi R^2 \frac{q_{дт} + q_{з.с.}}{q};$$

$$p_{ст} = p_{п.г}^{расч} \pi R^2 \frac{\rho_{ВВ} H_{ст}}{q},$$

где $H_{ст}$ — глубина погружения запального стакана в снаряд.

Продольная сила F_z в сечении $n-n$ определяется из уравнения равновесия для расчетного участка запальной части запального стакана:

$$F_z = F_{ин} - p_{ст} \pi R_{ст}^2,$$

что позволяет определить *напряжение растяжения* в форме

$$\sigma_z = \frac{F_z}{S_{n-n}} = p_{п.г}^{расч} \frac{R^2}{R_{ст}^2 - r_{ст}^2} \frac{q_{дт} + q_{з.с.} - \pi R^2 \rho_{ВВ} H_{ст}}{q}, \quad (4.21)$$

где S_{n-n} — площадь сечения $n-n$.

При этом условие прочности имеет вид $\sigma_z \leq [\sigma]$, где $[\sigma] = \sigma_T$.

На практике рекомендуется переменная толщина стенки длинного запального стакана, подобно толщине стержня равного сопротивления. Однако необходимо иметь в виду, что запальный стакан с равнопрочными стенками сравнительно просто может быть изготовлен только отливкой или штамповкой. Поэтому иногда вместо запальных стаканов с равнопрочными стенками изготавливают стаканы ступенчатой формы.

Результаты анализа формулы (4.21) позволяют утверждать, что по всей высоте запального стакана осевые напряжения в основном *растягивающие*. Однако возможны случаи, когда в нижней части запального стакана они становятся *сжимающими*. При этом в запальном стакане появляется *ненагруженное сечение*. Удаление этого сечения от дна запального стакана зависит от глубины погружения стакана в снаряд.

$$H_{\text{ст}} = (q_{\text{дт}} + q_{\text{з.с}}) / (\pi R_{\text{ст}}^2 \rho_{\text{ВВ}}).$$

Длинный запальный стакан необходимо рассчитать не только на растяжение, но и на изгиб от действия центробежной силы, возникающей в результате эксцентриситета продольной оси запального стакана относительно оси снаряда либо относительно оси канала ствола орудия.

Для расчета напряжений изгиба в корпусе запального стакана введем систему прямоугольных координат таким образом, чтобы ось запального стакана находилась в плоскости, проходящей через середину его резьбового соединения с корпусом снаряда. Введем следующие обозначения: $\Delta_{\text{ст}}^{\text{р}}$ — смещение оси запального стакана от оси снаряда в плоскости, проходящей через середину его резьбового соединения; $\Delta_{\text{ст}}^{\text{д}}$ — смещение оси запального стакана от оси снаряда в плоскости, проходящей через дно стакана; $q_{\text{ст}}$, $l_{\text{ст}}$ — масса и длина запального стакана соответственно.

Для длинного запального стакана его массу со снаряжением можно без большой погрешности принять равной $q_{\text{ст}} = q_{\text{ст}}^{\text{к}} + q_{\text{ВВ}}^{\text{ст}}$, где $q_{\text{ст}}^{\text{к}}$ — масса корпуса запального стакана; $q_{\text{ВВ}}^{\text{ст}}$ — масса снаряжения, находящегося в стакане.

Вырежем двумя нормальными плоскостями элемент запального стакана длиной dx на удалении x от начала координат и массой $dm = (q_{\text{ст}}/l_{\text{ст}})dx$ (см. рис. 4.9). Эксцентриситет выделенного элемента

$$\Delta_{\text{эл}} = \Delta_{\text{ст}}^{\text{д}} + (\Delta_{\text{ст}}^{\text{р}} - \Delta_{\text{ст}}^{\text{д}}) \frac{x}{l_{\text{ст}}},$$

а центробежная сила, действующая на этот элемент стакана,

$$dc = \Omega^2 \Delta_{\text{эл}} dm, \text{ или } dc = \Omega^2 \left[\Delta_{\text{ст}}^{\text{д}} + (\Delta_{\text{ст}}^{\text{р}} - \Delta_{\text{ст}}^{\text{д}}) \frac{x}{l_{\text{ст}}} \right] \frac{q_{\text{ст}}}{l_{\text{ст}}} dx.$$

Изгибающий момент в опорном сечении, совпадающем с началом координат, задан уравнением

$$J = \int_0^{l_{\text{ст}}} x dc = \int_0^{l_{\text{ст}}} x \Omega^2 \left[\Delta_{\text{ст}}^{\text{д}} + (\Delta_{\text{ст}}^{\text{р}} - \Delta_{\text{ст}}^{\text{д}}) \frac{x}{l_{\text{ст}}} \right] \frac{q_{\text{ст}}}{l_{\text{ст}}} dx = \frac{q_{\text{ст}}}{6} \Omega^2 \frac{\Delta_{\text{ст}}^{\text{д}} + 2\Delta_{\text{ст}}^{\text{р}}}{l_{\text{ст}}},$$

а момент сопротивления изгибу корпуса запального стакана — уравнением

$$J_{\text{ст}} = \frac{\pi}{4} R_{\text{ст}}^3 (1 - \bar{r}_{\text{ст}}^4),$$

где $\bar{r}_{\text{ст}} = r_{\text{ст}}/R_{\text{ст}}$.

Очевидно, что напряжение изгиба определяется соотношением

$$\sigma_{\text{и}} = \frac{J}{J_{\text{ст}}} = \frac{2}{3} q_{\text{ст}} \Omega^2 \frac{(\Delta_{\text{ст}}^{\text{д}} + 2\Delta_{\text{ст}}^{\text{р}})/l_{\text{ст}}}{\pi R_{\text{ст}}^3 (1 - \bar{r}_{\text{ст}}^4)}. \quad (4.22)$$

При этом условие прочности есть $\sigma_{\text{н}} \leq [\sigma]$, где $[\sigma] = \sigma_{\text{г}}$. Если оно не выполняется, необходимо уменьшить допуски на несоосность запального стакана (уменьшить $\Delta_{\text{ст}}^{\text{р}}$ и $\Delta_{\text{ст}}^{\text{д}}$) или укрепить дно запального стакана в кольцевой выточке дна снаряда. Однако в последнем случае необходимо оставить зазор для перемещения запального стакана в осевом направлении, чтобы устранить напряжения, которые могут быть вызваны температурными изменениями при жестком креплении стакана.

Изгибающий момент запального стакана передается на стенки головной части оболочки снаряда и вызывает в них напряжения. Для стальных оболочек эти напряжения не опасны. Однако изгибающий момент запального стакана способен разрушить головную часть снаряда, изготовленную из сталистого чугуна. Разрушение головной части может произойти при движении снаряда в канале ствола орудия или после вылета снаряда из ствола орудия.

4.7. Расчет на прочность дна снаряда

Дно снаряда во время выстрела находится в напряженном состоянии. Возможно образование деформаций дна, способных вызвать в твердом снаряжении местные напряжения, выходящие за допустимые пределы. Кроме того, может быть нарушена сплошность металла дна снаряда. Через образующиеся трещины в дне корпуса снаряда пороховые газы проникают внутрь снаряда и вызывают его преждевременный разрыв.

Таким образом, нарушение сплошности металла, появление больших деформаций дна корпуса снаряда, а также возможность диффузий пороховых газов через поры металла дна совершенно недопустимы. В связи с этим необходимо рассчитать прочность дна снаряда при выстреле. *Прочным* называется дно корпуса снаряда, которое при выстреле способно выдержать все нагрузки без нарушения сплошности металла, при этом остаточные деформации не выйдут за допустимые пределы, определяемые тактико-техническими требованиями.

Силы, действующие на дно снаряда. При движении снаряда по каналу ствола орудия на дно и на стенки запоясковой части оболочки снаряда накладываются: давление $p_{\text{п.г}}^{\text{расч}}$ пороховых газов, давление $p_{\text{с.к}}$ и $p_{\text{с.д}}$ снаряжения на стенки камеры и на дно снаряда и осевые силы $F_{\text{ин.д}}$ инерции (рис. 4.10).

При расчете дна снаряда на прочность за наибольшее значение давления пороховых газов принимают расчетное давление $p_{\text{п.г}}^{\text{расч}}$. Давление снаряжения на дно и стенки камеры снаряда возникает в результате инерции снаряжения и зависит от физического состояния и массы снаряжения, а также от профиля камеры снаряда в меридиональном сечении.

Силы $F_{\text{ин.д}}$ инерции дна снаряда подобны силам инерции, возникающим в стенках корпуса снаряда при выстреле. Однако из всех сил инерции следует учитывать только осевые. Силами инерции в радиальных и тангенциальных направлениях следует пренебречь, так как они не влияют на прочность дна снаряда.

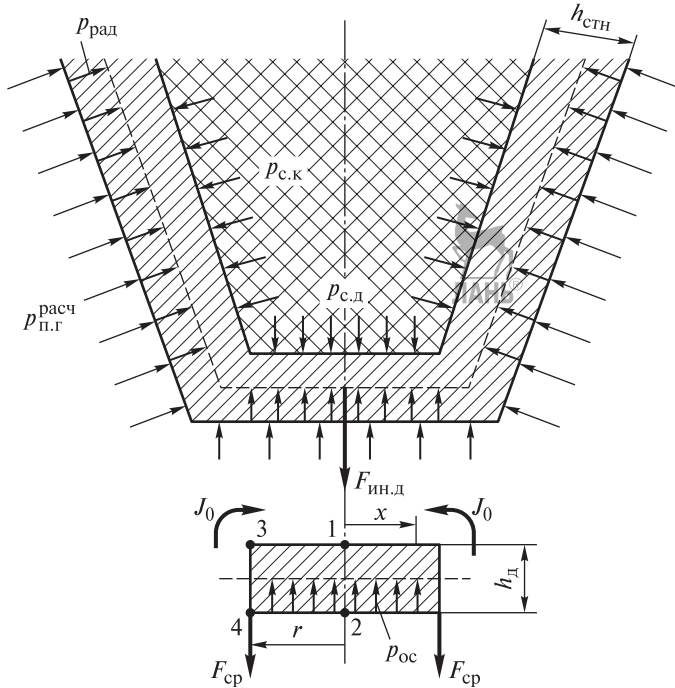


Рис. 4.10. Схема сил, действующих на дно снаряда

Давление пороховых газов, давление снарядения на дно снаряда и осевые силы инерции дна снаряда можно заменить эквивалентным *осевым давлением* $p_{ос}$, которое действует на срединную поверхность дна снаряда, отделенного от оболочки:

$$p_{ос} \pi r^2 = p_{п.г}^{расч} \pi r^2 - F_{ин.д} - p_{с.д} \pi r_d^2,$$

где r — радиус срединной поверхности, который можно принять равным радиусу r_d дна камеры. Разделив $p_{ос}$ на πr^2 , получим

$$p_{ос} = p_{п.г}^{расч} \left(1 - \frac{R^2}{r^2} \frac{q_d + q_{ВВ}^*}{q} \right), \quad (4.23)$$

где $R = d/2$ (d — калибр снаряда); $q_d = \pi r_1^2 h_d \rho_d$ — масса дна снаряда (r_1 , h_d — радиус и толщина дна; ρ_d — плотность материала дна); $q_{ВВ}^*$ — масса ВВ, которая содержится в воображаемом цилиндре, опирающемся на дно камеры. Если давление снарядения отсутствует или им пренебрегают, то в формуле (4.23) $q_{ВВ}^* = 0$.

Давление пороховых газов и давление снарядения на стенки корпуса снаряда в радиальных направлениях можно заменить эквивалентным *радиальным давлением* $p_{рад}$:

$$p_{\text{рад}} = 2 \frac{p_{\text{п.г}}^{\text{расч}} R_{\text{н}} - p_{\text{с.к.в}}}{R_{\text{н}} + r_{\text{в}}}, \quad (4.24)$$

где $R_{\text{н}}$, $r_{\text{в}}$ — радиусы оболочки запоясковой части снаряда по наружному и внутреннему очертанию соответственно.

Таким образом, все усилия, накладывающиеся при выстреле на дно и запоясковую часть снаряда, сведены к осевому $p_{\text{ос}}$ и радиальному $p_{\text{рад}}$ давлениям.

Поскольку осевое давление $p_{\text{ос}}$ всегда направлено в сторону движения снаряда, оно стремится прогнуть дно снаряда и срезать его по цилиндрической поверхности, имеющей радиус $r_{\text{д}}$ дна камеры снаряда. Дно составляет единое целое со стенками корпуса снаряда, поэтому, прогибаясь, оно стремится выгнуть их наружу, в результате чего запоясковая часть оболочки снаряда расширяется (рис. 4.11, а).

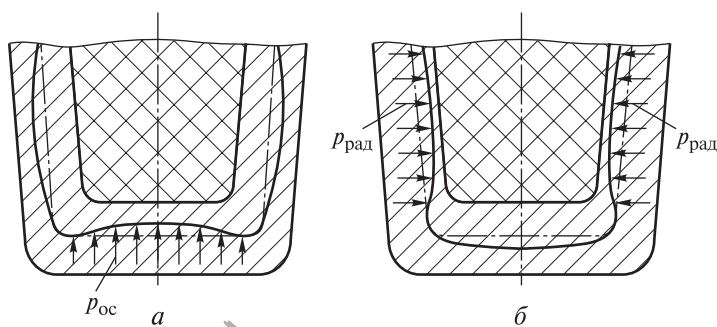


Рис. 4.11. Деформации срединной поверхности запоясковой части снаряда от действия осевого (а) и радиального (б) давления

Радиальное давление $p_{\text{рад}}$ деформирует стенки запоясковой части корпуса снаряда. В результате этого дно снаряда прогибается в направлении, противоположном его прогибу под действием осевого давления (рис. 4.11, б). Однако давление снаряжения на стенки корпуса запоясковой части может в значительной степени уравновесить внешнее радиальное давление пороховых газов, поэтому при расчете прочности дна снаряда суммарным влиянием этих давлений можно пренебречь.

Таким образом, *общий прогиб дна снаряда* зависит в основном от эквивалентного осевого давления и от жесткостей дна и стенок корпуса в запоясковой части.

Расчет прогиба дна снаряда. Для вывода расчетных формул прогиба дна представим, что дно снаряда отделено от стенок корпуса по их граничной поверхности. Взаимодействие дна со стенками корпуса снаряда заменяется изгибающим моментом J_0 и срезающей силой $F_{\text{ср}}$, которые приложены по всему периметру дна и стенок корпуса снаряда, равны по значению и противоположны по направлению.

Дно снаряда рассматривается как свободно опирающийся краями диск, нагруженный распределенной нагрузкой p_{oc} по всей торцевой поверхности и парами сил с равными изгибающими моментами J_0 по всему периметру этого диска. При симметричной нагрузке изогнутая поверхность, в которую обратится срединная плоскость пластинки, также будет симметричной. Во всех точках, равноудаленных от центра пластинки, прогибы будут одинаковыми.

Поместим начало координат O в центре неизгнутой пластинки (рис. 4.12). Обозначим: x — радиальные расстояния точек, лежащих в срединной плоскости; w — прогибы этих точек.

Главные радиусы r_n и r_τ кривизны изогнутой срединной поверхности пластинки задаются выражениями

$$\frac{1}{r_n} = -\frac{d^2w}{dx^2} = \frac{d\varphi}{dx}; \quad \frac{1}{r_\tau} = -\frac{1}{r} \frac{dw}{dx} = \frac{\varphi}{x},$$

где φ — малый угол между нормалью изогнутой поверхности в точке A и осью симметрии OB (см. рис. 4.12).

Тогда соответствующие *изгибающие моменты* (рис. 4.13)

$$J_r = G \left(\frac{d\varphi}{dx} + \mu \frac{\varphi}{x} \right); \quad J_\tau = G \left(\frac{\varphi}{x} + \mu \frac{d\varphi}{dx} \right),$$

где $G = \frac{Eh_n^3}{12(1-\mu^2)}$ — жесткость дна при изгибе (E — модуль упругости материала дна); μ — коэффициент Пуассона материала дна.

Из теории расчета свободно опертой по контуру круговой плиты, нагруженной только равномерно распределенной нагрузкой p_{oc} , известно, что

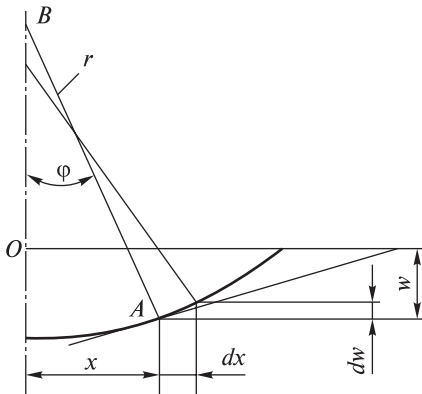


Рис. 4.12. Схема деформаций дна корпуса снаряда по срединной линии

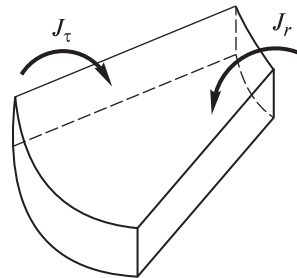


Рис. 4.13. Элемент дна снаряда с действующими на него изгибающими моментами J_r в радиальном направлении и J_τ в тангенциальном направлении

на удалении x от оси симметрии изгибающие моменты определены следующими соотношениями:

- в радиальном направлении

$$J'_r = \frac{p_{oc}}{16}(r^2 - x^2)(3 + \mu); \quad (4.25)$$

- в тангенциальном направлении

$$J'_\tau = \frac{p_{oc}}{16}[(3 + \mu)r^2 - (1 + \mu)x^2]. \quad (4.26)$$

Угловая деформация дна снаряда в радиальном направлении

$$\varphi' = \frac{p_{oc}x}{16G} \left(x^2 - \frac{3 + \mu}{1 + \mu} r^2 \right).$$

При нагружении плиты по краям равными изгибающими моментами J_0 (см. рис. 4.10) возникает угловая деформация, значение которой на удалении x от оси симметрии плиты

$$\varphi'' = \frac{J_0}{G(1 + \mu)} x,$$

а изгибающие моменты в радиальном и тангенциальном направлениях не зависят от величины x , равны друг другу и моменту J_0 , приложенному по краям плиты, т. е. $J''_r = J''_\tau = J_0$.

Общая угловая деформация плиты, а следовательно, и дна снаряда, возникающая в результате воздействия обеих нагрузок, задана разностью угловых деформаций: $\varphi_1 = \varphi' - \varphi''$. Подставив в последнее выражение значения составляющих угловой деформации, получим

$$\varphi_1 = \frac{p_{oc}x}{16G} \left(x^2 - \frac{3 + \mu}{1 + \mu} r^2 \right) - \frac{J_0}{G(1 + \mu)} x.$$

Угловую деформацию дна снаряда по его периметру, т. е. при $x = r$, можно найти из выражения

$$\varphi_{01} = \frac{p_{oc}r^3}{16G} \left(1 - \frac{3 + \mu}{1 + \mu} \right) - \frac{J_0}{G(1 + \mu)} r. \quad (4.27)$$

Далее необходимо определить угловую деформацию φ_{02} стенок корпуса снаряда. Для этого представим себе вырезанный из оболочки снаряда продольный брусок единичной ширины. Силы взаимодействия между выделенным бруском металла и стенками корпуса снаряда заменяются воздействием упругого основания. Пренебрегая приведенным радиальным давлением и считая выделенный брусок металла достаточно длинным, можно рассма-

тривать его как полубесконечный брус, уложенный на упругое основание и нагруженный по торцу изгибающим моментом J_0 .

В этом случае угловая деформация бруса на удалении x от его торца, а следовательно, и угловая деформация стенок толщиной $h_{\text{стн}}$ корпуса снаряда

$$\varphi_2 = \frac{J_0}{E_{\text{бр}} \zeta_{\text{ос}}} e^{-\zeta_{\text{ос}} x} \cos \zeta_{\text{ос}} x,$$

где $E_{\text{бр}} = \frac{E h_{\text{стн}}^3}{12(1-\mu^2)}$, $\zeta_{\text{ос}} = \sqrt[4]{\frac{3(1-\mu^2)}{r^2 h_{\text{стн}}^2}}$ — характеристики вырезанного бруса и жесткого упругого основания соответственно.

Угловая деформация стенок корпуса снаряда у поверхности соединения его с дном (при $x = 0$)

$$\varphi_{02} = J_0 / (E_{\text{бр}} \zeta_{\text{ос}}).$$

Поскольку в месте перехода стенок корпуса в дно снаряда недопустимо нарушение сплошности металла, угловые деформации дна снаряда и стенок корпуса должны быть равны, т. е. $\varphi_{01} = \varphi_{02}$. Из этого равенства получим

$$J_0 = -\zeta_{\text{св}} \frac{p_{\text{ос}} r^2}{8}, \quad (4.28)$$

где $\zeta_{\text{св}} = \left(1 + \frac{h_{\text{д}}^3(1+\mu)}{h_{\text{стн}}^3 \zeta_{\text{ос}} r}\right)^{-1}$ — коэффициент, характеризующий связь между стенками корпуса и дном снаряда. Если плита свободно оперта своими краями, то $\zeta_{\text{св}} = 0$, а если абсолютно защемлена, то $\zeta_{\text{св}} = 1$.

Упростим выражение для расчета коэффициента $\zeta_{\text{св}}$. Для этого введем в него $\zeta_{\text{ос}}$ и преобразуем к виду

$$\zeta_{\text{св}} = \left(1 + (h_{\text{д}}/h_{\text{стн}})^3 \zeta_{\text{пл}}\right)^{-1},$$

$$\text{где } \zeta_{\text{пл}} = \frac{1+\mu}{r} \sqrt[4]{\frac{3(1-\mu^2)}{r^2 h_{\text{стн}}^2}}.$$

Если принять $\mu = 0,3$ и для сравнительно тонкостенных снарядов $h_{\text{стн}}/r \approx 0,07...0,12$, то коэффициент $\zeta_{\text{пл}}$ весьма незначительно изменяется при изменении $h_{\text{стн}}$, r и без большой погрешности может быть принят равным 0,4. Тогда

$$\zeta_{\text{св}} = \left[1 + 0,4(h_{\text{д}}/h_{\text{стн}})^3\right]^{-1}.$$

Общие изгибающие моменты дна снаряда на удалении x от его оси симметрии получаются суммированием двух составляющих: изгибающих моментов в радиальном и тангенциальном направлении.

Изгибающие моменты у оси снаряда, т. е. при $x = 0$ (см. рис. 4.10, сечение 1–2), и в местах перехода стенок корпуса снаряда в его дно, т. е. при $x = r$ (сечение 3–4), можно записать в форме двух комплексов:

- при $x = 0$

$$J_{r(1-2)} = \frac{p_{oc} r^2}{16} (3 + \mu - 2\zeta_{св}); \quad J_{\tau(1-2)} = \frac{p_{oc} r^2}{16} (3 + \mu - 2\zeta_{св});$$

- при $x = r$

$$J_{r(3-4)} = -\zeta_{св} \frac{p_{oc} r^2}{8}; \quad J_{\tau(3-4)} = \frac{p_{oc} r^2}{8} (1 - \mu - \zeta_{св}).$$

Из этих формул следует, что наибольший изгибающий момент развивается в местах переходов стенок корпуса в дно снаряда в радиальном направлении, т. е. по периметру сплошного дна снаряда. При этом можно ориентировочно принять $J_{r(3-4)} \approx J_{\tau(3-4)}$, что дает необходимый запас прочности.

Нормальные напряжения в сечениях у оси дна снаряда и на его периферии от изгибающих моментов

$$\sigma = J/W,$$

где $W = h_d^2/6$ — момент сопротивления бруска единичной толщины, вырезанного из дна снаряда. Осевые напряжения в этих же сечениях зависят от давлений снаряжения и пороховых газов.

Напряженное состояние в каждой точке определяется с учетом критерия пластичности Мизеса:

$$\sigma_{пр} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{oc} - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_{\tau})^2 + (\sigma_{\tau} - \sigma_{oc})^2},$$

где σ_{oc} — напряжение в упругом основании.

Формулы для расчета напряженного состояния в точках дна снаряда, указанных на рис. 4.10, приведены в табл. 4.1. Сравнивая представленные в табл. 4.1 выражения для напряжения в точках 1 и 2 (см. рис. 4.10), можно утверждать, что приведенные напряжения $\sigma_{пр}$ достигают своего наибольшего значения в точке 1 дна снаряда. Поэтому условием прочности дна снаряда по оси симметрии будет соотношение

$$\frac{3}{8} \frac{p_{oc} r^2}{h_d^2} (3 + \mu - 2\zeta_{св}) + p_{с.д} \leq \sigma_{0,2}.$$

Следовательно, толщина дна снаряда по его оси

$$h'_d \geq \frac{r}{2} \sqrt{\frac{3p_{oc}}{2(\sigma_{0,2} - p_{с.д})}} (3 + \mu - 2\zeta_{св}). \quad (4.29)$$

Таблица 4.1

Формулы для определения напряжений в сечениях дна снаряда

На- пря- жения	Номер точки (см. рис. 4.10)			
	1	2	3	4
σ_r	$\frac{3}{8} \frac{p_{oc} r^2}{h_d^2} \times$	$\frac{3}{8} \frac{p_{oc} r^2}{h_d^2} \times$	$-\frac{3}{4} \zeta_{св} \frac{p_{oc} r^2}{h_d^2}$	$\frac{3}{4} \zeta_{св} \frac{p_{oc} r^2}{h_d^2}$
σ_τ	$\times (3 + \mu - 2\zeta_{св})$	$\times (3 + \mu - 2\zeta_{св})$	$-\frac{3}{4} \frac{p_{oc} r^2}{h_d^2} \times$ $\times (1 - \mu - \zeta_{св})$	$\frac{3}{4} \frac{p_{oc} r^2}{h_d^2} (1 - \mu - \zeta_{св})$
σ_{oc}	$-p_{с.д}$	$-p_{п.г}^{расч}$	$-p_{с.д}$	$-p_{п.г}^{расч}$
$\sigma_{пр}$	$\sigma_{r1} + p_{с.д}$	$\sigma_{r1} - p_{п.г}^{расч}$	$\sigma_{r4} - p_{с.д}$	$\sigma_{r4} + p_{п.г}^{расч}$

Сравнивая выражения для напряжений в точках 3 и 4 (см. табл. 4.1), можно утверждать, что приведенные напряжения $\sigma_{пр}$ достигают своего наи-
большого значения в точке 4 дна снаряда. Поэтому *условие прочности у донного среза* имеет вид

$$\frac{3}{4} \zeta_{св} \frac{p_{oc} r^2}{h_d^2} + p_{п.г}^{расч} \leq \sigma_{0,2}.$$

Исходя из этого условия *толщина дна снаряда по его периметру*

$$h_d'' \geq \frac{r}{2} \sqrt{\frac{3 p_{oc}}{\sigma_{0,2} - p_{п.г}^{расч}} \zeta_{св}}. \quad (4.30)$$

Рассчитав толщину сплошного дна по оси и по его периметру, следует выбрать ее наибольшее значение.

Для вычисления прогиба сплошного дна снаряда применяют формулы Безухова. Вначале следует проверить дно снаряда на сохранение сплошности металла, для чего необходимо рассчитать критическое приведенное давление по формуле

$$p_{кр} = 2,42 \sigma_{0,2} (h_d / r)^2$$

и сравнить его с приведенным осевым давлением p_{oc} , вычисляемым по формуле (4.23).

Если $p_{oc} < p_{кр}$, то трещины в дне снаряда при выстреле не образуются, следовательно, будет обеспечена необходимая прочность дна снаряда. Если это условие не выполняется, необходимо увеличить толщину дна снаряда.

Прогиб посередине дна снаряда

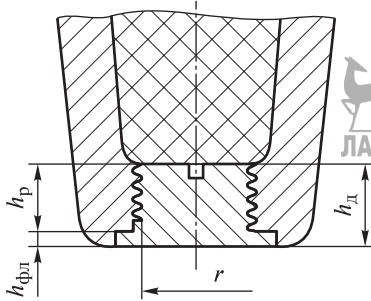
$$H_d = \varepsilon r^2 / (4h_d),$$

где $\varepsilon = 2 \left(\frac{r^2}{h_d} \right)^2 \frac{p_{oc}}{E}$ — относительное удлинение волокон металла.

Окончательный прогиб дна снаряда

$$H_d = \frac{1}{2} \frac{r^4}{h_d^3} \frac{p_{oc}}{E}. \quad (4.31)$$

Винтовое дно снаряда (рис. 4.14) не имеет упругой связи со стенками корпуса снаряда, поэтому по периметру винтового дна не возникают изгибающие моменты, а наибольшая интенсивность напряженного состояния развивается в зоне точки 1 (см. рис. 4.10). Толщина h_d винтового дна снаряда с учетом его прочности при работе на изгиб определяется по формуле (4.29), для сплошного дна принимается $\zeta_{св} = 0$.



Подставив значение коэффициента Пуассона $\mu = 1/3$ и $\zeta_{св} = 0$ в (4.29), получим

Рис. 4.14. Винтовое дно снаряда

$$h_d \geq \frac{r}{2} \sqrt{\frac{5p_{oc}}{\sigma_{0,2} - p_{с.д}}}. \quad (4.32)$$

При выстреле под давлением пороховых газов может произойти срезание сплошного дна снаряда по его периметру. Усилие срезания $F_{ср} = p_{oc} \pi r^2$ воспринимается площадью $S = 2\pi r h_d$ (см. рис. 4.14). При этом должно выполняться условие прочности $\tau \leq [\tau]$, где $[\tau] = 0,5\sigma_{\tau}$.

Толщину сплошного винтового дна снаряда можно рассчитать следующим образом:

$$h_d \geq \frac{p_{п.г}^{расч} r}{\sigma_{\tau}} \left[1 - \frac{R^2}{r^2} \frac{q_{ВВ}^*}{q} \right]. \quad (4.33)$$

Если снаряжение не опирается на дно снаряда, следует принять $q_{ВВ}^* = 0$.

В результате воздействия пороховых газов на винтовое дно может произойти срезание резьбы и фланца дна снаряда (см. рис. 4.14).

Усилие срезания $F_{ср} = p_{oc} \pi r^2$ воспринимается площадью $S = 2\pi r (h_p/2 + h_{фл})$, где r — средний радиус резьбы дна снаряда; h_p — высота резьбы дна; $h_{фл}$ — толщина фланца дна. Следовательно, условие прочности винтового дна

$$h_{фл} \geq 2 \frac{p_{п.г}^{расч} r}{\sigma_{0,2}} \left[1 - \frac{R^2}{r^2} \frac{q_{ВВ}^* + q_d}{q} \right] - h_p. \quad (4.34)$$

При расчете толщины винтного дна снаряда сначала вычисляют общую толщину h_d дна снаряда исходя из условия прочности при его работе на изгиб, а затем рассчитывают толщину $h_{фл}$ фланца винтного дна.

Контрольные вопросы

1. Для каких типов преград можно применять ОФС?
2. Какие преимущества дает донное размещение взрывателя в ОФС по сравнению с головным размещением?
3. Почему полубронебойные снаряды уступают по осколочному действию осколочно-фугасным?
4. Как выбрать массу в техническом задании на проектирование ОФС?
5. Какие преимущества по параметрам осколочного действия дает центральное инициирование разрывного заряда по сравнению с головным?
6. Какова эффективность действия активно-реактивных снарядов по сравнению с эффективностью ОФС?
7. С какой целью дно корпуса ОФС выполняют фигурной формы?
8. Допускается ли появление пластических деформаций в запоясковой части ОФС во время движения по каналу ствола?
9. Как рассчитать прочность стенок корпуса ОФС в сечениях, расположенных выше ведущего пояса?
10. В каких сечениях дна корпуса ОФС возникают наиболее опасные напряжения?
11. Чем различается поведение материала корпуса ОФС в его запоясковой части при разных нагрузках и геометрических размерах запоясковой части?
12. Какие нагрузки учитывают при расчете на прочность запального стакана ОФС?
13. Необходимо ли добиваться снижения аэродинамического сопротивления кумулятивных снарядов?
14. Почему кумулятивные снаряды не применяют в артиллерийских системах с нарезными стволами?
15. Взрыватели какого типа применяют в кумулятивных снарядах?



Глава 5. БРОНЕБОЙНЫЕ СНАРЯДЫ

5.1. Назначение и классификация бронепойных снарядов

Бронепойные снаряды предназначены для поражения бронированных целей во время стрельбы прямой наводкой из танковых и противотанковых пушек за счет кинетической энергии бронепойного сердечника. К *бронированным целям* относятся основные боевые танки, оснащенные многослойной композитной броней, а также комплектами динамической и активной защиты.

Бронепойные снаряды применяются в танковых и противотанковых пушках, в малокалиберных автоматических пушках наземной и морской артиллерии, а также в малокалиберных автоматических авиационных пушках.

Для изготовления активной части бронепойных снарядов используют такие материалы, как металлический сплав на основе вольфрама или обедненный уран. Основным преимуществом обедненного урана перед другими материалами является его высокая технологичность и постоянство физико-механических свойств, но ионизирующее излучение этого материала ограничивает его широкое применение в промышленности. В настоящее время бронепойные снаряды используют в танковых пушках калибра 100, 115, 125 мм и малокалиберных автоматических пушках калибра 30 мм.

В случае применения в артиллерийских системах выстрелов унитарного заряжания бронепойный подкалиберный снаряд исполняется с ведущим устройством *катушечного* типа (рис. 5.1).

В выстрелах раздельно-гильзового заряжания используют бронепойный подкалиберный снаряд с ведущим устройством *прижимного* типа, которое

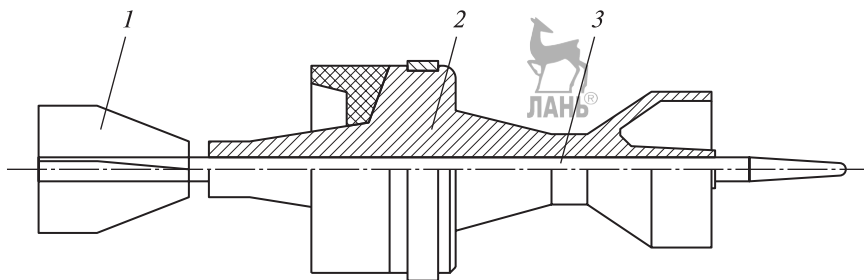


Рис. 5.1. Бронепойный снаряд с ведущим устройством катушечного типа:

1 — оперение; 2 — ведущее устройство; 3 — бронепойный сердечник

имеет развитую коническую поверхность, соединенную с корпусом снаряда с помощью резьбы (рис. 5.2). Ведение по стволу осуществляется по двум опорам, которые находятся в канале ствола под натягом.

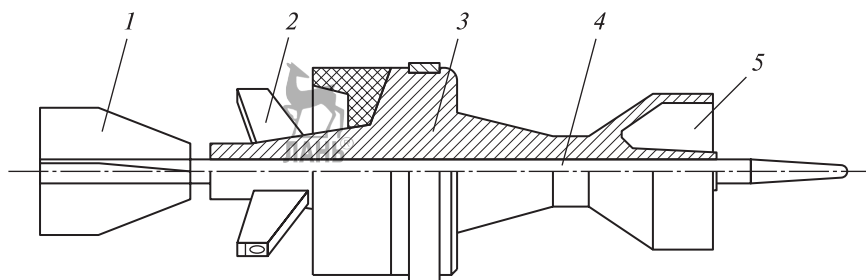


Рис. 5.2. Бронебойный снаряд с ведущим устройством прижимного типа и двумя опорами:

1 — оперение; 2 — пилоны; 3 — ведущее устройство; 4 — бронебойный сердечник; 5 — воздухозаборник

Для уменьшения потерь скорости на траектории оперение выполняется подкалиберным (диаметр оперения меньше калибра снаряда). Задняя опора ведущего устройства выполняется в виде трех пилонов и более.

Для бронебойных снарядов к малокалиберным авиационным пушкам применяют конструкцию без отделяемых в момент вылета из ствола составных частей. Эти снаряды бывают:

- с активной частью (рис. 5.3);

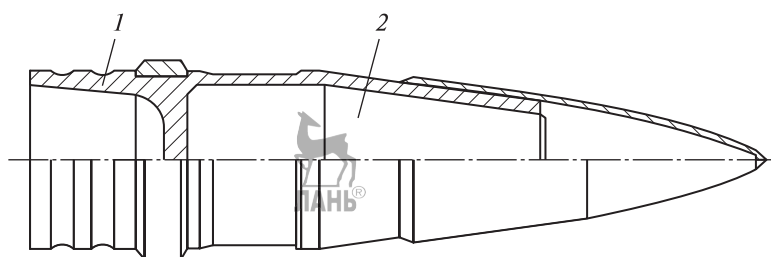


Рис. 5.3. Бронебойный снаряд к авиационной пушке:

1 — поддон; 2 — бронебойный сердечник

- цельнокорпусные без бронебойного сердечника, имеющие активную часть, выполненную из однородного материала; возможно исполнение с каморой для зажигательного состава (рис. 5.4).

Отделение ведущего устройства после вылета из канала ствола происходит при вылете снаряда из канала ствола и освобождении опорных кольцевых секторов от уплотнительного кольца. Опорные кольцевые секторы под воздействием пороховых газов и набегающего потока воздуха, действующих на уменьшенную донную и переднюю полноразмерную полости кольцевых

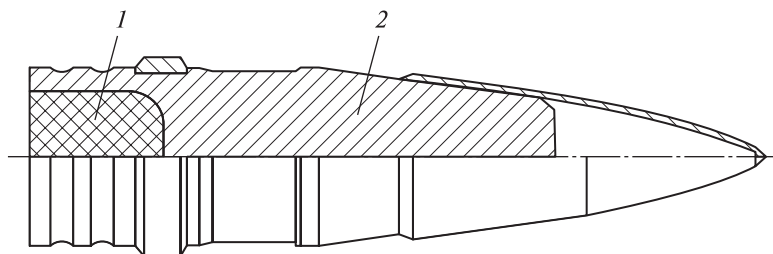


Рис. 5.4. Цельнокорпусной бронебойный снаряд:

1 — зажигательный состав; 2 — корпус снаряда

секторов, беспрепятственно разлетаются в стороны за счет равенства опрокидывающих опорный кольцевой сектор моментов (рис. 5.5):

$$F_B l_B = F_{п.г} l_{п.г}, \quad (5.1)$$

где F_B — сила сопротивления воздуха, действующая на переднюю полноразмерную полость опорного кольцевого сектора в момент отделения от активной части снаряда; l_B — расстояние от точки приложения силы сопротивления воздуха до центра масс опорного кольцевого сектора; $F_{п.г}$ — сила давления пороховых газов, действующая на уменьшенную донную полость опорного кольцевого сектора; $l_{п.г}$ — расстояние от точки приложения результирующей силы давления пороховых газов до центра масс опорного кольцевого сектора.

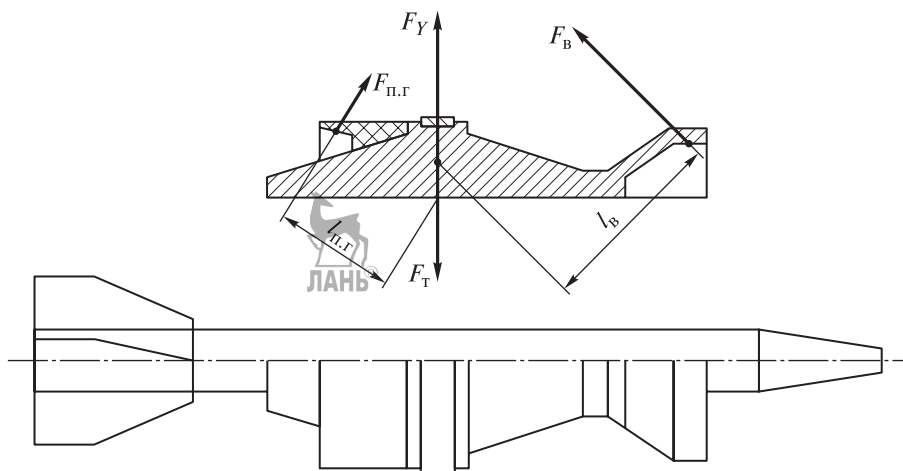


Рис. 5.5. Схема сил, действующих на ведущее устройство в момент его отделения от снаряда

При правильном отделении отрыв опорных кольцевых секторов от активной части происходит плавно и одновременно, если выполняется условие $F_Y > F_T$, где F_Y — результирующая подъемная сила; F_T — сила тяжести.

В бронебойных снарядах к нарезным пушкам перед отделением секторов ведущего устройства происходит разрушение баллистического наконечника под действием центробежных сил, обусловленных собственным вращением снаряда (рис. 5.6).

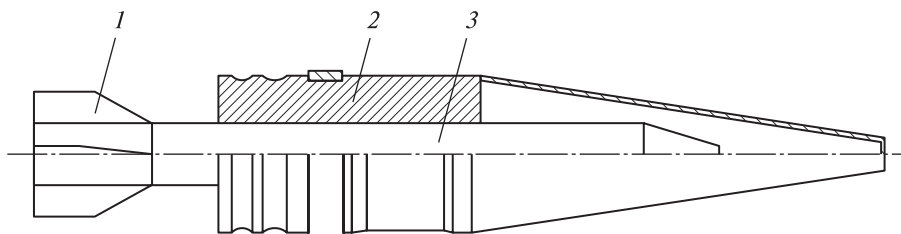


Рис. 5.6. Ведущее устройство, отделяемое от снаряда под действием пороховых газов:

1 — оперение; 2 — ведущее устройство; 3 — бронебойный сердечник

На этапе *эскизного проектирования* необходимо:

- задать геометрические размеры бронебойного сердечника (диаметр и длину), соответствующие его габаритным размерам в автомате заряжания в артиллерийской системе. Для танковых и противотанковых орудий максимальная длина снаряда — $(5...7)d$ (где d — калибр снаряда), для малокалиберных автоматических пушек калибра 30 мм — $4,5d$;
- выполнить ведущее устройство отделяемым (для наземной артиллерийской системы) или неотделяемым (для авиационных артиллерийских систем);
- выбрать ведущее устройство в соответствии с типом заряжания (унитарным или раздельно-гильзовым);
- рассчитать длину винтовой гребенки ведущего устройства в последовательности, описанной в гл. 3;
- выбрать минимально возможный диаметр сердечника исходя из его условий прочности при выстреле в канале ствола;
- провести расчет баллистического наконечника, перьев стабилизатора на прочность;
- выбрать размеры узла оперения, обеспечивающего устойчивость бронебойного подкалиберного снаряда на траектории.

На этапе *технического проекта* необходимо обеспечить изготовление:

- бронебойного сердечника с заданными характеристиками прочности и допустимыми биениями по длине и отклонениями по овальности;
- канавки под ходовую резьбу;
- секторов поддонов подкалиберного снаряда с заданными отклонениями от плоскостности.

На этапе *предварительных испытаний* опытный образец подвергают проверке на прочность, функционирование в канале ствола и бронепробиваемость.

5.2. Расчет на прочность сердечника бронебойного снаряда

При оценке прочности сердечника бронебойного снаряда при выстреле за опасные сечения принимают (рис. 5.7):

а) сечение I—I в утоненной шейке выше верхнего зубца гребенки, где возникают напряжения сжатия $\sigma_{сж}$;

б) сечение II—II в утоненной шейке под нижним зубцом гребенки, где возникают растягивающие напряжения σ_p ;

в) сечение III—III, соответствующее началу резьбы на хвостовике сердечника для соединения со стабилизатором (в этом сечении напряжения также будут растягивающими).

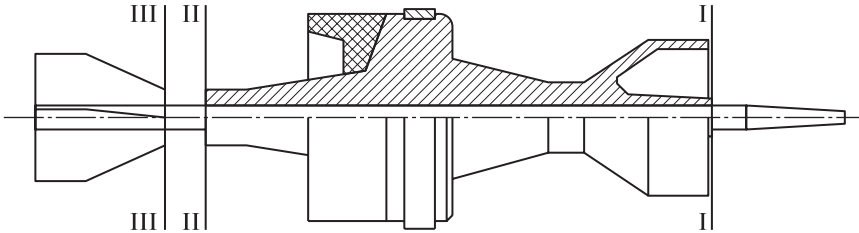


Рис. 5.7. Расчетные (опасные) сечения корпуса снаряда

Напряжения в опасных сечениях рассчитывают с помощью следующих соотношений.

В сечении I—I

$$\sigma_{сж} = \frac{F_o}{S_{I-I}} = p_{п.г}^{расч} \frac{R^2}{r_{I-I}^2} \frac{q_b}{q}, \quad (5.2)$$

где F_o — осевая сила; S_{I-I} , r_{I-I} — площадь сечения I—I и радиус шейки в этом сечении соответственно; $p_{п.г}^{расч}$ — расчетное давление пороховых газов; $R = d/2$ (d — калибр снаряда); q_b — наседающая масса снаряда выше сечения ведущего пояса; q — масса снаряда.

Осевая сила в выражении (5.2) определяется по формуле

$$F_o = p_{п.г}^{расч} \pi R^2 \frac{q_b}{q}. \quad (5.3)$$

В сечении II—II осевая сила задается выражением

$$F_o = p_{п.г}^{расч} \pi R^2 \left[\frac{q_n}{q} - 1 + \left(\frac{d_n}{d} \right)^2 \right], \quad (5.4)$$

где q_n — масса снаряда со стабилизатором ниже сечения II—II; d_n — диаметр снаряда в сечении II—II.

Разделив осевую силу, рассчитываемую по формуле (5.4), на площадь S_{II-II} сечения II—II, получим растягивающие напряжения σ_p в этом сечении:

$$\sigma_p = \frac{p_{п.г}^{расч} R^2}{r_{II-II}^2} \left[\frac{q_n}{q} - 1 + \left(\frac{d_n}{d} \right)^2 \right]. \quad (5.5)$$

В сечении III–III

$$\sigma_p = \frac{p_{п.г}^{расч} R^2}{r_{III-III}^2} \left[\frac{q_n}{q} - 1 + \left(\frac{d_n}{d} \right)^2 \right], \quad (5.6)$$

где q_n — масса снаряда со стабилизатором ниже сечения III–III.

Рассчитанные по формулам (5.2), (5.5), (5.6) напряжения должны удовлетворять следующему условию:

$$\sigma_p(\sigma_{сж}) \leq \sigma_{0,2}, \quad (5.7)$$

где $\sigma_{0,2}$ — условный предел текучести материала сердечника бронебойного снаряда.

5.3. Расчет на прочность перьев стабилизатора и баллистического наконечника

Перья стабилизатора бронебойного снаряда определяют устойчивость полета и кучность боя бронебойных снарядов. На перо стабилизатора в подкалиберном исполнении (рис. 5.8) действуют осевые перегрузки, вследствие чего появляются напряжения изгиба.

Значение *изгибного напряжения* σ_n в опасном сечении пера стабилизатора толщиной δ_n и высотой h_n на расстоянии x_n от центра тяжести пера вычисляют по соотношению

$$\sigma_n = \frac{q_n p_{п.г}^{расч} \pi R^2}{q h_n \delta_n} \sqrt{\left(\frac{4x_n}{h_n} \right)^2 + 3} \leq \sigma_T, \quad (5.8)$$

где q_n — масса части пера от края до опасного сечения.

Условием прочности пера стабилизатора является соотношение

$$\sigma_n \leq \sigma_{0,2}, \quad (5.9)$$

где $\sigma_{0,2}$ — условный предел текучести материала пера стабилизатора.

Баллистический наконечник предназначен для уменьшения силы F_x лобового сопротивления воздуха при движении снаряда по траектории. При выстреле снаряда из орудия под действием сил инерции в стенках наконечника возникают *напряжения сжатия*

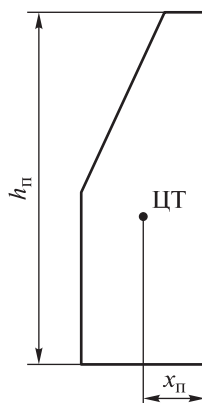


Рис. 5.8. Расчетное сечение в пере стабилизатора

$$\sigma_{сж} = \frac{q_v}{q} p_{п.г}^{расч} \frac{R^2}{R_{нк}^2 - r_{нк}^2}, \quad (5.10)$$

где $R_{нк}$, $r_{нк}$ — наружный и внутренний радиусы стенок наконечника соответственно.

Наибольшие напряжения соответствуют зоне сопряжения стенок наконечника с корпусом снаряда, в которой должно выполняться условие прочности

$$\sigma_{сж} \leq 0,57\sigma_t, \quad (5.11)$$

где σ_t — предел текучести материала баллистического наконечника.

При минимальной толщине наконечника сжимающие напряжения $\sigma_{сж}$ будут *критическими* $\sigma_{кр}$, т. е. такими, при которых наступает потеря устойчивости наконечника в упругой зоне работы его материала.

Для того чтобы стенки наконечника не теряли устойчивости в упругой зоне, необходимо выполнение условия

$$\sigma_{кр} \leq \sigma_t. \quad (5.12)$$

Поскольку

$$\sigma_{кр} = \frac{Eh_{нк}}{r_{ср}\sqrt{3(1-\mu^2)}},$$

то

$$\frac{Eh_{нк}}{r_{ср}\sqrt{3(1-\mu^2)}} \leq \sigma_t,$$

откуда

$$h_{нк} \leq r_{ср}\sigma_t \frac{\sqrt{3(1-\mu^2)}}{E}$$

где $h_{нк}$, $r_{ср}$ — толщина стенок и радиус срединной поверхности наконечника; μ , E — коэффициент Пуассона и модуль упругости материала баллистического наконечника.

Контрольные вопросы

1. Почему в выстрелах раздельно-гильзового заряжания не применяют бронебойные снаряды с ведущими устройствами катушечного типа?
2. Каковы преимущества и недостатки применения обедненного урана в сердечниках бронебойных подкалиберных снарядов?
3. Какие преимущества дает применение в бронебойных подкалибер-

ных снарядах калиберного оперения? Каковы его недостатки?

4. Почему не допускается применение отделяемых поддонов в снарядах к авиационным пушкам?

5. Чем ограничивается увеличение степени удлинения бронебойных сердечников (отношения длины к диаметру)?

6. Почему скорость встречи бронебойного снаряда с преградой должна быть выше скорости сквозного пробития на несколько процентов?

7. Как изменится падение скорости на траектории при увеличении массы сердечника бронебойного снаряда?

8. Как определяется значение наседающей массы сердечника при расчете на прочность его хвостовой и головной частей?

9. Какой тип резьбы используется для крепления ведущего устройства к сердечнику бронебойного подкалиберного снаряда?



Глава 6. КАССЕТНЫЕ СНАРЯДЫ

6.1. Конструктивно-компоновочная схема кассетных артиллерийских снарядов и классификация их элементов

В общем случае кассетный артиллерийский снаряд (КАС) представляет собой контейнер-корпус (рис. 6.1), в камере которого между поршнем 4 и дном 11 слоями уложены боевые элементы (БЭ) различного назначения и действия. Кассетные снаряды обладают повышенной эффективностью действия, которая достигается за счет разброса на площади БЭ.

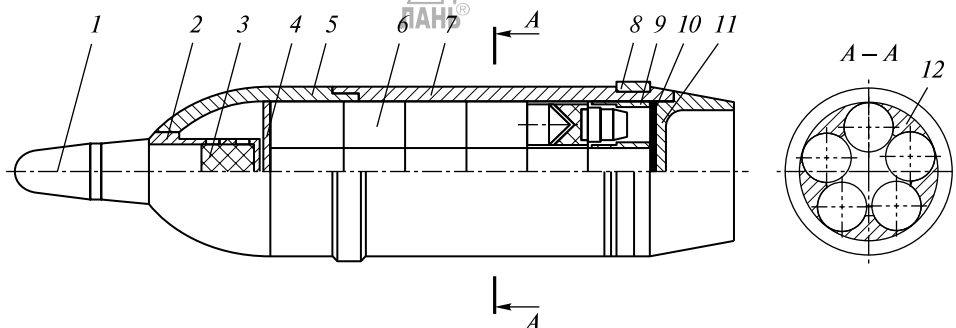


Рис. 6.1. Вариант конструктивно-компоновочной схемы КАС:

1 — дистанционный взрыватель; 2 — перфорированная трубка вышибного заряда; 3 — вышибной заряд; 4 — поршень; 5 — обтекатель; 6 — блок БЭ; 7 — корпус; 8 — ведущий пояс; 9 — опорный стакан; 10 — набор прокладок; 11 — дно; 12 — сектор (шпонка)

В ствольной артиллерии кассетными являются снаряды калибра 152 мм. В них применяются неуправляемые БЭ (или БЭ свободного рассеивания), к которым относятся осколочные, кумулятивно-осколочные и зажигательные БЭ. При вскрытии контейнера с БЭ срезается дно корпуса с помощью порохового вышибного заряда (ВЗ).

В КАС применяют БЭ с *аэродинамической* стабилизацией с помощью перьевых, ленточных, петлевых, лопастных или купольно-парашютных стабилизаторов и вращающиеся БЭ с *гироскопической* стабилизацией.

По месту разрыва элемента и типу ВУ выделяют БЭ:

- наземного подрыва (с контактным взрывателем);
- воздушного подрыва с подбросом после удара о землю (с ударным воспламенителем заряда разделения и замедлителем);
- траекторного подрыва (с неконтактным взрывателем).

Для обеспечения оптимальных условий полета БЭ после его выброса из корпуса снаряда и получения равномерного распределения боевых элементов на местности необходимо уменьшить скорость их движения и, соответственно, сократить длину пути стабилизации полета БЭ. Практика показывает, что наиболее рациональной конструктивной схемой КАС является *схема с выбросом блока БЭ через донную часть снаряда*. Это позволяет также компактно укладывать БЭ в корпусе и размещать в нем наибольшее их количество.

Корпус КАС имеет удлиненную цилиндрическую часть и короткую коническую хвостовую часть, чем достигается большой внутренний объем. Выброс БЭ осуществляется через донную часть с помощью ВЗ. Отделяемое дно соединено с корпусом металлическими винтами (штифтами) или резьбой в один оборот, срезаемыми под давлением газов, которые образуются в результате сгорания пороха ВЗ.

Вышибной заряд 3 (см. рис. 6.1) размещается в головной части снаряда между дистанционным взрывателем 1 и поршнем 4, который служит для передачи давления пороховых газов на элементы, связывающие корпус снаряда с его дном, и для выбрасывания БЭ.

Конструктивно навеска пороха ВЗ насыпается в тонкостенный металлический стакан с ослабленной крышкой или в мешочек из миткалевой ткани и устанавливается обычно в прочный перфорированный корпус из стали или алюминиевого сплава. В качестве топлива используют дымный порох типа ДРП-2 или пироксилиновый типа Сф033.

Возможны варианты компоновки КАС без поршня или с поршнем, имеющим пропускное отверстие для газов. В этом случае пороховые газы заполняют весь внутренний объем корпуса между боевыми элементами и непосредственно воздействуют на срезаемое дно.

Кассетные снаряды комплектуются электронными, механическими или пиротехническими временными взрывателями. Перед заряданием орудия кассетным боеприпасом на позиции устанавливают дистанционный взрыватель, задающий время распада снаряда на заданной высоте полета. После выстрела вскрытие КАС на траектории происходит следующим образом: в установленный момент времени срабатывает дистанционный взрыватель 1 (см. рис. 6.1) и воспламеняется порох ВЗ; образующиеся пороховые газы через отверстия в перфорированной трубке 2 заполняют внутренний объем обтекателя 5 и давят на поршень 4; в процессе горения ВЗ увеличивается давление газов в обтекателе, а когда оно достигает значения, превышающего усилие среза резьбы ввинтного дна, происходят срез резьбы, отделение дна от корпуса, движение поршня и блока БЭ в камере снаряда и дальнейший выброс БЭ.

Количественно процесс вскрытия КАС можно охарактеризовать следующими величинами:

- 1) относительными скоростями выброса БЭ из корпуса снаряда на траектории и абсолютными скоростями ввода БЭ в воздушный поток;
- 2) начальными углами и угловыми скоростями (в экваториальной плоскости) БЭ в момент выхода из камеры снаряда;
- 3) углами разлета БЭ в точке вскрытия КАС на траектории.

Боевые элементы выбрасываются из корпуса КАС послойно или всем блоком и разбрасываются на определенной площади под действием центробежных сил или специальных механизмов. Для уменьшения скорости падения и скорости стабилизации в вертикальном положении каждый БЭ снабжается стабилизирующим устройством.

6.2. Выбор типа боевого элемента для снаряжения кассетного снаряда

Кассетные артиллерийские снаряды могут снаряжаться осколочными БЭ (ОБЭ) и кумулятивно-осколочными БЭ (КОБЭ). Современные образцы снаряжаются в основном КОБЭ и предназначаются для борьбы с небронированными и легкобронированными целями (требуемый уровень бронепробиваемости — 100 мм), а также для вскрытия динамической защиты и нанесения ущерба танкам в районе двигателя, что не требует высокого уровня бронепробиваемости. При этом увеличивается вероятность поражения цели, так как КОБЭ поражают цель с верхней проекции, которая имеет наименьшую защиту.

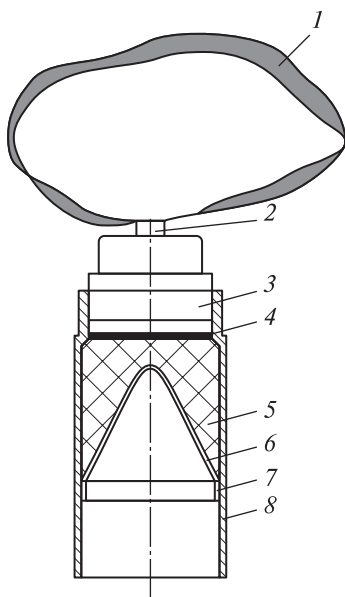


Рис. 6.2. Вариант конструктивной схемы КОБЭ:

1 — стабилизирующее устройство; 2 — ударник; 3 — донный взрыватель; 4 — прокладка; 5 — заряд ВВ; 6 — кумулятивная воронка; 7 — поджимное кольцо; 8 — стальной корпус

Оптимальное фокусное расстояние КОБЭ для получения максимальной бронепробиваемости составляет 3–4 диаметра заряда. При этом бронепробиваемость достигает значения, превышающего 7 диаметров заряда, а отношение длины кумулятивного заряда к его диаметру составляет 1,5.

Оптимизация параметров КОБЭ под заданный уровень бронепробиваемости с обеспечением высокого остаточного действия кумулятивной струи имеет свои особенности. Основными трудностями являются:

- жесткие ограничения по укладочной длине и, соответственно, высоте заряда, конструктивному фокусному расстоянию (около одного диаметра заряда), а также минимальному диаметру БЭ для обеспечения размещения максимального количества КОБЭ в снаряде;
- высокие перегрузки, испытываемые элементами при выстреле, что требует наличия толстостенного стального корпуса БЭ.

На рис. 6.2 показан один из вариантов конструктивного исполнения КОБЭ, включающий следующие основные элементы: стальной корпус 8, заряд взрывчатого вещества (ВВ) 5 с кумулятивной облицовкой, донный взрыватель 3 и стабилизирующее устройство 1.

Для обеспечения прочности КОБЭ при выстреле и получения максимальной эффективности от осколочного потока в качестве материала корпуса используют сталь марки 40Х или 45Х1. В кумулятивном узле в качестве разрывного заряда применяют ВВ типа окфол-3,5, а в качестве материала кумулятивной облицовки — медь марки М1.

Для предотвращения выпадения облицовки при эксплуатации ее основание поджимают к заряду ВВ с помощью кольца или закатывают в паз в корпусе КОБЭ.

Взрыватель обеспечивает подрыв КОБЭ при встрече с преградой. В большинстве случаев это механический контактный взрыватель, который снабжен пиротехнической системой самоликвидации при отказе от удара.

Стабилизирующее устройство предназначено для стабилизации и вертикализации траектории движения БЭ после выброса из корпуса боеприпаса, а также для уменьшения скорости падения. Оно размещается на ударнике взрывателя, может свободно вращаться относительно него и состоит из гибкой ленты (обычно капроновой), втулки и шайбы.

Боевые элементы цилиндрической формы укладывают в цилиндрическую камеру корпуса КАС параллельными слоями так, чтобы оси БЭ располагались параллельно оси боеприпаса. Кроме того, по форме БЭ выполнен таким образом, что один его конец (обычно со стороны взрывателя со стабилизатором) входит в противоположный конец соседнего БЭ.

На рис. 6.3 изображена схема размещения БЭ в корпусе КАС, оптимальная с точки зрения эффективности действия.

На этапе *эскизного проектирования* КАС необходимо разместить максимально возможное количество БЭ в обводах штатного ОФС (рекомендуемое число БЭ в поперечном сечении равно семи) и выполнить проверочный расчет на прочность элементов КАС при действующих нагрузках в канале ствола при выстреле.

На этапе *технического проекта* при создании опытного образца важной задачей является отработка технологического процесса изготовления корпуса снаряда из стали с требуемыми характеристиками (пределом прочности $\sigma_{0,2}$ и относительным удлинением после разрыва). В настоящий момент таким характеристикам наилучшим образом удовлетворяет сталь 60С2.

Далее проводят *предварительные испытания*:

- на осколочное действие в броняе и щитовой — мишенной обстановке кассетного БЭ;
- работоспособность ВЗ при вскрытии корпуса снаряда;
- разброс кассетных БЭ на местности.

После успешного прохождения предварительных испытаний изготавливают опытную партию образцов КАС.



Рис. 6.3. Схема размещения БЭ в корпусе КАС

6.3. Расчет на прочность элементов конструкции кассетного снаряда

При определении прочности элементов конструкции КАС для всех расчетных случаев должны быть вычислены коэффициенты запаса прочности ζ_σ по напряжению и ζ_ε по деформации:

$$\zeta_\sigma = [\sigma]/\sigma; \quad \zeta_\varepsilon = [\varepsilon]/\varepsilon,$$

где $[\sigma]$, $[\varepsilon]$ — допустимые значения напряжения и деформации соответственно.

Правильно спроектированные узлы и детали КАС должны удовлетворять следующим условиям:

$$\zeta_\sigma \geq [\zeta_\sigma] > 1; \quad \zeta_\varepsilon \geq [\zeta_\varepsilon] > 1,$$

где $[\zeta_\sigma]$, $[\zeta_\varepsilon]$ — принятые минимальные значения коэффициентов запаса.

Если $\zeta_\sigma < 1$ или $\zeta_\varepsilon < 1$, необходимо либо увеличить толщину стенок корпусных деталей и дна (если позволяют массогабаритные ограничения), либо использовать материал с другими механическими характеристиками, удовлетворяющими требованиям к запасу прочности, либо провести термообработку материала для повышения его прочностных характеристик.

Прочность БЭ. Выделим основные параметры, определяющие нагрузки на элементы КАС при выстреле:

- *максимальная перегрузка при выстреле*

$$\zeta_{\text{пер}}^{\text{max}} = \frac{j_{\text{max}}}{g} = \frac{\pi p_{\text{max}}}{4g} \frac{d^2}{q_{\text{КАС}}} = \frac{\pi}{4g} \frac{p_{\text{max}}}{\bar{q}d},$$

где j_{max} — максимальное ускорение при выстреле; g — ускорение силы тяжести; p_{max} — максимальное давление пороховых газов; d — калибр снаряда; $q_{\text{КАС}}$ — масса КАС; $\bar{q} = q_{\text{КАС}}/d^3$ — относительная масса снаряда;

- *угловая скорость вращения снаряда при вылете из канала ствола*

$$\Omega_0 = \frac{2\pi v_0}{\eta_{\text{нар}} d},$$

где v_0 — начальная (дульная) скорость снаряда; $\eta_{\text{нар}} = \frac{\pi}{\text{tg} \alpha_{\text{нар}}}$ ($\alpha_{\text{нар}}$ — угол наклона нарезов ствола);

- *угловое ускорение*

$$j_\omega = \frac{2\pi j_{\text{max}}}{\eta_{\text{нар}} d} = \frac{2\pi g \zeta_{\text{пер}}^{\text{max}}}{\eta_{\text{нар}} d} = \frac{\Omega_0 g \zeta_{\text{пер}}^{\text{max}}}{v_0}.$$

При выстреле элементы КАС подвергаются наиболее интенсивному нагружению на двух этапах движения снаряда по стволу.

На первом этапе одновременно с давлением пороховых газов максимума достигают продольные (осевые) силы, приложенные со стороны наседающих деталей, угловые ускорения БЭ и соответствующие реакции со стороны корпуса и дна снаряда. На втором этапе (при подходе снаряда к дульному срезу) максимума достигают угловая скорость вращения, центробежные силы и соответствующие им реакции.

Прочность торца корпуса БЭ нижнего ряда. Продольная сила, действующая на передний торец корпуса БЭ нижнего ряда при выстреле, и продольные (контактные) напряжения на переднем торце корпуса БЭ определяются следующим образом:

$$F_z = q_n g \zeta_{\text{пер}}^{\max}; \quad \sigma_z = F_z / S,$$

где $q_n = N_{\text{БЭ}} q_{\text{БЭ}} + \frac{q_{\text{н1}}}{N_{\text{БЭ}}}$ — суммарная масса наседающих деталей, опирающихся на БЭ нижнего ряда ($N_{\text{БЭ}}$, $q_{\text{БЭ}}$ — количество и масса БЭ соответственно; $q_{\text{н1}}$ — масса деталей, наседающих на передний торец блока БЭ (например, масса поршня)); $S = \pi(d_{\text{н}}^2 - d_{\text{в}}^2)/4$ ($d_{\text{н}}$, $d_{\text{в}}$ — наружный и внутренний диаметры корпуса БЭ по торцу).

Условие прочности торца корпуса БЭ нижнего ряда — продольное напряжение не превышает динамического предела $\sigma_{\text{т лин}}$ текучести материала — задается неравенством

$$\sigma_z \leq [\sigma_{\text{т лин}}] = \sigma_{\text{т}} \zeta_{\text{лин}},$$

где $\sigma_{\text{т}}$ — предел текучести материала корпуса БЭ; $\zeta_{\text{лин}} \approx 1,1$ — коэффициент «динамичности» для термообработанных стальных снарядных сталей.

Напряжения в снаряжении БЭ. Продольная сила, действующая в среднем сечении корпуса БЭ нижнего ряда (среднее значение), и продольное напряжение определяются следующим образом:

$$F_{z \text{ ср}} = F_z \frac{q_{\text{БЭ}} g \zeta_{\text{пер}}^{\max}}{2}; \quad \sigma_{z \text{ ср}} = F_{z \text{ ср}} / S_{\text{ср}},$$

где $S_{\text{ср}} = \pi(d_{\text{н.ср}}^2 - d_{\text{в.ср}}^2)/4$ ($d_{\text{н.ср}}$, $d_{\text{в.ср}}$ — наружный и внутренний диаметры корпуса БЭ в средней части).

При вычислении $S_{\text{ср}}$ можно применить расчетную схему корпуса в виде цилиндрической оболочки постоянной толщины, изгибная жесткость которой эквивалентна жесткости реального корпуса. Тогда выражение для продольного напряжения можно записать в виде

$$\sigma_{z \text{ ср}} = \frac{F_{z \text{ ср}}}{2\pi r_{\text{ср}}^{\text{БЭ}} h_{\text{экв}}^{\text{БЭ}}},$$

где $r_{\text{ср}}^{\text{БЭ}}$, $h_{\text{экв}}^{\text{БЭ}}$ — средний радиус и эквивалентная толщина корпуса БЭ.

При выстреле наибольшие напряжения возникают в нижнем торце заряда ВВ:

$$\sigma_z^{BB} = 0,5(\sigma_1^{BB} + \sigma_2^{BB}) = \frac{g_{\text{пер}}^{\text{max}}}{2} \left[\frac{q_{BB} + q_n}{S_r} + \left(H_{BB} \rho_{BB} + \frac{q_n}{S_r} \right) \right] \leq [\sigma_z^{BB}],$$

где σ_1^{BB} — максимальное продольное напряжение в заряде ВВ, вычисляемое в предположении о недеформируемости заряда ВВ; σ_2^{BB} — максимальное гидростатическое давление в заряде ВВ; q_{BB} — масса заряда ВВ; S_r — площадь нижнего торца заряда ВВ; H_{BB} — высота заряда ВВ; ρ_{BB} — плотность заряда ВВ; $[\sigma_z^{BB}]$ — допустимые напряжения в заряде ВВ (для тротила $[\sigma_z^{BB}] = 100$ МПа).

Напряжения в корпусах БЭ нижнего ряда. В нижнем ряду в корпусе БЭ возникают касательные напряжения σ_τ от давления снаряжения:

$$\sigma_\tau = -\frac{p_{\text{сн}} d_{\text{в}}}{4h_{\text{БЭ}}},$$

где $p_{\text{сн}} = 0,6\sigma_z^{BB}$ — боковое давление снаряжения на стенки корпуса БЭ; $h_{\text{БЭ}}$ — толщина стенки корпуса БЭ.

Условие прочности по Мизесу в данном случае имеет вид

$$\sqrt{\sigma_z^2 - \sigma_z \sigma_\tau + \sigma_\tau^2} \leq [\sigma_\tau]. \quad (6.1)$$

Деформация корпуса от действия продольной силы. Абсолютная деформация корпуса от действия продольной силы $F_{\text{пр}}^{\text{БЭ}}$ определяется следующим образом:

$$\varepsilon_k = \frac{F_{\text{пр}}^{\text{БЭ}} l_k^{\text{БЭ}}}{\Theta} = \frac{F_{\text{пр}}^{\text{БЭ}} l_k^{\text{БЭ}}}{ES_r},$$

где $l_k^{\text{БЭ}}$ — длина корпуса БЭ, м; Θ — жесткость корпуса, Н/м; E — модуль упругости материала корпуса БЭ.

Деформация корпуса не должна превышать допустимую деформацию:

$$\varepsilon_k \leq [\varepsilon_k] = \frac{[\sigma_\tau] l_k^{\text{БЭ}}}{E}.$$

Прочность БЭ на изгиб при ускорении КАС. Радиальная сила $F_{\text{БЭ}} = F_{\text{шп}}/N_{\text{БЭ}}$, действующая на корпус БЭ по образующей наружной поверхности (рис. 6.4) вследствие углового ускорения, определяется силой $F_{\text{шп}}$ от углового ускорения, действующей на одну шпонку:

$$F_{\text{шп}} = \frac{A_{\text{бл.БЭ}} j_\omega}{r_{\text{сопр}} \cos \theta_{\text{БЭ}}} \frac{1}{N_{\text{шп}}},$$

где $A_{\text{бл.БЭ}}$ — осевой момент инерции всего блока БЭ с присоединенными деталями; $r_{\text{сопр}}$ — радиус сопряжения БЭ между собой; $\theta_{\text{БЭ}} \approx 45^\circ$ — угол между радиусом сопряжения и контактирующей силой; $N_{\text{шп}}$ — количество шпонок.

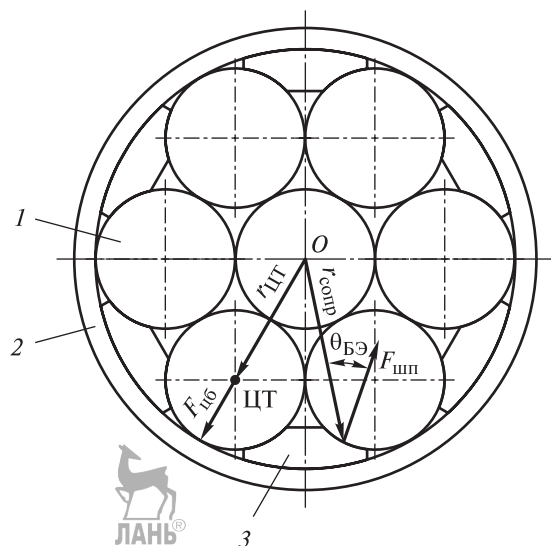


Рис. 6.4. Расчетная схема при нагружении радиальными и центробежными силами:

1 — БЭ; 2 — корпус КАС; 3 — шпонка

На наиболее нагруженный корпус БЭ по образующей наружной поверхности будет действовать центробежная сила $F_{\text{цб}}$.

Допустимые значения нормальных напряжений σ_y определяются по критерию Мизеса $\sigma_y^2 - \sigma_z \sigma_y + \sigma_z^2 = [\sigma_T]^2$, откуда

$$\sigma_{y(1,2)} = \frac{\sigma_z}{2} \pm \sqrt{\frac{\sigma_z^2}{4} + [\sigma_T]^2 - \sigma_z^2},$$

где индекс «1» означает сжатие (положительная величина); «2» — растяжение (отрицательная величина).

Часть толщины $\Delta_{\text{сж}}$ стенки БЭ, испытывающая сжатие от результирующей силы F_{Σ} в сечении, определяется из условия $\int_0^h \sigma_y dh = F_{\Sigma}$, откуда при $F_{\Sigma} = 0$

$$\Delta_{\text{сж}} = \frac{|\sigma_{y2}| h_{\text{БЭ}}}{\sigma_{y1} + |\sigma_{y2}|}.$$

Предельный изгибающий момент

$$M_{\text{и}} = \left[\sigma_z \frac{\Delta_{\text{сж}}^2}{2} + |\sigma_r| \frac{(h_{\text{БЭ}} - \Delta_{\text{сж}})^2}{2} \right] l_{\text{к}}^{\text{БЭ}}.$$

Условие прочности при изгибе:

$$4M_{\text{и}} \geq F_{\text{бэ}} r_{\text{ср}}^{\text{бэ}}.$$

Прочность опорного стакана. Условие прочности торца опорного стакана имеет вид

$$\sigma_z = \frac{q_{\text{н}} g \zeta_{\text{пер}}^{\text{max}}}{S_{\text{т}}} \leq [\sigma_{\text{т}}].$$

Критическое напряжение потери устойчивости опорного стакана от осевых нагрузок

$$\sigma_{\text{кр}} = 0,18 \frac{E h_{\text{бэ}}}{r_{\text{ср}}^{\text{бэ}}} > [\sigma_{\text{т дин}}].$$

Прочность корпуса КАС. Элементы корпуса КАС при выстреле испытывают напряжения от действия осевой инерционной нагрузки, возникающей от давления пороховых газов метательного заряда. При этом продольные напряжения корпуса КАС от инерционных нагрузок определены соотношением

$$\sigma_z = \frac{q_{\text{н}} g \zeta_{\text{пер}}^{\text{max}}}{S_{\text{т}}} \leq [\sigma_{\text{т}}].$$

В рассматриваемой схеме площадь сечения нижнего торца заряда ВВ определяется следующим образом:

$$S_{\text{т}} = \frac{\pi}{4} \left[(d_{\text{н}}^{\text{КАС}})^2 - (d_{\text{в}}^{\text{КАС}})^2 \right] - b_{\text{шп}} \Delta_{\text{шп}} N_{\text{шп}},$$

где $d_{\text{н}}^{\text{КАС}}$, $d_{\text{в}}^{\text{КАС}}$ — наружный и внутренний диаметры корпуса КАС в рассматриваемом сечении соответственно; $b_{\text{шп}}$, $\Delta_{\text{шп}}$ — ширина и глубина паза для шпонки соответственно.

Очевидно, что наибольшие напряжения возникают в сечениях, расположенных ближе к дну снаряда. Если при выстреле происходит прорыв пороховых газов через ведущий пояс КАС, то напряженное состояние в стенке корпуса определяется действием как инерционных перегрузок, так и давления между центрующими утолщениями. Этот же случай имеет место при наличии у КАС готовых выступов (нарезов) на корпусе, которые предназначены для придания снаряду вращения при движении по каналу ствола. В корпусе возникают *осевые* σ_z , *радиальные* σ_r и *тангенциальные* $\sigma_{\text{т}}$ напряжения:

$$\sigma_z = \frac{q_{\text{н}} g \zeta_{\text{пер}}^{\text{max}}}{0,25\pi \left[(d_{\text{н}}^{\text{КАС}})^2 - (d_{\text{в}}^{\text{КАС}})^2 \right] - b_{\text{шп}} \Delta_{\text{шп}} N_{\text{шп}}} - \frac{p_{\text{бок}} \left[d^2 - (d_{\text{н}}^{\text{КАС}})^2 \right]}{(d_{\text{н}}^{\text{КАС}})^2 - (d_{\text{в}}^{\text{КАС}})^2 - b_{\text{шп}} \Delta_{\text{шп}} N_{\text{шп}}};$$

$$\sigma_r = \frac{2p_{\text{бок}}d_{\text{н}}^{\text{КАС}}}{d_{\text{н}}^{\text{КАС}} - d_{\text{б}}^{\text{КАС}}};$$


$$\sigma_{\tau} = \frac{p_{\text{бок}}d_{\text{н}}^{\text{КАС}}}{d_{\text{н}}^{\text{КАС}} - d_{\text{б}}^{\text{КАС}}},$$

где $p_{\text{бок}}$ — давление пороховых газов на боковую поверхность корпуса КАС (для оценочных расчетов можно принять $p_{\text{бок}} = 0,75p_{\text{max}}$).

Интенсивность напряжений имеет известную форму

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{\tau} - \sigma_z)^2 - (\sigma_z - \sigma_r)^2 - (\sigma_{\tau} - \sigma_r)^2} \leq [\sigma_{\tau}].$$

Напряжение изгиба на дне от действия максимального давления пороховых газов



$$\sigma_{\text{из}} = 0,75 \frac{p_{\text{max}} r_{\text{д}}^2}{h_{\text{д}}^2} \leq [\sigma_{\tau}],$$

где $r_{\text{д}}$, $h_{\text{д}}$ — радиус и толщина донной части снаряда соответственно.

Изгибные напряжения в донной части корпуса от наседающей массы блока БЭ и давления пороховых газов в момент выстрела


$$\sigma_{\text{max}} = 0,417 \left(p_{\text{max}} - \frac{q_{\text{н}} g \zeta_{\text{пер}}^{\text{max}}}{0,25\pi(d_{\text{б}}^{\text{КАС}})^2} \right) \frac{r_{\text{д}}^2}{h_{\text{д}}^2} \leq [\sigma_{\tau}].$$

Прочность обтекателя в месте соединения с корпусом. Контактные напряжения смятия в торце обтекателя в месте соединения корпуса с обтекателем вычисляют по формуле

$$\sigma_{\text{см}} = \frac{q_{\text{н}} g \zeta_{\text{пер}}^{\text{max}}}{0,25\pi \left[(d_{\text{к}}^{\text{обт}})^2 - (d_{\text{ц}}^{\text{обт}})^2 \right]} \leq [\sigma_{\text{см}}] = 1,3\sigma_{\tau},$$

где $d_{\text{к}}^{\text{обт}}$ — диаметр обтекателя в месте контакта; $d_{\text{ц}}^{\text{обт}}$ — внутренний диаметр обтекателя на цилиндрическом участке.

Прочность БЭ на изгиб при действии центробежных сил. Максимальные центробежные силы, действующие на периферийные БЭ (см. рис. 6.4),



$$F_{\text{цб}} = q_{\text{БЭ}} r_{\text{цт}} \Omega_0^2,$$

где $r_{\text{цт}}$ — радиус центра масс периферийных элементов.

При этом распределенная нагрузка

$$\bar{F}_{\text{цб}} = \frac{F_{\text{цб}}}{2\pi r_{\text{БЭ}}^{\text{сп}}},$$

а условие прочности при изгибе —

$$q_{БЭ} (r_{ср}^{БЭ})^2 \left(\frac{\pi}{2} + 1 \right) \leq 2 M_{и} I_{к}^{БЭ},$$

где $M_{и}$ — предельный изгибающий момент.

При расчете $M_{и}$ в данном случае продольные напряжения вычисляются по зависимости

$$\sigma_{z\text{ ср}}^* = \frac{1}{3} \sigma_{z\text{ ср}}.$$

Действие аэродинамического лобового сопротивления на траектории. Примем, что аэродинамическая сила лобового сопротивления

$$F_X = \bar{F}_X C_x S_{мид},$$

где \bar{F}_X — скоростной напор, C_x — коэффициент лобового сопротивления; $S_{мид}$ — площадь миделевого сечения КАС.

Тогда осевая перегрузка на пассивном участке траектории

$$\zeta_{пер\ x} = \frac{F_X}{q_n g}.$$

Прочность поршня. Сила среза по диаметру $d_{п}$ поршня обтекателя от наседающей массы блока БЭ задана соотношением

$$F_{ср} = (0,6 \dots 0,7) \sigma_{\tau} \pi d_{п} h_{п} > F_X,$$

где $h_{п}$ — толщина поршня на месте среза по диаметру $d_{п}$ (в расчетах $d_{п}$ можно принять равным внутреннему диаметру обтекателя на цилиндрическом участке и внутреннему диаметру корпуса).

Тогда давление среза можно определить зависимостью

$$p_{ср} = \frac{F_{ср}}{0,25 \pi d_{п}^2} > [p_{ср}],$$

напряжения среза — соотношением

$$\tau_{ср} = \frac{p_{ср} d_{п}}{2 h_{п}} \leq [\sigma_{\tau}],$$

а изгибные напряжения в поршне от действия наседающей массы блока БЭ — формулой

$$\sigma_{\max} = 0,75 \frac{p_{ср} d_{п}^2}{4 h_{п}^2}.$$

Прочность обтекателя при действии наседающей массы блока БЭ. Напряжения смятия упора обтекателя от действия наседающей массы блока БЭ на пассивном участке траектории можно определить по формуле

$$\sigma_{\text{см}} = \frac{q_n g \zeta_{\text{пер}}^{\text{max}}}{0,25\pi [d_{\text{п}}^2 - (d_{\text{в}}^{\text{обт}})^2]} \leq [\sigma_{\text{см}}] = 1,3\sigma_{\text{т}},$$

где $d_{\text{в}}^{\text{обт}}$ — внутренний диаметр обтекателя на месте упора.

Очевидно, что наибольшие напряжения на упоре от наседающей массы блока БЭ возникнут после вылета снаряда за срез ствола.

Действие давления пороховых газов ВЗ в момент распаковки КАС. Осевая перегрузка на участке работы ВЗ

$$\zeta_{\text{пер}} = \zeta_{\text{пер}}^{\text{ВЗ}} + \zeta_{\text{пер} \times}.$$

Здесь $\zeta_{\text{пер} \times} \ll \zeta_{\text{пер}}^{\text{ВЗ}}$, а $\zeta_{\text{пер}}^{\text{ВЗ}} = p_{\text{ВЗ}} \pi d^2 / (4q_n g)$, где $p_{\text{ВЗ}}$ — давление продуктов срабатывания ВЗ.

Срез резьбы дна корпуса КАС. Потребное давление ВЗ для среза резьбы дна должно соответствовать неравенству

$$p_{\text{ВЗ}} > \frac{F_{\text{ср}}}{0,25\pi d_{\text{в}}^2},$$

причем усиление среза резьбы дна

$$F_{\text{ср}} = (0,6...0,7)\sigma_{\text{т}} d_{\text{в}} L_{\text{р}} \zeta_{\text{полн}} \zeta_{\text{нер}},$$

где $d_{\text{в}}$ — внутренний диаметр резьбы дна; $L_{\text{р}}$ — длина рабочей части резьбы; $\zeta_{\text{полн}}$ — коэффициент полноты резьбы; $\zeta_{\text{нер}}$ — коэффициент, учитывающий неравномерность распределения нагрузки на виток резьбы.

Условие среза витков резьбы определяется неравенством

$$\frac{p_{\text{ВЗ}} d_{\text{в}}}{4L_{\text{р}} \zeta_{\text{полн}} \zeta_{\text{нер}}} > [\tau] = (0,6...0,7)\sigma_{\text{т}}.$$

Прочность на отрыв в сечении по резьбе, соединяющей корпус с обтекателем. Прочность на отрыв в сечении по резьбе, соединяющей корпус с обтекателем, задается зависимостью

$$\sigma_z = \frac{p_{\text{ВЗ}} (d_{\text{в}}^{\text{КАС}})^2}{(d_{\text{н}}^{\text{КАС}})^2 - (d_{\text{р ср}}^{\text{КАС}})^2} < [\sigma_{\text{т}}],$$

где $d_{\text{р ср}}^{\text{КАС}}$ — средний диаметр резьбы корпуса КАС.

Прочность перфорированной трубки ВЗ. Напряжения в области перфорации при срабатывании ВЗ можно записать в виде зависимостей

$$\sigma_r = p_{\text{ВЗ}}; \quad \sigma_{\text{т}} = \zeta_{\text{конц}} p_{\text{ВЗ}} \frac{(d_{\text{н}}^{\text{ВЗ}})^2 + (d_{\text{в}}^{\text{ВЗ}})^2}{(d_{\text{н}}^{\text{ВЗ}})^2 - (d_{\text{в}}^{\text{ВЗ}})^2}.$$

Здесь $\zeta_{\text{конц}} = \zeta_{\text{отв}}(1 - \bar{\varepsilon}) + \bar{\varepsilon}$ — эффективный коэффициент концентрации напряжения ($\zeta_{\text{отв}} = 3$ — коэффициент для шахматного расположения отверстий в трубке; $\bar{\varepsilon} = \varepsilon_p / \varepsilon_b$ — относительная пластичность материала трубки, где $\varepsilon_p = \varepsilon_b - \varepsilon_e$ — пластическая деформация (ε_b — деформация разрушения; ε_e — упругая деформация)); d_n^{B3}, d_b^{B3} — наружный и внутренний диаметры трубки ВЗ соответственно.

Условие прочности по критерию Мизеса в этом случае обращается в равенство (6.1).

Прочность поршня. Давление продуктов срабатывания ВЗ на поршень можно найти из равенства

$$p_{B3} = \frac{F_{\text{сп}}}{0,25\pi d_n^2},$$

а максимальные напряжения на поршне — из соотношения

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{p_{B3} d_n}{2h_n} \leq [\sigma_t].$$

Напряжения смятия при контакте с элементами при действии давления ВЗ можно определить следующим образом:

$$\sigma_{\text{см}} = \frac{p_{B3} d_n^2}{d_{\text{п.н}}^2 - d_{\text{п.в}}^2} \leq [\sigma_{\text{см}}] = 1,3\sigma_t,$$

Напряжения изгиба плоской стенки поршня по контуру БЭ заданы соотношением

$$\sigma_r = 0,75 \frac{p_{B3} r_n^2}{h_n^2} \leq [\sigma_t].$$

где $d_{\text{п.н}}, d_{\text{п.в}}$ — наружный и внутренний диаметры поршня соответственно.

Прочность стенки обтекателя. Напряжения в стенке обтекателя КАС от действия давления, возникающего вследствие горения пороха ВЗ, можно определить в виде


$$\sigma_t = \frac{p_{B3} d_n^{\text{обт}}}{2h_{\text{обт}}} \leq [\sigma_t],$$

а напряжения в цилиндрической стенке обтекателя при движении блока БЭ в момент распаковки КАС — в виде

$$\sigma_t = \frac{p_{B3} d_n^{\text{обт}}}{2h_{\text{обт}}}; \quad \sigma_z = \frac{q_n g \zeta_{\text{пер } x}}{0,25\pi [(d_n^{\text{КАС}})^2 - (d_n^{\text{обт}})^2]},$$

где $d_n^{\text{обт}}$ — наружный диаметр обтекателя; $h_{\text{обт}}$ — толщина стенки обтекателя.

Если принять, что $\zeta_{\text{пер}x} \ll \zeta_{\text{пер}}^{\text{ВЗ}}$, осевые напряжения можно определить следующим образом:


$$\sigma_z = \frac{p_{\text{ВЗ}} (d_{\text{н}}^{\text{обт}})^2}{(d_{\text{н}}^{\text{КАС}})^2 - (d_{\text{н}}^{\text{обт}})^2}.$$

Тогда условие прочности по Мизесу можно записать в виде неравенства (6.1).

Напряжение среза витков резьбы обтекателя от давления ВЗ подчиняется зависимости

$$\frac{p_{\text{ВЗ}} d_{\text{р}}^{\text{обт}}}{4 L_{\text{р}} \zeta_{\text{полн}} \zeta_{\text{нер}}} \leq (0,6 \dots 0,7) \sigma_{\text{т}},$$

где $d_{\text{р}}^{\text{обт}}$ — внутренний диаметр резьбы обтекателя.

Контрольные вопросы

1. Каковы преимущества касетного снаряда перед осколочно-фугасным?
2. Чем объясняется применение схемы с ВЗ в касетном снаряде?
3. Можно ли повысить эффективность касетного снаряда за счет замены ВВ в боевых элементах?
4. Целесообразно ли создание касетного снаряда калибра 76, 100 и 125 мм?
5. Как повысить эффективность осколочного действия касетных элементов за счет установки взрывателя?
6. Как провести расчет на прочность при выстреле:
 - а) боевых элементов КАС;
 - б) поршня, обтекателя, перфорированной трубки ВЗ?
7. Как рассчитать толщину дна корпуса КАС на срез резьбы?
8. Как определить прочность на изгиб боевого элемента при действии центробежных сил?
9. Как провести расчет на прочность торца корпуса БЭ нижнего ряда?



Глава 7. АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АРТИЛЛЕРИЙСКИХ СНАРЯДОВ

7.1. Движение артиллерийских снарядов в атмосфере

Выполнение требований по дальности стрельбы, устойчивости на траектории является важной частью проектирования артиллерийских снарядов и мин ствольной и реактивной артиллерии, реактивных гранат, авиационных бомб, кассетных боевых элементов.

На этапе *эскизного проектирования* для артиллерийских снарядов, ствольных мин, авиационных бомб рассчитывают *обводы корпуса*, обеспечивающие минимальное лобовое сопротивление потоку воздуха на траектории полета. Для этого необходимо рассчитать:

- среднюю скорость на участке траектории с наибольшим сопротивлением воздуха;
- размеры головной и хвостовой (запоясковой) частей корпуса снаряда, обеспечивающие минимальное лобовое сопротивление.

У оперенных артиллерийских снарядов ствольной и реактивной артиллерии, ствольных мин и авиационных бомб определяют также *размеры оперения*, обеспечивающие устойчивость на траектории полета. Для этого необходимо рассчитать:

- среднюю скорость на участке траектории с наибольшим сопротивлением воздуха;
- размеры оперения, обеспечивающие устойчивость на траектории.

Для решения этой задачи применяется такая наука, как *внешняя баллистика*, изучающая движение снарядов в атмосфере.

Движение снаряда рассматривают в системе прямоугольных координат. За начало этой системы принимают точку выстрела, т. е. положение центра масс снаряда в момент прохождения его через дульный срез ствола. Направление оси Ox совпадает с направлением стрельбы, ось Oy направлена вертикально вверх, а Oz — вправо, если смотреть по направлению оси Ox . *Траекторией снаряда* называется кривая, описываемая снарядом во время его полета.

Вертикальная плоскость Oxy , проходящая через вектор начальной скорости \vec{v}_0 (рис. 7.1, а), называется *плоскостью бросания*, а горизонтальная плоскость Oxz (рис. 7.1, б) — *горизонтом орудия*.

В проекции траектории на плоскость Oxz (см. рис. 7.1, б) будет след траектории, который характеризует *боковое отклонение Z снаряда* в каждый момент времени. Боковое отклонение Z отсчитывается по нормали от плоскости бросания.

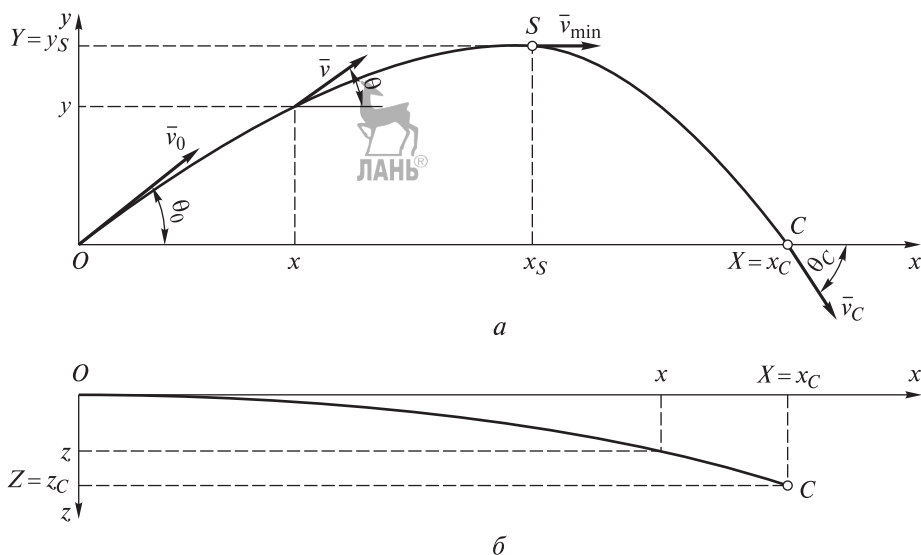


Рис. 7.1. Траектория снаряда в воздухе:

a — вертикальная проекция; *б* — горизонтальная проекция

Элементы траектории имеют следующие обозначения: x, y, z — текущие координаты центра масс снаряда; S — вершина траектории; C — точка падения снаряда; θ — угол наклона касательной к траектории (вектора скорости) к горизонту; t — время полета; v — скорость снаряда. Элементы траектории в точке вылета снабжены индексом «0», в вершине — « S », в точке падения — « C ».

Наиболее важным элементам траектории даны особые обозначения и названия:

$X = x_C$ — полная горизонтальная дальность;

$Y = y_S$ — высота траектории;

$Z = z_C$ — боковое отклонение снаряда в точке падения;

$T = t_S$ — полное время полета;

θ_0 — угол бросания;

θ_C — угол падения;

v_S — окончательная скорость.

Часть траектории от точки вылета до вершины (дуга OS) называется *восходящей ветвью* траектории, а от точки S до точки падения (дуга SC) — *нисходящей ветвью*. Поступательное движение снаряда считается заданным, если в каждый момент времени известны координаты центра масс $x(t), y(t), z(t)$.

Предположим, что снаряд совершает только продольное движение в одном плоскопараллельном поле притяжения, в неподвижной атмосфере и с пренебрежимо малыми углами атаки. В этом случае траектория снаряда — плоская кривая. Система уравнений, описывающая такое движение центра масс боеприпаса, имеет вид

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} = -\frac{\rho_v v^2}{2q} S_{\text{мид}} \zeta_{\text{ф.с}} C_x - g \sin \theta, \\ \frac{d\theta}{dt} = -\frac{g}{v} \cos \theta, \\ \frac{dy}{dt} = v \sin \theta, \\ \frac{dx}{dt} = v \cos \theta, \end{cases} \quad (7.1)$$

где ρ_v — плотность воздуха; $S_{\text{мид}}$ — площадь миделевого сечения; $\zeta_{\text{ф.с}}$ — коэффициент формы снаряда (0,9...1,1 для ОФС, 0,35...0,45 для бронебойных подкалиберных снарядов); C_x — коэффициент лобового сопротивления; g — ускорение силы тяжести; θ — угол наклона касательной к траектории относительно горизонта.

Кроме того, при расчетах учитывается изменение коэффициента C_x лобового сопротивления в зависимости от скорости снаряда. Это может быть закон Сиацчи или закон 1943 года. Данные законы могут быть аппроксимированы следующими зависимостями.

Закон Сиацчи:

$$C_x = \frac{0,2002v - 48,05 + \sqrt{(0,1648v - 47,95)^2 + 9,6}}{0,000474v^2} + \frac{0,0442v(v - 300)}{0,000474v^2 [371 + (v/200)^{10}]}. \quad (7.2)$$

Закон 1943 года:

$$C_x = \begin{cases} 0,157, & M < 0,73, \\ 0,033M + 0,133, & 0,73 \leq M < 0,82, \\ 0,161 + 3,9(M - 0,823)^2, & 0,82 \leq M < 0,91, \\ 1,5M - 1,176, & 0,91 \leq M < 1,00, \\ 0,384 - 1,6(M - 1,176)^2, & 1,00 \leq M < 1,18, \\ 0,384 \sin \frac{1,85}{M}, & 1,18 \leq M < 1,62, \\ \frac{0,29}{M} + 0,172, & 1,62 \leq M < 3,06, \\ 0,316 - 0,016M, & 3,06 \leq M < 3,53, \\ 0,259, & M \geq 3,53, \end{cases} \quad (7.3)$$

где M — число Маха.

Во время проектирования необходимо для заданной начальной скорости определить геометрические параметры внешних очертаний корпуса снаряда, позволяющие получить минимальное аэродинамическое сопротивление. В основе приближенных методов аэродинамического расчета лежат выводы так называемой линеаризованной теории обтекания и предположение о независимости действия сил сопротивления воздуха (аэродинамических сил) для отдельных частей снаряда.

При расчете коэффициента C_x лобового сопротивления необходимо иметь в виду, что полный коэффициент равен сумме составляющих, каждая из которых учитывает влияние на общее сопротивление одного из факторов, вызывающих это сопротивление. Основная особенность полета с углом α атаки — нарушение симметрии обтекания снаряда набегающим потоком воздуха. Вследствие асимметрии обтекания воздух из зон повышенного давления перетекает в зону с более низким давлением. Кроме того, при полете под углом α атаки истинное значение площади $S_{\text{мид}}$ миделевого сечения отличается от значения $S_{\text{мид}}$, по которому ведется расчет, так что поток тормозится на большей площади, вследствие чего появляется дополнительная сила.

Коэффициент лобового сопротивления снаряда

$$C_x = C_{x0} + C_{xi}, \quad (7.4)$$

где C_{x0} — коэффициент сопротивления корпуса снаряда при угле атаки $\alpha = 0$; C_{xi} — коэффициент *индуктивного* сопротивления, зависящий от угла α .

По физической природе лобовое сопротивление можно разделить на сопротивление трения и сопротивление давления. *Сопротивление трения* представляет собой совокупность сил трения, приложенных ко всей поверхности корпуса. *Сопротивление давления* — это результирующая сил избыточного давления, действующих главным образом на головную и хвостовую части корпуса, а также на донный срез. В соответствии с этим можно выразить коэффициент лобового сопротивления корпуса снаряда при $\alpha = 0$ в следующем виде:

$$C_{x0} = C_{x\text{тр}} + C_{x\text{гч}} + C_{x\text{хч}} + C_{x\text{д.с}}, \quad (7.5)$$

где $C_{x\text{тр}}$ — коэффициент сопротивления трения корпуса; $C_{x\text{гч}}$ — коэффициент сопротивления головной части; $C_{x\text{хч}}$ — коэффициент сопротивления хвостовой части; $C_{x\text{д.с}}$ — коэффициент донного сопротивления.

7.2. Силы сопротивления

Сопротивление трения. Коэффициент сопротивления трения корпуса определяется по следующим формулам:

- при $Re = 2 \cdot 10^6 \dots 2 \cdot 10^{10}$

$$C_{x\text{тр}} = 0,0315 Re^{-0,145} (1 + 0,12 M^2)^{-0,5} \frac{S_{\text{тр}}}{S_{\text{мид}}}; \quad (7.6)$$

- при $Re < 10^6$

$$C_{x\text{тр}} = 1,32 Re^{-0,5} (1 + 0,03 M^2)^{-1/3} \frac{S_{\text{тр}}}{S_{\text{мид}}}, \quad (7.7)$$

где $S_{\text{тр}}$ — площадь трения боковой поверхности корпуса снаряда.

Число Рейнольдса

$$Re = \frac{\rho_v v L_{\text{сн}}}{\zeta_{\text{вяз}}}, \quad (7.8)$$

где $L_{\text{сн}}$ — длина корпуса снаряда; $\zeta_{\text{вяз}} = 1,79 \cdot 10^{-5} \text{ Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$ — динамическая вязкость воздуха.

Площадь $S_{\text{тр}}$ трения боковой поверхности корпуса (без площади дна) при приближенном определении можно рассматривать как сумму площадей поверхностей его цилиндрической части, головной и хвостовой (запоясковой) частей, представляемых в виде конусов, а именно:

$$S_{\text{тр}} = \pi d(l_{\text{ц.ч}} + 0,5l_{\text{г.ч}} + 0,5l_{\text{х.ч}}), \quad (7.9)$$

где $l_{\text{ц.ч}}$, $l_{\text{г.ч}}$, $l_{\text{х.ч}}$ — длина соответственно цилиндрической, головной и хвостовой части корпуса.

Волновое сопротивление головной части снаряда. Волновое сопротивление при обтекании тела вращения сверхзвуковым потоком соответствует появлению головной ударной волны, позади которой на поверхности тела образуется зона повышенного давления.

Равнодействующая сил избыточного давления называется *волновым сопротивлением головной части*.

Полуэмпирическая формула для расчета коэффициента волнового сопротивления оживальных головных частей с половиной угла заострения вершины $\beta_{01}^\circ = 10...45^\circ$ при числах Маха $1,5 \leq M \leq 3,5$ имеет вид

$$C_{\text{хож}} = 0,002(0,8 + M^{-2}) \left(\beta_{01}^\circ \right)^{1,7} \left[1 - \left(\frac{196 \lambda_{\text{мид}}^2 - 16}{14(M + 18) \lambda_{\text{мид}}^2} \right) \right]. \quad (7.10)$$

В выражении (7.10) удлинение тела вращения

$$\lambda_{\text{мид}} = \sqrt{\bar{R} - 0,25},$$

где $\bar{R} = \frac{R}{2r_{\text{мид}}}$ (R — радиус оживальной образующей; $r_{\text{мид}}$ — радиус миделевого сечения).

Тангенс угла заострения вершины головной части

$$\text{tg} \beta_{01}^\circ = \frac{\lambda_{\text{мид}}}{\bar{R}} \left[1 - \left(\frac{\lambda_{\text{мид}}}{\bar{R}} \right)^2 \right]^{-0,5}. \quad (7.11)$$

Волновое сопротивление хвостовой части снаряда. Под *сопротивлением хвостовой части* понимается приложенная к ее поверхности равнодействующая сил избыточного давления. Это сопротивление всегда положительно, поскольку и при сверхзвуковых, и при дозвуковых скоростях полета на суживающейся под углом β_{02}° хвостовой части снаряда устанавливается пониженное давление.

Коэффициент волнового сопротивления хвостовой части определен зависимостью

$$C_{x\text{х.ч}} = 0,002(0,8 + M^{-2})(\beta_{02}^\circ)^{1,7} \sqrt{1 - \bar{S}_d}, \quad (7.12)$$

где $\bar{S}_d = S_d / S_{\text{мид}}$ (S_d — площадь донной части снаряда).

Донное сопротивление. Величина разрежения, устанавливающегося за донным срезом корпуса снаряда, зависит от многих факторов: формы хвостовой части, наличия или отсутствия хвостового оперения, длины и температуры поверхности корпуса, состояния пограничного слоя и др.

Обработка экспериментальных данных позволяет сделать следующие выводы. Если на значительной части поверхности корпуса имеется ламинарный пограничный слой, то коэффициент донного давления сильно зависит от числа Рейнольдса. Однако в реальных условиях протяженность ламинарного участка на корпусе снаряда очень мала, т. е. почти весь пограничный слой оказывается турбулентным. В этом случае влиянием числа Рейнольдса можно пренебречь, тогда коэффициент донного сопротивления

$$C_{x\text{д.с}} = 1,144 K_1 (2 - K_1) M^{-2} \bar{S}_d, \quad (7.13)$$

где $K_1 = M \bar{S}_d / \lambda_k$ (λ_k — удлинение корпуса снаряда).

Подъемная сила и центр давления аэродинамических сил. Характер обтекания и механизм возникновения составляющих аэродинамических сил зависят от того, является ли скорость дозвуковой ($M < 1$) или сверхзвуковой ($M > 1$). В связи с этим необходимо рассматривать каждую ситуацию отдельно.

К характеристикам элементов оперения (рис. 7.2) относятся: $b_{\text{кр}}$ — длина корневой хорды; $b_{\text{кц}}$ — длина концевой хорды; $b_{\text{ср}} = S_{\text{оп}} / l_{\text{оп}}$ — длина средней хорды стабилизатора (где $S_{\text{оп}}$ — площадь оперения; $l_{\text{оп}}$ — ширина оперения).

При дозвуковых скоростях полета коэффициент подъемной силы оперения снаряда

$$k_{\text{п.с}} = \frac{1,84 \pi \lambda_{\text{оп}} \alpha}{2,4 + \lambda_{\text{оп}}} \frac{S_{\text{кр}}}{S_{\text{мид}}}, \quad (7.14)$$

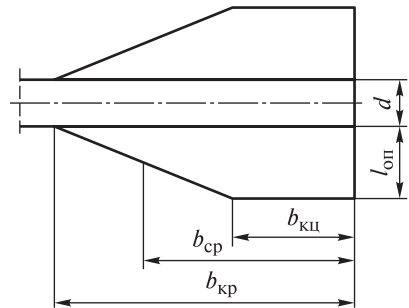

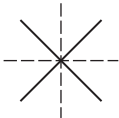
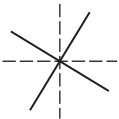
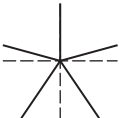
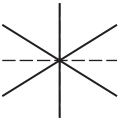


Рис. 7.2. Элементы оперения снаряда

где $\lambda_{\text{оп}} = l_{\text{оп}}/b_{\text{ср}}$ — удлинение оперения; $S_{\text{кр}} = \zeta_{\text{кр}} S_{\text{оп}}$ — обтекаемая площадь стабилизатора (площадь крыла). При этом коэффициент $\zeta_{\text{кр}}$ крыла зависит от числа перьев стабилизатора и от их ориентации по набегающему потоку (табл. 7.1).

Таблица 7.1

Варианты конструктивного оформления оперения стабилизатора

Вид оперения, ориентация по потоку	Число перьев стабилизатора	$\zeta_{\text{кр}}$
	4	2,0
	4	2,828
	4	2,732
	5	3,078
	6	3,464

Формула (7.14) получена для скоростей, при которых сжимаемостью воздуха можно пренебречь. Однако с достаточной степенью точности эта зависимость может быть распространена на весь диапазон околозвуковых скоростей полета. Для этого в формулу (7.14) вводят дополнительный множитель $(1 - M^2)^{-1/2}$, учитывающий эффект сжимаемости:

$$k_{\text{п.с}} = \frac{1,84\pi\lambda_{\text{оп}}\alpha}{2,4 + \lambda_{\text{оп}}} \frac{1}{\sqrt{1 - M^2}} \frac{S_{\text{кр}}}{S_{\text{мид}}}. \quad (7.15)$$

При этом коэффициент подъемной силы корпуса

$$k_{\text{п.к}} \cong \alpha. \quad (7.16)$$

Расчет коэффициента подъемной силы оперения артиллерийского снаряда при сверхзвуковых скоростях полета проводят в первом приближении по формуле для подъемной силы крыла малого удлинения:

- для стабилизаторов с $\lambda_{\text{оп}} \geq \frac{1}{\sqrt{M^2 - 1}}$

$$k_{\text{п.с}} = \frac{4\alpha}{\sqrt{M^2 - 1}} \left(1 - \frac{1}{2\lambda_{\text{оп}} \sqrt{M^2 - 1}} \right) \frac{S_{\text{кр}}}{S_{\text{мид}}}; \quad (7.17)$$

- для стабилизаторов с $\lambda_{\text{оп}} \leq \frac{1}{\sqrt{M^2 - 1}}$

$$k_{\text{п.с}} = 1,35\alpha \left(\lambda_{\text{оп}} + \frac{1}{\sqrt{M^2 - 1}} \right) \frac{S_{\text{кр}}}{S_{\text{мид}}}. \quad (7.18)$$

Коэффициент подъемной силы корпуса снаряда при сверхзвуковых скоростях

$$k_{\text{п.к}} = 2,4\alpha, \quad (7.19)$$

а суммарное значение коэффициента подъемной силы всего снаряда

$$K_{\text{п.с}} = k_{\text{п.к}} + k_{\text{п.с}}. \quad (7.20)$$

Для внешнебаллистических расчетов важно знать не только значения действующих сил сопротивления воздуха, но и положение точки приложения равнодействующей этих сил, называемой *центром давления* снаряда, поскольку взаимное расположение центра давления (ЦД) и центра масс (ЦМ) снаряда (рис. 7.3) определяет степень его устойчивости.

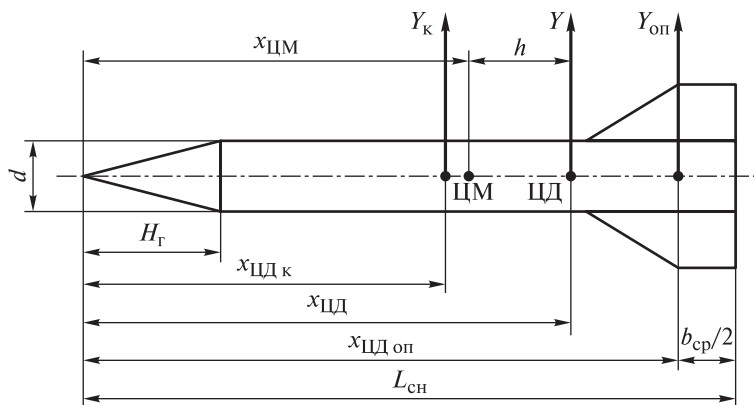


Рис. 7.3. Расчетная схема снаряда для определения положения центра давления

Принято считать, что центр давления находится на оси снаряда на расстоянии $x_{\text{цд}}$ от его носика, поэтому расчет положения центра давления сводится к определению координаты $x_{\text{цд}}$ (в безразмерном виде находят величину $\bar{x}_{\text{цд}} = x_{\text{цд}}/L_{\text{сн}}$).

Для расчета координаты центра давления всего снаряда используют теорему Вариньона, согласно которой момент равнодействующей сил относительно любой оси равен алгебраической сумме моментов всех сил относительно той же оси. Рассмотрим составляющие $Y_{\text{к}}$ и $Y_{\text{оп}}$ подъемной силы снаряда, приложенные в центрах давления корпуса и оперения (см. рис. 7.3). При этом будем полагать, что при малых углах атаки ($\alpha \leq 0,05$) векторы этих сил перпендикулярны оси снаряда. Представляя эти зависимости через аэродинамические коэффициенты, получаем

$$K_{\text{п.с}} x_{\text{цд}} = k_{\text{п.к}} x_{\text{цд к}} + k_{\text{п.с}} x_{\text{цд оп}}. \quad (7.21)$$

Коэффициент центра давления корпуса снаряда, состоящего из конической и цилиндрической частей, на сверхзвуковых скоростях можно найти как

$$C_{\text{цд к}} = \frac{x_{\text{цд к}}}{L_{\text{сн}}} = \frac{0,733 + 0,667\delta\lambda_{\text{г.ч}}(\bar{L}^2 - 1)}{\bar{L}[1,57 + 1,334\delta\lambda_{\text{г.ч}}(\bar{L} - 1)]}, \quad (7.22)$$

где $\lambda_{\text{г.ч}} = H_{\text{г}}/d$ — удлинение головной части снаряда; $\bar{L} = L_{\text{сн}}/H_{\text{г}}$ — безразмерная длина корпуса.

При этом центр давления оперения лежит посередине средней хорды стабилизатора (см. рис. 7.3).

7.3. Устойчивость полета снарядов, стабилизируемых оперением

У снаряда, стабилизируемого на траектории полета оперением (рис. 7.4), появляется стабилизирующий момент $J_{\text{с}}$.

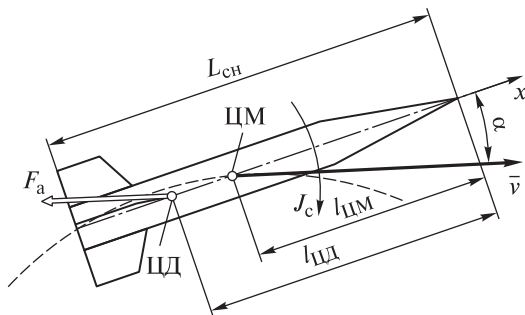


Рис. 7.4. Схема сил, действующих на снаряд, стабилизируемый оперением

Для оперенных снарядов связь между стабилизирующим моментом J_c , составляющими аэродинамической силы F_a и расстоянием $l_{cb} = l_{цд} - l_{цм}$ имеет следующий вид:

$$J_c = F_x l_{cb} \sin \alpha + F_y l_{cb} \cos \alpha, \quad (7.23)$$

где F_x — сила лобового сопротивления; F_y — подъемная сила.

Выразив стабилизирующий момент и силы в формуле (7.23) через их аэродинамические коэффициенты, получим

$$m_z = \frac{l_{cb}}{L_{сн}} (C_x \sin \alpha + C_y \cos \alpha), \quad (7.24)$$

где m_z — коэффициент стабилизирующего момента; C_x — коэффициент лобового сопротивления; C_y — коэффициент подъемной силы.

В случае статической устойчивости получим зависимости аэродинамических коэффициентов от угла α атаки, представленные на рис. 7.5.

Для малых углов $C_x \cong C_{x0}$; $C_y \cong C_y^\alpha \alpha$; $m_z = |m_z^\alpha| \alpha$; $\sin \alpha \approx \alpha$; $\cos \alpha \approx 1$, тогда (7.24) примет вид $|m_z^\alpha| = \frac{l_{cb}}{L_{сн}} (C_{x0} + C_y^\alpha)$, где $C_{x0} \cong 0,1 C_y^\alpha$.

Окончательно получаем

$$|m_z^\alpha| = \frac{l_{cb}}{L_{сн}} C_y^\alpha.$$

Введем понятие *запаса $\xi_{ст}$ статической устойчивости*:

$$\xi_{ст} = |m_z^\alpha| = \frac{l_{cb}}{L_{сн}} \cdot 100 \%. \quad (7.25)$$

Рекомендуемый диапазон значений $\xi_{ст}$ составляет 10...15 %. Начальное значение угла α для проектных расчетов принимается равным 5...7°.

Невращающийся снаряд устойчив на траектории только в том случае, если центр его масс находится впереди центра давления, т. е. для обеспечения устойчивости полета на траектории стабилизирующий момент J_c и момент M_z тангажа должны быть равны, но противоположно направлены:

$$J_c = -M_z.$$

На этапе *технического проекта* необходимо выбрать технологический процесс для изготовления оперения артиллерийских и реактивных снарядов, ствольных мин и реактивных гранат, удовлетворяющий требованиям по плоскостности поверхностей.

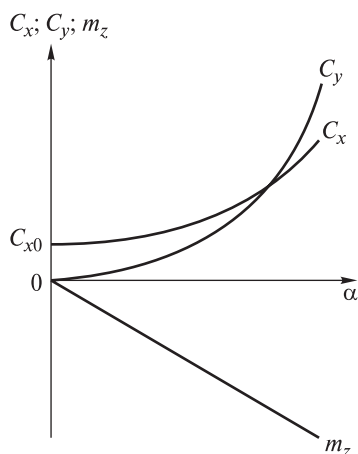


Рис. 7.5. Графическое представление аэродинамических коэффициентов в зависимости от угла атаки

7.4. Устойчивость полета снарядов, стабилизируемых вращением

Значение коэффициента $\zeta_{\text{гир}}$ гироскопической устойчивости снаряда, стабилизируемого вращением, можно вывести теоретически. Для этого рассмотрим колебательное движение стабилизируемого вращением снаряда, на который действуют аэродинамическая сила F_a и опрокидывающий момент $J_{\text{опр}}$ от этой силы (рис. 7.6).

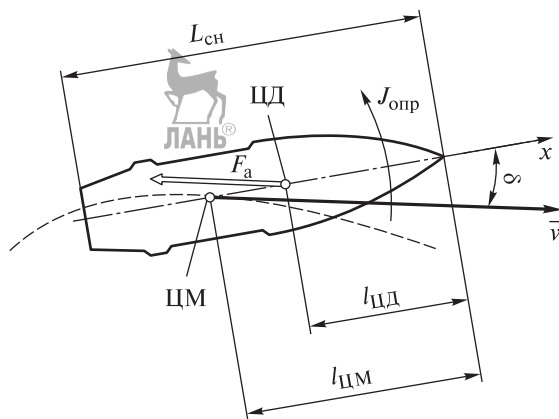


Рис. 7.6. Схема сил, действующих на стабилизируемый вращением снаряд

Приняв угол δ нутации малым, т. е. $\sin \delta \approx \delta$; $\cos \delta \approx 1$, запишем уравнения колебательного движения снаряда вокруг центра масс следующим образом:

$$\ddot{\delta} + \dot{v}_{\text{пр}}^2 \delta - \zeta_{\text{опр}} \delta = 0,$$

или

$$\ddot{\delta} + \dot{v}_{\text{пр}}^2 \zeta_{\text{гир}}^2 \delta = 0, \quad (7.26)$$

где $\dot{v}_{\text{пр}}$ — угловая скорость прецессии; $\zeta_{\text{опр}}$ — коэффициент (угловое ускорение) опрокидывающего момента.

Отсюда

$$\zeta_{\text{гир}} = \sqrt{1 - \frac{\zeta_{\text{опр}}}{\dot{v}_{\text{пр}}^2}}. \quad (7.27)$$

Приняв $\dot{v}_{\text{пр}}$ и $\zeta_{\text{опр}}$ для небольших интервалов времени постоянными, запишем решение уравнения (7.26) при $\zeta_{\text{гир}} > 0$ как

$$\delta = C_1 \exp(i \dot{v}_{\text{пр}} \zeta_{\text{гир}} t) + C_2 \exp(-i \dot{v}_{\text{пр}} \zeta_{\text{гир}} t).$$

Определив произвольные постоянные C_1 и C_2 , получим формулу для угла нутации:

$$\delta = \frac{\delta}{\dot{v}_{\text{пр}} \zeta_{\text{гир}}} \sin(\dot{v}_{\text{пр}} \zeta_{\text{гир}} t). \quad (7.28)$$

Таким образом, при $\zeta_{\text{гир}} > 0$ угол нутации выражается через тригонометрический синус, а движение продольной оси снаряда носит характер периодических колебаний с периодом $T = 2\pi/(\dot{v}_{\text{пр}} \zeta_{\text{гир}})$ и с ограниченной амплитудой колебаний $\delta_{\text{max}} = \delta/(\dot{v}_{\text{пр}} \zeta_{\text{гир}})$.

Запишем $\zeta_{\text{опр}}$ и $\dot{v}_{\text{пр}}$ как

$$\zeta_{\text{опр}} = \frac{d^2 l_{\text{св}}}{J_b} 10^3 \Pi(y) v^2 K_{J_{\text{опр}}} \left(\frac{v}{M} \right) \sqrt{\frac{L_{\text{сн}}}{4,5d}}; \quad (7.29)$$

$$\dot{v}_{\text{пр}} = \frac{1}{2} \frac{J_a}{J_b} \Omega_0 e^{-k(t)}, \quad (7.30)$$

где d — калибр снаряда; $l_{\text{св}} = l_{\text{цм}} - l_{\text{цд}}$ — расстояние между центром масс снаряда и центром давления воздуха ($l_{\text{цм}}$ — расстояние от центра масс до плоскости основания головной части снаряда; $l_{\text{цд}}$ — расстояние от центра давления воздуха до плоскости основания головной части снаряда); J_b, J_a — экваториальный и осевой моменты инерции снаряда соответственно; $\Pi(y)$ — функция плотности воздуха; $K_{J_{\text{опр}}} \left(\frac{v}{M} \right)$ — функция опрокидывающего момента (v — скорость снаряда; M — число Маха); $L_{\text{сн}}$ — длина снаряда; Ω_0 — угловая скорость вращения снаряда при вылете из канала ствола.

Расстояние $l_{\text{цд}}$ вычисляется по эмпирической формуле

$$l_{\text{цд}} = \phi l_{\text{г.ч}} - 0,16d,$$

где $\phi = 0,37$ для конической головной части и $\phi = 0,57$ для головной части в форме оживала.

Наибольшее угловое ускорение $\zeta_{\text{опр}}$ опрокидывающего момента силы сопротивления воздуха развивается на начальных участках траектории, т. е. когда $v = v_0$ и $\Pi(y) = 1$. При дальнейшем полете снаряда на восходящей ветви траектории эти параметры уменьшаются, следовательно, снаряд, обладающий гироскопической устойчивостью на начальных участках траектории, будет гироскопически устойчив на всей траектории.

Тогда, введя коэффициент $\zeta_{\text{ин}}$ инерции снаряда и относительную массу $q_{\text{отн}}$ снаряда, запишем условие гироскопической устойчивости на траектории полета:

$$\zeta_{\text{гир}} = \sqrt{1 - \frac{l_{\text{св}}}{d} \frac{\eta^2}{\zeta_{\text{ин}} q_{\text{отн}}} \frac{J_a}{J_b} \frac{4}{\pi^2} K_{J_{\text{опр}}} \left(\frac{v_0}{M} \right) \sqrt{\frac{L_{\text{сн}}}{4,5d}}}, \quad (7.31)$$

где η — длина хода нарезов.

При незначительном эксцентриситете центра масс и малых колебаниях ствола орудия снаряд будет обладать гироскопической устойчивостью при $\zeta_{\text{гир}} > 0,3$.

Соотношение (7.31) можно использовать для расчета коэффициента гироскопической устойчивости опытного образца, определив его массовые характеристики.

Контрольные вопросы

1. Как обосновать выбор расчетной скорости для решения задачи об определении параметров корпуса и оперения снаряда?
2. Как связаны между собой закон сопротивления Сиауччи и закон 1943 года?
3. Чем определяется значительное различие коэффициентов формы для бронебойного подкалиберного и осколочно-фугасного снарядов?
4. Как рассчитать составляющую коэффициента лобового сопротивления снаряда, обусловленную:
 - а) сопротивлением его головной части;
 - б) трением;
 - в) сопротивлением донной части снаряда?
5. Как определить подъемную силу и положение центра давления аэродинамических сил оперенного снаряда?
6. Как рассчитать запас статической устойчивости оперенного снаряда?
7. Какие силы действуют на снаряд, стабилизируемый вращением?
8. Каков физический смысл коэффициента гироскопической устойчивости?
9. На каком участке траектории угловое ускорение опрокидывающего момента принимает максимальное значение?





Боеприпасы: учебник: в 2 т. / под общ. ред. В.В. Селиванова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016.

Боеприпасы наземной артиллерии: учебник. Ч. 1 / под общ. ред. Н.А. Селезнева и П.И. Чекалина. М.: Военное изд-во Мин. обороны СССР, 1970. 248 с.

Водопьянов М.Я. Основы проектирования боеприпасов. СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2007. 387 с.

Генкин Ю.В., Павлов Я.О., Преображенская М.А. Конструкция артиллерийских выстрелов: учеб. пособие. СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2012. 114 с.

Дмитриевский А.А., Лысенко Л.Н., Богодистов С.С. Внешняя баллистика. 3-е изд. М.: Машиностроение, 1991. 640 с.

Захаренков В.Ф. Внутренняя баллистика и автоматизация проектирования артиллерийских орудий: учебник. СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2010. 276 с.

Проектирование ракетных и ствольных систем / Б.В. Орлов, Ю.И. Топчеев, В.Ф. Устинов и др.; под ред. Б.В. Орлова. М.: Машиностроение, 1974. 828 с.

Руссков В.Ф., Никулин Е.Н. Основы проектирования кассетных боеприпасов: учеб. пособие. СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2013. 218 с.

Смирнов Л.И. Основы проектирования мин и оперенных снарядов к гладкоствольным минометным и артиллерийским системам. Ч. 2. Л.: Лен. мех. ин-т, 1971. 210 с.

Теория, проектирование и конструкция снарядов и боевых частей / А.К. Пичугин [и др.]. Пенза: ПВАИУ, 1990. 386 с.

Оглавление

Предисловие	3
Список обозначений и сокращений	6
Введение	16
Глава 1. Баллистическое проектирование артиллерийского выстрела	22
1.1. Прямая и обратная задачи внутренней баллистики	22
1.2. Процесс выстрела артиллерийским снарядом	23
1.3. Порох и закономерности его горения	24
1.4. Система уравнений внутренней баллистики	27
1.5. Баллистическое проектирование выстрела ствольной артиллерии	32
1.6. Способ заряжания и выбор размеров каморы	33
1.7. Техническое проектирование метательного заряда к выстрелам различных типов заряжания	38
Контрольные вопросы	43
Глава 2. Силы, действующие на снаряд при выстреле	44
2.1. Давление пороховых газов	44
2.2. Силы инерции	45
2.3. Давление снаряжения	48
2.4. Силы сопротивления движению снаряда в канале ствола орудия	51
Контрольные вопросы	54
Глава 3. Ведущие устройства	55
3.1. Расчет на прочность ведущих поясков по истиранию и давлению грани нарезов	55
3.2. Прочность ведущего пояска под действием центробежных сил ...	57
3.3. Расчет на прочность зубцов гребенки подкалиберного снаряда	62
Контрольные вопросы	65
Глава 4. Осколочно-фугасные и кумулятивные снаряды	66
4.1. Назначение и классификация осколочно-фугасных снарядов	66
4.2. Назначение и принципы проектирования кумулятивных снарядов	69
4.3. Расчет на прочность корпуса осколочно-фугасных и кумулятивных снарядов при максимальном давлении пороховых газов	71
4.4. Расчет на прочность привинтной головки	78

4.5. Расчет на прочность диафрагмы	79
4.6. Расчет на прочность запального стакана	79
4.7. Расчет на прочность дна снаряда	82
Контрольные вопросы	91
Глава 5. Бронебойные снаряды	92
5.1. Назначение и классификация бронебойных снарядов	92
5.2. Расчет на прочность сердечника бронебойного снаряда	96
5.3. Расчет на прочность перьев стабилизатора и баллистического наконечника	97
Контрольные вопросы	98
Глава 6. Кассетные снаряды	100
6.1. Конструктивно-компоновочная схема кассетных артиллерийских снарядов и классификация их элементов	100
6.2. Выбор типа боевого элемента для снаряжения кассетного снаряда	102
6.3. Расчет на прочность элементов конструкции кассетного снаряда	104
Контрольные вопросы	113
Глава 7. Аэродинамические характеристики артиллерийских снарядов	114
7.1. Движение артиллерийских снарядов в атмосфере	114
7.2. Силы сопротивления	117
7.3. Устойчивость полета снарядов, стабилизируемых оперением	122
7.4. Устойчивость полета снарядов, стабилизируемых вращением	124
Контрольные вопросы	126
Литература	127





Учебное издание

Куприянов Вячеслав Михайлович
Левин Денис Петрович
Селиванов Виктор Валентинович

Основы проектирования боеприпасов

Редактор *И.В. Мартынова*
Художник *Я.М. Асинкритова*
Корректор *Л.В. Забродина*
Компьютерная графика *Т.Ю. Кутузовой*
Компьютерная верстка *Т.В. Батраковой*

Оригинал-макет подготовлен
в Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана.

В оформлении использованы шрифты
Студии Артемия Лебедева.

Подписано в печать 31.01.2019. Формат 70×100/16.
Усл. печ. л. 10,56. Тираж 300 экз. Изд. № 344-2017. Заказ

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
press@bmstu.ru
www.baumanpress.ru

Отпечатано в типографии МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
baumanprint@gmail.com