

Е. В. ЧУРБАНОВ

ВНУТРЕННЯЯ
БАЛЛИСТИКА
АРТИЛЛЕРИЙСКОГО
ОРУДИЯ

Ордена Трудового Красного Знамени
ВОЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МИНИСТЕРСТВА ОБОРОНЫ СССР
МОСКВА — 1973

355.723
Ч—93
УДК 623.52

Чурбанов Е. В.

Ч—93 Внутренняя баллистика артиллерийского орудия. М. Воениздат, 1973.

104 стр.

В брошюре излагаются основные понятия, задачи, выводы и проблемы внутренней баллистики. Главное внимание уделяется раскрытию физической сущности процессов, протекающих в канале ствола орудия при выстреле, и практическому приложению результатов изучения этих процессов к проектированию и эксплуатации артиллерийских систем.

В брошюре даются ответы на многие вопросы, возникающие как при изучении материальной части артиллерии, так и при подготовке и проведении артиллерийских стрельб.

Брошюра рассчитана на солдат и сержантов, курсантов военных училищ, а также на широкий круг читателей, интересующихся артиллерийской техникой.

Ч $\frac{1124-036}{068(02)-73}$ 102-73

355.723

ОТ АВТОРА

Старшее поколение — ветераны — свой опыт передают вступающим в жизнь молодым людям — энергичным, ищущим. Эстафетой между ними пролегли завоевания Октября, подвиги Великой Отечественной войны и знания, бережно сохраненные и умноженные.

XXIV съезд КПСС выдвинул задачу исторической важности: «Органически соединить достижения научно-технической революции с преимуществами социалистической системы хозяйства...»*. Чтобы эту задачу выполнить, нужно овладевать знаниями.

Накопление знаний начинается с малого — знакомства с началами науки. Потом, сделав этот первый шаг и на своем опыте убедившись в полезности приобретенного, можно сделать следующий шаг и так постепенно овладеть основами науки и достичь ее вершин.

Источником знаний является книга. Данная книга содержит частицу из всего объема накопленных во внутренней баллистике за многие столетия фактов. Задача автора состояла в отборе необходимых фактов и описании их с надлежащей полнотой.

Цель книги — помочь читателю, впервые обратившемуся к внутренней баллистике артиллерийского орудия, получить общие представления о ее содержании и зна-

* Л. И. Брежнев. Отчетный доклад Центрального Комитета КПСС XXIV съезду Коммунистической партии Советского Союза. Издательство политической литературы, М., 1971, стр. 70.

чении. Наряду с этим читателю предлагаются конкретные сведения из внутренней баллистики, нужные при обучении и в практической работе.

Читатель найдет также описание наиболее важных и поучительных фактов из истории внутренней баллистики и имена отечественных и зарубежных ученых, внесших вклад в ее развитие.

Автор будет благодарен за все замечания и пожелания, высказанные в его адрес.

ПОВЫШАТЬ БАЛЛИСТИЧЕСКУЮ КУЛЬТУРУ (вместо предисловия)

Было время, когда артиллеристы о движении снаряда имели самые общие и часто наивные представления, например, такие: «При выстреле появляется большой жар и огонь, которые с громом выбрасывают ядро из орудия» или «В пространстве ядро сначала совершает насильственное движение по наклонной прямой и по дуге окружности, а затем — свободное движение по вертикали».

В ту пору практические знания артиллеристов состояли из нескольких эмпирических правил, которые сохранялись в строгой тайне и обычно передавались по наследству от отца к сыну. Стрельба же артиллерии была более опасной для себя, чем для неприятеля из-за частых разрывов орудий.

С тех пор минули столетия...

Теперь законы движения снаряда в канале ствола орудия и в пространстве достаточно хорошо изучены артиллерийскими науками — **внутренней и внешней баллистикой**. На месте свода эмпирических правил стрельбы выросла важнейшая артиллерийская наука — **теория стрельбы**.

Овладение основами этих фундаментальных наук формирует артиллерийское мышление, обеспечивает ясность и твердость действий, позволяет добиваться наилучших результатов.

Знание законов баллистики дает возможность установить, как будет двигаться данный снаряд в данных конкретных условиях, и, следовательно, понять, какие необходимо принять меры, чтобы этот снаряд попал в цель и произвел наибольшее действие.

Ярким примером использования баллистики в практических целях является баллистическая подготовка стрельбы, основное назначение которой состоит в учете особенностей полета снаряда при данных технических условиях (метеоусловия учитываются отдельно при метеорологической подготовке стрельбы) по сравнению с табличными условиями стрельбы.

Успехи в разработке содержания, методов и технических средств баллистической подготовки стрельбы и в организации баллистической службы в артиллерии в основном зависят от уровня развития баллистики и уровня баллистических знаний артиллеристов.

Трудно количественно оценить те многообразные положительные результаты, которые даст дальнейшее развитие баллистики, овладение баллистическими знаниями, внедрение достижений баллистики в артиллерийскую практику. Ясно одно, что все это благотворно скажется на боевых, эксплуатационных, производственных и экономических показателях артиллерии.

В наше время баллистика вышла за рамки артиллерии и теперь читатель со страниц газет и журналов получает знания по космической баллистике. Тем очевиднее становится требование глубокого изучения баллистики, повышения баллистической культуры артиллеристов и всех, кто создает и эксплуатирует артиллерийскую технику.

Артиллерийское орудие — тепловая машина

Многообразие качеств орудия

На вопрос, что такое артиллерийское орудие, большинство отвечает: это то, из чего стреляют, или то, что служит для стрельбы. Это распространенное популярное определение связывает орудие со стрельбой.

Стрельба — понятие широкое. В него вмещается почти вся боевая деятельность артиллерии, которая в конечном счете направлена на поражение целей на поле боя — живой силы противника, его боевой техники и оборонительных сооружений. Поэтому популярное определение является общим, приблизительным.

Стрельба связана не только с орудием. Для поражения цели существуют **артиллерийские снаряды**, снаряженные бризантными взрывчатыми веществами. При встрече с целью снаряд действует, проникая в цель и создавая поражающие факторы — ударную волну, осколки оболочки, продукты взрыва.

Чтобы снаряд попал в цель, удаленную от орудия, он должен пролететь в пространстве определенное расстояние, преодолевая сопротивление воздуха и поле земного тяготения. Для этого в орудии снаряд получает начальный импульс движения за счет химической энергии, заключенной в боевом заряде. **Боевой заряд** состоит в основном из пороха, являющегося метательным взрывчатым веществом.

Если заглянуть в учебники по артиллерии, то можно найти научное определение **артиллерийского орудия**, как предмета вооружения, предназначенного для сообщения снаряду начальной скорости и начального направления поступательного движения. В этом определении подчер-

квиваются два основных свойства артиллерии: способность достигать удаленные цели (**дальнобойность**) и способность попадать в цель (**прицельность огня**). Однако этим не исчерпываются свойства орудия.

Современное артиллерийское орудие удивляет, с одной стороны, простотой и законченностью устройства, а с другой — многообразием качеств, каждому из которых соответствует самостоятельная и подчас весьма сложная задача, связанная со стрельбой артиллерии.

Поэтому кроме популярного и научного определений можно сформулировать еще сравнительные или образные определения орудия путем сравнения его с известными в технике предметами, схожими с ним по выполняемым функциям. И тогда перед нами артиллерийское орудие выступит то как внушительное сооружение, выдерживающее гигантские нагрузки в сотни и тысячи тонн*, то как причудливый агрегат механизмов, построенный на разнообразных физических принципах и конструктивных схемах, то как повозка, способная передвигаться за тягачом и самостоятельно по дорогам и по бездорожью, то как дальномер, обеспечивающий полет снаряда на заданное расстояние и позволяющий измерить расстояние до цели после ее накрытия.

Остановимся подробнее только на одном, пожалуй самом важном, свойстве артиллерийского орудия, имеющем прямое отношение к внутренней баллистике, свойстве орудия выполнять функции тепловой машины или теплового двигателя.

* Здесь и далее числовые значения величин выражаются в технической системе единиц, до сих пор широко применяемой в артиллерийской практике и во внутренней баллистике в частности. Под единицами тонна (*т*), килограмм (*кг*), грамм (*г*) в тексте всегда будут пониматься единицы силы (веса). Для перехода от значений величин, выраженных в технической системе, к значениям величин в международной системе СИ следует пользоваться переходными коэффициентами.

В дальнейшем будем иметь в виду, что значения величин нужно умножать: для перехода от килограмм-силы (*кгс*) к ньюто-ну (*Н*) — на коэффициент 9,81; для перехода от килограмм-метра (*кгм*) к джоулю (*Дж*) — на коэффициент 9,81; для перехода от калории (*кал*) к джоулю (*Дж*) — на коэффициент 4,19; для перехода от технической атмосферы (*кг/см²*) к единице (*Н/м²*) — на коэффициент 98100.

Орудие — древнейшая тепловая машина

Уместно отметить, что орудие является древнейшей тепловой машиной, поскольку огнестрельная артиллерия существует около шести веков, а первая паровая машина появилась только в 18 веке.

Тепловой двигатель представляет собой машину, в которой тепловая энергия, выделяемая при сжигании топлива, преобразуется в механическую энергию. Бывают тепловые двигатели внешнего и внутреннего сгорания. В первом случае топливо сжигают в специальных топках вне двигателя. Двигателями внешнего сгорания являются паровые машины. Во втором случае топливо сжигают внутри двигателя, как, например, в поршневом двигателе или в газовой турбине. Здесь топкой является рабочий цилиндр или камера сгорания. Орудие можно отнести к классу двигателей внутреннего сгорания.

Топливо представляет собой химическое вещество или смесь химических веществ, способных под воздействием первоначального теплового импульса гореть определенным образом. В результате горения топлива химическая энергия вещества переходит в тепловую энергию продуктов горения и окружающей среды. В состав топлива входят: **горючее** (например, бензин), **окислитель** (например, кислород воздуха) и **добавки**, улучшающие свойства топлива и характер его горения.

Преобразование тепловой энергии в механическую энергию в тепловом двигателе осуществляется с помощью рабочего тела, которое является носителем тепла. В паровых машинах в качестве рабочего тела используется получаемый в котлах водяной пар, а в двигателях внутреннего сгорания — газообразные продукты сгорания топлива. Исходное состояние рабочего тела характеризуется высокой температурой и сравнительно высоким давлением. В результате расширения рабочего тела в тепловом двигателе совершается переход тепловой энергии в механическую энергию рабочего звена и связанных с ним других звеньев. При этом совершается механическая работа того или иного назначения в соответствии с использованием теплового двигателя: перемещение транспортных машин, приведение в действие различных агрегатов, вращение электрических генераторов и т. д.

В качестве рабочих звеньев тепловых двигателей используются поршни при поступательном движении, роторы при вращательном движении, а в реактивном двигателе таким рабочим звеном является газовая струя, которая ускоряется в реактивном сопле.

Имеются ли перечисленные элементы тепловой машины в артиллерийском орудии и протекают ли в нем упомянутые процессы? Да. Однако все это выглядит иначе, чем, скажем, в паровой машине или двигателе внутреннего сгорания.

Рабочим звеном орудия — тепловой машины является снаряд, которому сообщается механическая энергия в виде **кинетической энергии поступательного движения** E_0 :

$$E_0 = \frac{qv_0^2}{2g},$$

где q — вес снаряда, $\kappa\Gamma$;

v_0 — начальная скорость снаряда, $м/сек$;

g — ускорение силы тяжести.

С изменением калибра орудия d вес снаряда изменяется приблизительно пропорционально кубу калибра, тогда как начальная скорость снаряда практически не зависит от калибра в пределах одного типа орудий, например гаубиц, при данном уровне развития науки и техники.

Если разделить величину кинетической энергии E_0 на d^3 , то получим независимую от калибра величину C_E :

$$C_E = \frac{E_0}{d^3} = \frac{qv_0^2}{2gd^3},$$

называемую **коэффициентом могущества орудия**. От величины C_E зависят основные боевые качества артиллерийского орудия и в конечном счете тип орудия (см. табл. 1).

С изменением коэффициента могущества C_E изменяются габариты и вес орудия, бронепробиваемость, дальность, маневренность и т. д. В табл. 1 показано изменение длины ствола в калибрах.

Зная величину C_E и калибр орудия в дециметрах,

Таблица 1

| Тип орудия | Коэффициент mogućества орудия C_E , $тм/дм^3$ | Длина ствола, выраженная в калибрах |
|------------------|--|--|
| Пушки: | | |
| большой мощности | 800÷1200 | 75÷90 |
| зенитные | 600÷1000 | 55÷75 |
| противотанковые | 400÷800 | 50÷60 |
| дивизионные | 300÷600 | 45÷55 |
| Гаубицы | 100÷300 | 20÷40 |
| Минометы | 10÷50 | 5÷15 |

можно вычислить величину кинетической энергии, которую будет иметь снаряд в момент вылета из орудия:

$$E_0 = C_E d^3.$$

Например, снаряд 203-мм орудия средней мощности ($C_E = 600 \text{ тм/дм}^3$) будет обладать кинетической энергией, равной

$$E_0 = 600 \cdot 2,03^3 \approx 5000 \text{ тм.}$$

Этой энергии хватило бы, чтобы поднять железнодорожный товарный поезд на высоту 5 м.

В качестве своеобразной топки в орудии используется **зарядная камера** — часть канала ствола орудия, где размещается боевой заряд 2 (рис. 1). Остальная часть канала ствола — **нарезная часть** образует как бы рабочий цилиндр, в котором перемещается снаряд — поршень. Рабочий ход поршня равен **полному пути снаряда**.

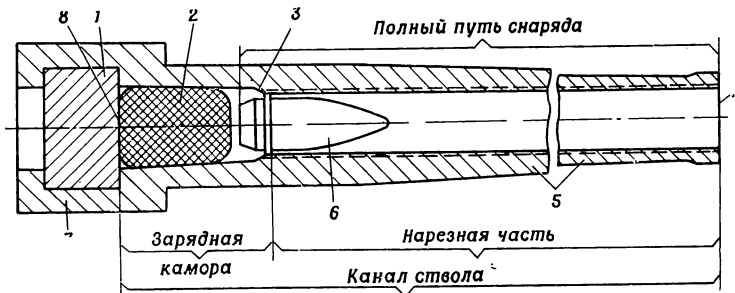


Рис. 1. Схема артиллерийской системы:

1 — затвор; 2 — заряд; 3 — соединительный конус; 4 — дульный срез; 5 — ствол; 6 — снаряд; 7 — казенная часть; 8 — дно канала ствола

В казенной части 7 ствол 5 имеет затвор 1, который запирает канал ствола после заряжания орудия. При зарядании в канал ствола вкладывают отдельно снаряд 6 и затем боевой заряд (раздельное зарядание) или сразу **унитарный патрон**, в котором снаряд и боевой заряд соединены между собой (унитарное зарядание).

При раздельном зарядании снаряд заклинивается или, как говорят артиллеристы, «закусывается» ведущим пояском в соединительном конусе 3. При унитарном зарядании снаряд удерживается в дульце гильзы. Канал ствола простирается от дна канала ствола 8 до дульного среза ствола 4.

Очевидно, тепловой машиной может быть только заряженное орудие, или (как говорят во внутренней баллистике) **артиллерийская система**, состоящая из орудия (ствола), снаряда и заряда.

В отличие от тепловых двигателей, которые являются машинами непрерывного действия, артиллерийское орудие представляет собой тепловую машину прерывистого типа. После каждого выстрела, т. е. одного цикла работы, производится зарядание орудия — своего рода сборка двигателя, причем продолжительность процесса зарядания в десятки, сотни и тысячи раз превосходит длительность цикла.

Порох как топливо особого вида

Топливом в орудии является **порох**, составляющий основную часть боевого заряда. Кроме пороха боевой заряд может включать **воспламенитель**, **пламегаситель**, **размеднитель**, **флегматизатор**, **обтюраторы** и другие дополнительные элементы, которые сгорают вместе с порохом.

Долгое время в артиллерии применялся **дымный порох**, представляющий собой механическую смесь калиевой селитры (75%), древесного угля (15%) и серы (10%). При горении дымного пороха образуется приблизительно равное по весу количество газообразных и твердых продуктов. Последние при стрельбе создают значительный дым. В настоящее время дымный порох идет главным образом на изготовление воспламенителей.

Крупным достижением в артиллерии было открытие во второй половине 19 в. **бездымного пороха**, полностью превращающегося при горении в газообразные продукты — пороховые газы.

Основной частью бездымных порохов является **пироксилин** — продукт, получаемый в результате обработки клетчатки (хлопка, древесных опилок и т. п.) азотной кислотой в присутствии серной кислоты. Этот процесс называется **нитрацией**.

Один из сортов пироксилина — **пирокolloид**, полученный Д. И. Менделеевым в 1890 г., отличается от остальных полной его растворимостью в спирто-эфирном растворителе.

Бездымный порох получается в результате процесса желатинизации пироксилина с помощью различных растворителей: спирто-эфирной смеси, нитроглицерина, нитродигликоля, нитрогуанидина. Отсюда и названия различных сортов пороха: **пироксилиновый**, **нитроглицериновый**, **нитродигликолевый**, **нитрогуанидиновый**. В табл. 2 приводится примерный состав (в процентах) перечисленных сортов пороха.

Таблица 2

| Компоненты | Сорт пороха | | | |
|-------------------|----------------|--------------------------------|-------------------|-------------------|
| | пироксилиновый | нитроглицериновый баллиститный | нитродигликолевый | нитрогуанидиновый |
| Пироксилин: | | | | |
| № 1 | 58 | — | — | — |
| № 2 | 37 | — | — | — |
| Коллоксин | — | 58 | 67 | 42 |
| Нитроглицерин | — | 30 | — | — |
| Нитродигликоль | — | — | 30 | 18 |
| Нитрогуанидин | — | — | — | 34 |
| Спирт, эфир, вода | 4 | — | — | — |
| Добавки | 1 | 12 | 3 | 6 |

Пироксилины № 1 и № 2 отличаются технологией изготовления, содержанием азота и степенью растворимости. Пироксилин № 1 содержит больше азота и хуже растворяется в спирто-эфирном растворителе.

Коллоксин представляет собой сорт пироксилина с наименьшим содержанием азота.

В качестве добавок (табл. 2) в бездымные пороха вводят канифоль, вазелиновое масло, графит, камфору, тротил.

Особенностью пироксилинового пороха является большая продолжительность технологического процесса его изготовления. Это объясняется тем, что после желатинизации (пластификации) и прессования пороховой массы спирто-эфирный растворитель из пороха удаляют длительным вымачиванием и сушкой.

Существенный недостаток пироксилинового пороха заключается в способности оставшегося растворителя со временем улетучиваться, что приводит к изменению баллистических свойств пороха.

Нитроглицериновые пороха до настоящего времени остаются еще относительно дорогими, так как исходным сырьем для нитроглицерина являются продукты питания — растительное и животное масла. Из 15 т растительного масла получают 1 т глицерина, а при последующей обработке этого глицерина получают 4 т нитроглицерина.

Исходным сырьем для получения нитродигликоля является этилен, получаемый из продуктов коксования угля или при разложении нефти, при синтезе каучука и из газов доменных печей.

Исходным сырьем для получения нитрогуанидина являются уголь, известь и воздух (при этом необходимо использовать электрическую энергию).

В СССР имеются большие возможности развития и использования нитродигликолевых и нитрогуанидиновых порохов.

Порох является топливом особого вида. От распространенных в энергетике топлив (каменный уголь, керосин и т. п.) порох отличается тем, что для его сжигания не требуется окислитель, процесс горения идет с очень большой скоростью при высокой температуре, он обладает высокой относительной калорийностью, приходящейся на единицу объема топлива.

Условная химическая формула пироксилинового пороха записывается следующим образом: $C_{24}H_{29}O_{42}N_{11}$. Следовательно, в каждой молекуле пороха имеются химические элементы, являющиеся горючим (24 атома углерода С и 29 атомов водорода Н) и окислителем (42 атома кислорода О). Причем в данном случае ко-

эффицент избытка окислителя равен 0,86 (меньше единицы), т. е. кислорода для полного сгорания пороха не хватает и горение пороха лишь частично идет до конечных продуктов: воды H_2O и углекислого газа CO_2 . Порох способен гореть в замкнутом пространстве и даже в вакууме.

Бездымный порох на открытом воздухе горит со скоростью 1—2 мм в секунду, что в тысячи раз превосходит скорость горения, например, керосина. При этом температура горения пороха достигает $3000^\circ C$, тогда как при горении керосина она равна $1000^\circ C$. В замкнутом пространстве скорость горения пороха возрастает в сотни раз. В орудии весь порох боевого заряда сгорает за тысячные доли секунды. При особых условиях порох способен взрываться, например, от мощного детонатора.

Если сравнить теплотворную способность или калорийность топлив Q_w , то окажется, что у пороха она значительно ниже (600—1000 ккал/кг), чем у керосина (11 000 ккал/кг); однако при этом не учитывается масса окислителя, обеспечивающего горение керосина. При учете этого обстоятельства явное преимущество по тепловыделению, приходящемуся на единицу объема (литр) исходных веществ, участвующих в горении, будет на стороне пороха 1400 ккал/л для пороха против 4 ккал/л для смеси керосина с кислородом. Произведение механического эквивалента тепла $E=427 \text{ кгм/ккал}$ на калорийность Q_w носит название потенциала пороха $\Pi = EQ_w$, величина которого может достигать $300 \div 400 \text{ тм/кг}$.

Что касается физических свойств пороха, то бездымный порох относится к группе твердых топлив; изготавливается в виде геометрически правильных элементов (зерен) различных форм и размеров. Удельный вес или плотность бездымного пороха в среднем равна $1,6 \text{ кг/дм}^3$.

Рабочим телом в орудии — тепловой машине являются пороховые газы. Поскольку весь бездымный порох при горении превращается в газы, то пороховых газов в орудии образуется ровно столько, сколько сгорит пороха. В табл. 3 приводится примерный объемный состав пороховых газов в процентах, образующихся при сгорании пироксилинового пороха при давлении 100 кг/см^2 и 4000 кг/см^2 .

Таблица 3

| Газы | Давление | |
|--------------------------------|------------------------|-------------------------|
| | 100 кг/см ² | 4000 кг/см ² |
| Окись углерода CO | 49,3 | 34,5 |
| Углекислый газ CO ₂ | 21,7 | 30,9 |
| Водород H ₂ | 12,6 | 17,4 |
| Азот N ₂ | 16,4 | 15,6 |
| Метан CH ₄ | 0 | 1,6 |
| Пары воды (сверх 100%) | 14,0 | 14,8 |

Из табл. 3 видно, что с ростом давления несколько увеличивается содержание CO₂ и CH₄ и уменьшается содержание CO.

Значительные количества CH₄ могут образовываться при медленном охлаждении пороховых газов при высоких давлениях из-за протекания вторичных реакций между газами.

При сгорании 1 кг бездымного пороха образуется 700÷1100 литров пороховых газов.

В состав пороховых газов входят продукты неполного сгорания CO, H₂, CH₄, которые при истечении из канала ствола в атмосферу при определенных условиях могут соединиться с кислородом воздуха, образуя дульное и обратное (в казенной части) пламя. Для устранения пламени, демаскирующего ночью место нахождения орудия, в состав боевого заряда включают пламегаситель.

В канале ствола орудия пороховые газы находятся под очень высоким давлением, достигающим 3000 и более атмосфер. В связи с этим важной технической задачей является обтюрация* пороховых газов в орудии, для чего на снарядах делают обтюрирующие и ведущие пояски из меди или керамического железа, а в казенной части канала ствола размещается гильза (вместе с боевым зарядом) или специальный обтюратор.

* В технике обтюрация означает предупреждение прорыва газов, что обеспечивается совокупностью конструктивных мер, направленных на удержание (изоляция) газов в некотором объеме.

Преобразование энергии при стрельбе

При движении снаряда по каналу ствола орудия происходит расширение пороховых газов и переход тепловой энергии газов в кинетическую энергию снаряда. При этом температура пороховых газов понижается. После вылета снаряда из канала ствола пороховые газы истекают в атмосферу и перемешиваются с воздухом.

Рассмотрим схему преобразования энергии при выстреле из орудия (рис. 2). Химическая энергия, заключенная в пороховом заряде, освобождается при горении пороха и переходит в тепловую энергию образовавшихся пороховых газов. Причем общее количество выделившегося тепла зависит главным образом от веса порохового заряда и от сорта пороха.

К сожалению, больше половины всей тепловой энергии пороховых газов при их истечении из канала ствола выбрасывается в атмосферу в виде тепловой энергии струи газов и рассеивается. При этом в атмосфере возникают разнообразные явления, связанные с преобразованием энергии: перемещение и нагрев воздуха, возникновение ударных волн (дульной волны), свечение струи газов (дульное пламя), электризация облака пороховых газов, химические реакции и т. п. Большинство из перечисленных явлений играет отрицательную роль.

Значительная часть тепловой энергии (25 ÷ 40%) переходит при расширении пороховых газов в кинетическую энергию снаряда, которую следует считать полезной. Еще некоторая часть (1 ÷ 10%) при этом переходит в кинетическую энергию пороховых газов.

Кинетическая энергия снаряда в полете расходуется на совершение работы по преодолению силы сопротивления воздуха. При стрельбе на большие дальности снаряд теряет в полете до 60 ÷ 80% начальной кинетической энергии, при стрельбе же прямой наводкой эти потери значительно меньше (до 20%).

При встрече с целью кинетическая энергия, которой будет обладать снаряд, тратится на разрушение преграды (брони, бетона, грунта и т. п.), а при взрыве снаряда остается составной частью кинетической энергии осколков и продуктов взрыва.

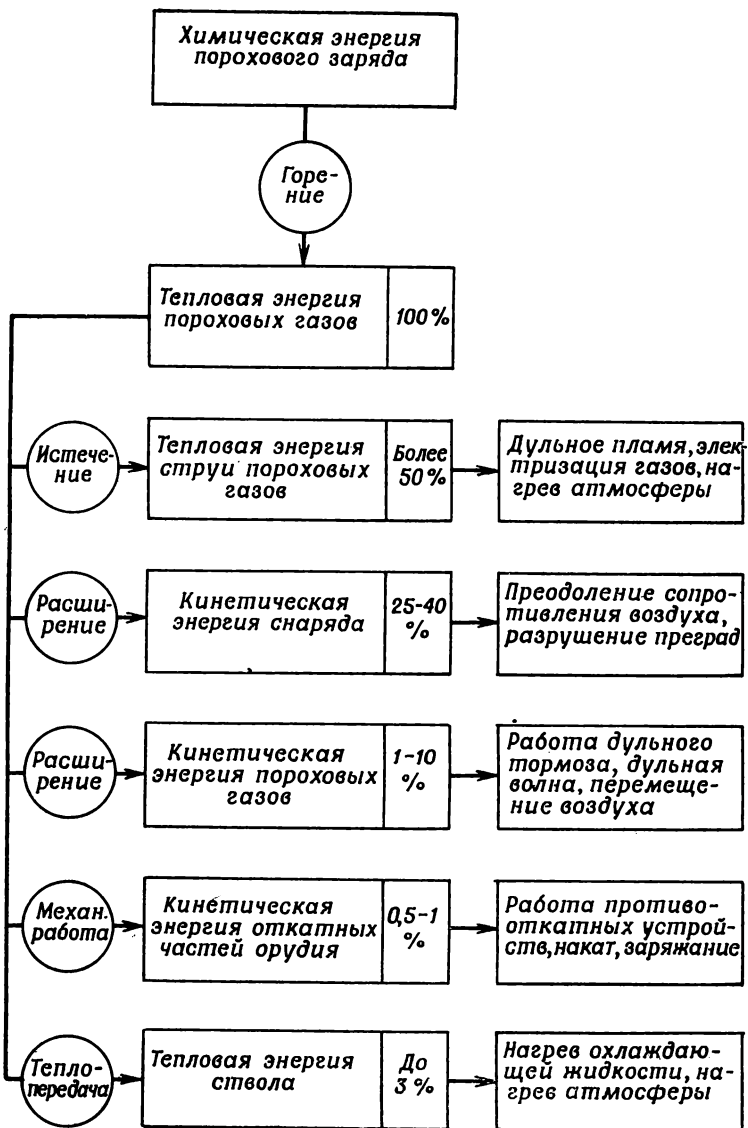


Рис. 2. Схема преобразования энергии при выстреле

Кинетическая и тепловая энергия пороховых газов в орудиях с дульным тормозом в некотором количестве (до 1%) полезно расходуется на работу дульного тормоза для уменьшения силы отдачи. Основная часть кинетической энергии газов при истечении газов в атмосферу переходит в кинетическую и тепловую энергию воздуха.

На откат ствола, т. е. в кинетическую энергию откатных частей орудия, поглощаемую противооткатными устройствами, переходит 0,5—1% всего тепла. Тепловая энергия пороховых газов и кинетическая энергия откатных частей орудия используется в незначительных количествах (менее 1%) для совершения полезных работ, например: для заряжания орудия в автоматах, наката ствола, продувки канала ствола (эжектирования) в танковой артиллерии и т. д.

Некоторая часть тепловой энергии пороховых газов (до 3%) посредством теплопередачи переходит в стенки ствола (тепловая энергия ствола), а затем в охлаждающую ствол жидкость или в атмосферу.

Коэффициент полезного действия орудия

Важной характеристикой всякой тепловой машины является коэффициент полезного действия $r'_д$, равный отношению совершенной полезной механической работы к затрачиваемому количеству тепла. В данном случае полезная работа численно равна кинетической энергии снаряда E_0 , а затраченная тепловая энергия, выраженная в механических единицах, численно равна произведению потенциала пороха Π (для 1 кг пороха) на вес порохового заряда ω .

Следовательно, для величины $r'_д$ получим выражение

$$r'_д = \frac{E_0}{\Pi\omega} = \frac{qv_0^2}{2g\Pi\omega}.$$

Коэффициент полезного действия (КПД) современного артиллерийского орудия равен 0,20—0,35*, что

* КПД не учитывает кинетическую энергию вращательного движения снаряда.

значительно выше КПД паровоза (0,09), паровых машин (до 0,20) и близок к КПД двигателей внутреннего сгорания (до 0,35).

Интересно оценить мощность орудия как тепловой машины или количество совершенной полезной механической работы в единицу времени. Используя приведенную выше для 203-мм орудия величину $E_0=5000$ тм и учитывая, что продолжительность выстрела t_d из такого орудия равна 0,01 сек, получим

$$N_{\text{ОР}} = \frac{E_0}{t_d} = \frac{5000}{0,01} = \\ = 500000 \text{ тм/сек} \approx 4900000 \text{ кВт} = 4,9 \text{ млн. кВт},$$

где $N_{\text{ОР}}$ — мощность орудия, кВт;

E_0 — полезная механическая работа, тм;

t_d — продолжительность выстрела, сек.

Как видим, мощность орудий сравнима с мощностью самых крупных современных электростанций (например, мощность Братской ГЭС на Ангаре равна 4,1 млн. кВт). Следует только учитывать, что мощность орудия является импульсной характеристикой.

ГЛАВА 2

ЧЕМ ЗАНИМАЕТСЯ ВНУТРЕННЯЯ БАЛЛИСТИКА?

Баллистика — наука о движении снаряда

Слово **баллистика** происходит от греческого слова «βαλλω», что в переводе означает «бросаю». Следовательно, баллистика как наука должна иметь дело с бросанием (полетом, движением) снаряда.

Внутренняя баллистика изучает движение снаряда внутри канала ствола орудия. Дальнейшее движение снаряда в пространстве (вне орудия) изучается **внешней баллистикой**.

Изучить движение снаряда — значит узнать в каждый момент времени путь, пройденный снарядом, его **скорость** и **ускорение**. При движении на снаряд действуют силы, которые в конечном счете определяют характер изменения перечисленных элементов движения. Поэтому выявлению и изучению действующих сил должно быть уделено особое внимание.

В орудии движущей силой является сила давления пороховых газов, образующихся в результате сгорания порохового заряда. Давление пороховых газов в канале ствола орудия зависит от многих факторов, и в первую очередь от процесса горения пороха. Горение пороха в постоянном замкнутом объеме изучается в одном из основных разделов внутренней баллистики — **пиростатике** *.

Давление пороховых газов зависит также от характера движения снаряда по каналу ствола, поскольку при этом изменяется занимаемый газами объем и происходит процесс расширения пороховых газов. Совмест-

* Пиро — огонь, горение; статика — статические, неизменяющиеся условия.

ное изучение движения снаряда и расширения пороховых газов производится в центральном разделе внутренней баллистики — **пиродинамике***. Пиродинамика связывает химический процесс горения пороха, механический процесс поступательного движения снаряда и термодинамический процесс расширения пороховых газов, т. е. описывает, как говорят, пиродинамический процесс.

Цель — пиродинамические кривые

Величины, с помощью которых описывается пиродинамический процесс, называются пиродинамическими элементами.

Основными пиродинамическими элементами являются:

- время движения снаряда t ;
- путь, пройденный снарядом в канале ствола, l ;
- скорость поступательного движения снаряда v ;
- давление пороховых газов в канале ствола p .

Ускорение поступательного движения снаряда пропорционально давлению пороховых газов и поэтому не рассматривается как самостоятельный элемент. Кроме указанных имеются и другие пиродинамические элементы.

За **начало отсчета времени** во внутренней баллистике принимается момент начала движения снаряда, а за **начало отсчета пути** снаряда принимается положение дна снаряда в момент начала движения. **Скорость** снаряда берется относительно ствола, т. е. в относительном движении снаряда. За **величину давления** во внутренней баллистике принимается некоторое среднее баллистическое давление пороховых газов, одинаковое в данный момент времени во всех точках заснарядного пространства. В действительности давление не одинаково в различных точках объема канала ствола. У дна канала ствола давление $p_{\text{кн}}$ будет больше давления $p_{\text{сн}}$ у дна снаряда:

$$p_{\text{кн}} = \left(1 + 0,5 \frac{\omega}{q} \right) p_{\text{сн}},$$

где ω — вес заряда;
 q — вес снаряда.

* Пиро — огонь, горение; динамика — динамические, изменяющиеся условия.

Среднее баллистическое давление p будет также больше давления $p_{сн}$:

$$p = \left(1 + \frac{1}{3} \frac{\omega}{q}\right) p_{сн}.$$

Как видим, разница между рассмотренными величинами давления пороховых газов возрастает с ростом веса заряда и уменьшением веса снаряда.

Графические или аналитические зависимости пиродинамических элементов в функции одного из них называются **пиродинамическими кривыми**. Можно сказать, что внутренняя баллистика занимается построением и изучением пиродинамических кривых.

Наибольший интерес представляют пиродинамические кривые в функции от времени t и пути l снаряда. Первые кривые a (рис. 3) позволяют проследить, как

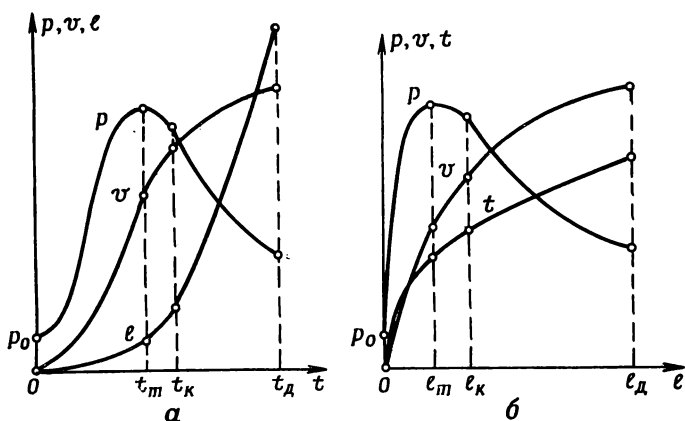


Рис. 3. Пиродинамические кривые:
а) в функции от времени; б) в функции от пути снаряда

изменяются давление пороховых газов, скорость и путь снаряда от момента начала движения до момента вылета, когда дно снаряда пройдет через дульный срез ствола. Во времени путь l снаряда непрерывно растет от нуля сначала медленно, а затем все быстрее; скорость v снаряда также непрерывно растет от нуля сначала более стремительно, а потом с убывающим приростом; давление p пороховых газов существует уже в мо-

мент начала движения, поскольку должна быть сила, способная сдвинуть снаряд, а далее сначала растет, а затем начинает падать, проходя через максимум. Максимум давления достигается приблизительно в середине полного времени t_d движения снаряда по каналу ствола орудия.

Пиродинамические кривые b в функции от пути показывают, какими будут давление пороховых газов, скорость снаряда и время его движения, когда снаряд окажется на некотором расстоянии от первоначального положения, т. е. в заданном сечении канала ствола. Это особенно важно знать при расчете толщины стенки ствола, для которой сила давления пороховых газов является внутренней нагрузкой, стремящейся разрушить ствол. Пиродинамические кривые в функции от пути идут иначе, чем кривые в функции от времени. Более детальное объяснение характера изменения пиродинамических элементов будет дано далее (при пояснении физических процессов, происходящих в канале ствола орудия). Кривая давления p показывает, что наибольшее давление достигается на начальном участке движения снаряда (Ol_m), не превышающем одной трети полного пути снаряда в канале ствола орудия l_d . Поэтому именно здесь ствол имеет наибольший диаметр, убывающий потом к дульному срезу.

Пиродинамические кривые имеют четыре последовательно расположенные опорные точки, обозначающие: начало движения снаряда, наибольшее давление пороховых газов, окончание горения пороха и дульный срез орудия. Пиродинамические элементы в опорных точках снабжаются соответственно индексами « O », « m », « K », « D ». Например: p_0 , p_m , t_m , l_k , v_d и т. д.

Может оказаться, что порох сгорит раньше, чем будет достигнут максимум давления, и тогда наибольшим давление пороховых газов будет в момент окончания горения пороха, а точки m и K совпадут. Кривая давления в точке наибольшего давления в этом случае будет иметь пик, что часто имеет место в минометах.

Пиродинамические кривые могут быть записаны при проведении опыта, причем анализ опытных кривых составляет один из важных путей изучения пиродинамического процесса.

Из всех значений пиродинамических элементов важнейшими являются: дульная скорость снаряда v_d и наибольшее давление пороховых газов p_m . Эти величины наряду с весом снаряда и калибром орудия определяют основные боевые свойства орудия. В артиллерийской практике чаще употребляется вместо дульной скорости начальная скорость снаряда v_0 , величина которой близка к величине дульной скорости. Физический смысл начальной скорости будет рассмотрен далее.

Сейчас лишь отметим, что если дульная скорость — это относительная скорость снаряда (относительно ствола), которую он имеет, покидая ствол, то начальная скорость — это абсолютная скорость снаряда (относительно земли), которую вводят во внешней баллистике.

Первые шаги по измерению скорости снаряда и давления пороховых газов были сделаны еще в 18 в., однако только в середине 19 в. были изобретены надежные приборы для их измерения. К этому времени и относятся возникновение внутренней баллистики как самостоятельной науки, которая могла теперь опереться на прочный фундамент — эксперимент.

Задачи выдвигает артиллерийская практика

Внутренняя баллистика наряду с другими артиллерийскими науками призвана решать задачи, выдвигаемые артиллерийской практикой.

Одной из важнейших практических задач является задача создания новых образцов артиллерийского вооружения: орудия (ствола и лафета), самоходной части или тягача, снаряда, взрывателя, боевого заряда, гильзы и других элементов. Внутренняя баллистика (поскольку именно она изучает основные процессы, происходящие при выстреле) указывает пути отыскания оптимальных решений и рекомендаций по обеспечению требуемых **боевых свойств** — мощности, дальности, меткости и кучности, скорострельности, маневренности при допустимых материальных затратах.

Наиболее тесно внутренняя баллистика связана с проектированием артиллерийского орудия. Этому вопросу посвящается раздел, рассматривающий баллистиче-

ское проектирование артиллерийского орудия. В результате баллистического проектирования назначаются размеры канала ствола орудия и важнейшие параметры, характеризующие условия заряжания орудия. До начала баллистического проектирования в результате тактико-экономических исследований и внешнебаллистических расчетов должны быть **выбраны**: калибр орудия, вес снаряда и начальная скорость, при которых достигается наибольшая эффективность стрельбы.

Задача баллистического проектирования артиллерийского орудия состоит в отыскании таких конструктивных параметров и параметров заряжания, при которых спроектированное орудие будет сообщать снаряду данного калибра и веса требуемую начальную скорость и при этом наилучшим образом удовлетворять тактико-техническим требованиям. С баллистического проектирования орудия и расчета ствола на прочность начинается общее проектирование артиллерийской системы.

На базе теоретических разделов внутренней баллистики с учетом тактических, технических и экономических достижений на данном этапе развития науки и техники разрабатываются методы баллистического проектирования, которые указывают пути поисков и признаки наивыгоднейшего варианта баллистического решения.

Основными этапами баллистического проектирования являются: выбор исходных данных; выбор и расчет отдельных вариантов; оценка вариантов и выбор окончательного варианта; построение пиродинамических кривых (для окончательного варианта), отвечающих различным условиям эксплуатации орудия.

В начале 20 в. у нас сложилась **русская школа** баллистического проектирования, родоначальником которой является профессор **Н. Ф. Дроздов**. Выдающимися образцами артиллерии, созданными представителями этой школы, являются: скорострельная 3-дюймовая полевая пушка обр. 1902 г.; 12-дюймовая пушка для линкоров типа «Севастополь» обр. 1910 г.; 122-мм гаубица обр. 1938 г., состоящая на вооружении до настоящего времени. Все они с успехом применялись в годы Великой Отечественной войны.

Внутренняя баллистика широко используется при модернизации существующих артиллерийских систем. В истории советской артиллерии был период 20-х годов, когда в условиях империалистической интервенции, гражданской войны, разрухи народного хозяйства, отсутствия подготовленных кадров государство не могло решить задачу перевооружения артиллерии с учетом опыта закончившейся мировой войны. И вот тогда был взят единственно верный курс на модернизацию образцов артиллерии, доставшейся молодой Советской республике от царского режима.

Для успешного проведения этого курса в жизнь наряду с многообразной организационной работой был создан в декабре 1918 г. в Петрограде научный артиллерийский центр — Комиссия особых артиллерийских опытов (**Косартоп**). В период существования Косартопа (до 1926 г.) были рассмотрены и решены многие вопросы стрельбы, внутренней и внешней баллистики, обеспечившие успешную модернизацию орудий и определившие на долгие годы пути развития советской артиллерии.

Диапазон интересов: от расчета до эксплуатации

Для расчета на прочность ствола и его отдельных элементов, корпуса снаряда, снаряжения и ведущих поясков снаряда, гильзы, деталей взрывателя используются кривые давления пороховых газов. Зная величину давления в данной точке и в данный момент времени, можно получить действующие силы: силу давления пороховых газов и силу инерции от ускорения поступательного движения снаряда, пропорциональную давлению.

Для расчета лафета и его механизмов (особенно для проектирования противооткатных устройств орудия) используются кривые давления пороховых газов и скорости снаряда в функции от времени, а также некоторые характеристики процесса истечения пороховых газов из канала ствола после вылета из него снаряда. Знание внутренней баллистики во многом облегчает проектирование автоматики современного автоматического оружия, т. е. механизмов заряжания орудия и производства выстрела.

Основные механизмы и устройства артиллерийских взрывателей рассчитываются на основе данных внутренней баллистики о характере движения снаряда и силах инерции, действующих на детали взрывателя в канале ствола и в струе вытекающих из ствола пороховых газов.

Проектирование порохового заряда опирается на законы горения пороха, которые изучаются во внутренней баллистике. Только внутренняя баллистика может дать указания о выборе сорта пороха, формы и размеров пороховых элементов, веса порохового заряда.

Внутренняя баллистика играет большую роль не только при проектировании и расчете артиллерийского вооружения, но и при испытании образцов вооружения. Она дает теоретические основы для методики испытаний порохов и зарядов, для создания нужных условий испытаний орудия и боеприпасов, для учета отклонений условий стрельбы от заданных условий, для объяснения опытных данных и ненормальностей в работе артиллерийского вооружения в период его отработки и т. п.

Внутренняя баллистика самым тесным образом связана с эксплуатацией артиллерии. Она способствует, в частности, повышению меткости и кучности стрельбы. Теория поправок внутренней баллистики позволяет вычислить изменения дульной скорости снаряда и наибольшее давление пороховых газов при изменениях условий стрельбы (веса снаряда, температуры заряда и т. д.). Знание внутренней баллистики помогает правильно выбрать режим стрельбы, организовать хранение и уход за орудиями и боеприпасами, избежать тяжелых аварий при стрельбе и сделать ее эффективной и полностью безопасной.

Внутренняя баллистика связана с другими артиллерийскими науками — теорией и проектированием артиллерийских орудий и боеприпасов, теорией порохов и взрывчатых веществ, внешней баллистикой, теорией стрельбы. Занимая одно из ведущих мест среди артиллерийских наук, внутренняя баллистика служит для них источником знаний о процессах, происходящих в орудии при выстреле. В свою очередь она получает от других наук новые задачи, указания о необходимости более глубокого изучения отдельных про-

цессов, подтверждения в правильности полученных результатов.

По своему содержанию внутренняя баллистика является экспериментально-теоретической наукой. В ней велика роль эксперимента, ввиду большой сложности изучаемых процессов, и вместе с этим широко применяется самый совершенный математический аппарат.

Во внутренней баллистике различают **прямые** и **обратные задачи**. Прямая задача состоит в отыскании пиродинамических элементов по заданным конструктивным элементам и условиям заряжания орудия. Обратная задача, наоборот, состоит в отыскании конструктивных элементов и условий заряжания по заданным пиродинамическим элементам. Обратные задачи решаются при проектировании или модернизации артиллерийского вооружения. Задачу расчета пиродинамических кривых называют основной задачей пиродинамики.

ЯВЛЕНИЕ ВЫСТРЕЛА

Пять периодов за доли секунды

Слово «выстрел» в артиллерии употребляется в нескольких значениях и обозначает:

совокупность процессов, протекающих в стволе орудия;

комплект боеприпасов, предназначенных для заряжания артиллерийского орудия;

момент вылета снаряда из канала ствола орудия.

Во внутренней баллистике слово «выстрел» употребляется в его первом значении.

Явлением выстрела называется совокупность механических, физических, химических, термодинамических и газодинамических процессов, проходящих в орудии от момента начала воспламенения заряда до момента окончания истечения пороховых газов из канала ствола орудия после вылета снаряда.

Явление выстрела характеризуется кратковременностью и сложностью, оно длится десятые и даже сотые доли секунды, причем за столь короткий промежуток времени происходит множество процессов различной природы, связанных друг с другом.

Во время выстрела развиваются высокие давления, достигающие тысяч атмосфер, и высокие температуры до 3000° С. Эти сложные условия затрудняют изучение явления выстрела.

Несмотря на кратковременность явления выстрела, его можно разделить на пять последовательных периодов:

1. Предварительный или пиростатический период — от момента начала воспламенения заряда до момента начала движения снаряда.

2. **Период форсирования** — от момента начала движения снаряда до момента окончания врезания ведущих поясков снаряда в нарезы.

3. **Пиродинамический период** — от момента окончания врезания ведущих поясков в нарезы до момента окончания горения порохового заряда.

4. **Термодинамический период** — от момента окончания горения порохового заряда до момента вылета снаряда из канала ствола орудия.

5. **Период последействия** — от момента вылета снаряда до момента окончания истечения пороховых газов из канала ствола орудия.

В артиллерийском орудии обычно имеют место все перечисленные периоды и только в редких случаях, когда окончание горения пороха происходит после вылета снаряда, будет отсутствовать термодинамический период. В минометах, как правило, будет отсутствовать период форсирования.

Процессы основные и второстепенные

Явление выстрела включает следующие процессы:

- воспламенение пороха;
- горение пороха;
- образование пороховых газов;
- врезание ведущих поясков в нарезы;
- поступательное движение снаряда;
- трение ведущих поясков о поверхность канала ствола;
- вращательное движение снаряда;
- расширение пороховых газов;
- движение пороховых газов;
- движение элементов боевого заряда;
- изменение состава пороховых газов;
- теплопередача от пороховых газов к стенкам ствола;
- нагрев ствола;
- деформация ствола, снаряда, гильзы;
- износ и разгар канала ствола;
- вытеснение воздуха из канала ствола;
- движение откатных частей орудия;
- истечение пороховых газов из канала ствола;
- образование дульной волны;
- образование дульного пламени.

Если бы список процессов, протекающих в артиллерийской системе при выстреле, был удвоен, то и тогда мы не охватили бы всех процессов явления выстрела. Это замечание относится особенно к системам специальных схем: минометам, безоткатным орудиям, легкогазовым пушкам и т. п.

Перечисленные процессы могут протекать в одном или в нескольких периодах. Так, воспламенение пороха происходит в предварительном периоде, врезание ведущих поясков в нарезы — в периоде форсирования, образование дульной волны — в периоде последействия. А движение пороховых газов протекает в четырех периодах — форсирования, пиродинамическом, термодинамическом и последействия. Наибольшее число процессов совершается одновременно в пиродинамическом периоде, который поэтому является наиболее сложным и общим.

Перечисленные процессы не равноценны по их роли при решении основной задачи пиродинамики, т. е. с точки зрения раскрытия характера движения снаряда в канале ствола орудия.

К основным процессам явления выстрела относятся:

- горение пороха;
- образование пороховых газов;
- расширение пороховых газов;
- поступательное движение снаряда;
- истечение пороховых газов из канала ствола.

Эти процессы во внутренней баллистике изучаются подробно.

Следует отметить, что горение пороха происходит сначала в постоянном объеме, а с момента начала движения снаряда — в переменном объеме, расширение пороховых газов происходит как при горении пороха, так и после его горения.

Процессы, не относящиеся к основным, хотя и имеют большое самостоятельное значение, рассматриваются во внутренней баллистике лишь в той мере, в какой это способствует раскрытию характера движения снаряда. Будем условно называть их второстепенными.

Все начинается с горения пороха

Основные результаты по горению пороха во внутренней баллистике были получены экспериментальным путем.

Если пороху в какой-нибудь точке поверхности сообщить (например, с помощью раскаленной проволоки) тепловой импульс и температура пороха при этом достигнет $200\text{--}270^\circ\text{C}$, то произойдет зажание пороха. Дальше начнется самопроизвольный процесс воспламенения и горения пороха, т. е. распространение реакции взрывчатого превращения по поверхности и в глубь пороха.

Ранние опыты заключались в сжигании на открытом воздухе дымного пороха, спрессованного в виде лепешек или стержней в металлических трубках. В результате наблюдений над горением было установлено, что при плотности, большей $1,8 \text{ кг/дм}^3$, дымный порох горит правильно параллельными слоями с сохранением формы. Это положение в дальнейшем оказалось справедливым и для бездымных порохов.

На рис. 4 показаны поперечные сечения пороховых зерен до начала горения (пунктирная линия) и в процессе горения (сплошная линия). Теоретически во всех точках поверхности зерно обгорит на одинаковую толщину e сгоревшего слоя пороха. При этом первоначальная форма зерен (бруска a , трубки b , семиканального зерна c до распада) сохранится. В момент соприкосновения поверхностей каналов и наружной поверхности произойдет распад семиканального зерна c на 12 заштрихованных элементов, называемых звездками, вследствие чего первоначальная форма зерна изменится.

Наименьший размер $2e_1$, характеризующий толщину порохового зерна, называется толщиной горящего свода.

Во время проведения опытов определялось время горения пороха, оказавшееся пропорциональным длине порохового стержня или толщине пороховой лепешки.

Разделив на время горения длину стержня (сгорающего с одного конца) или половину толщины лепешки (поскольку она горит с двух сторон), получим скорость горения пороха в данных условиях. Изменяя условия опыта, можно было изучать зависимость скорости горения от различных факторов. Оказалось, что скорость

горения пороха изменяется при изменении состава пороха, его плотности, влажности, температуры. В среднем скорость горения дымного пороха на открытом воздухе была равна 10 мм/сек.

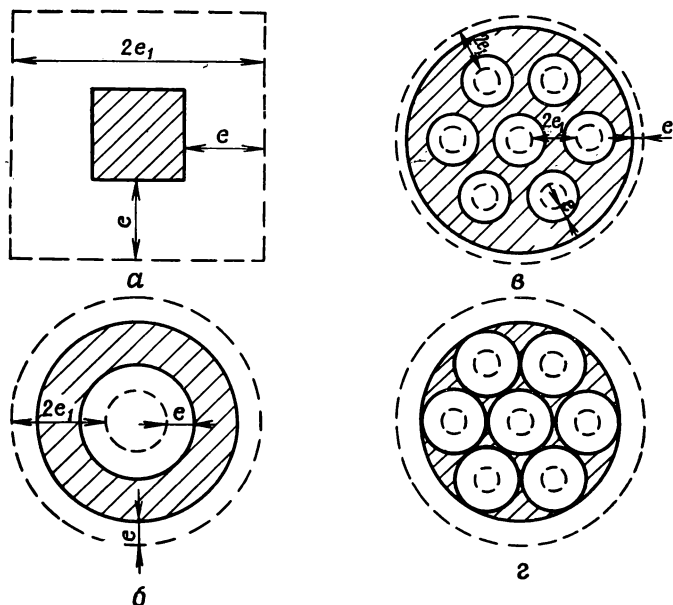


Рис. 4. Горение пороха параллельными слоями:
 а) брусок; б) трубка; в) семиканальное зерно до распада; г) семиканальное зерно в момент распада

Простые расчеты показывали, что при горении пороха с такой скоростью в орудии (в течение реального времени движения снаряда) он не успевал бы сгореть полностью. Однако при стрельбе не наблюдалось выбрасывания несгоревших частиц пороха. Значит, скорость горения пороха в орудии была больше, чем на воздухе; причиной этого могло быть высокое давление газов.

Чтобы подтвердить зависимость скорости горения пороха от давления, беспоконные исследователи начали подниматься в горы и там сжигать порох. В табл. 4 приведены опытные времена сгорания стержней из дымного пороха длиной 4 дм на высотах до 4000 м над уровнем моря. С увеличением высоты или уменьшением баромет-

рического давления время горения росло, а скорость горения, наоборот, уменьшалась.

Т а б л и ц а 4

| Барометрическое давление, мм рт. ст. | Время горения, сек |
|---|--------------------|
| 740,0 | 35,0 |
| 694,1 | 36,1 |
| 610,4 | 39,0 |
| 529,4 | 44,0 |

Позже для сжигания пороха при высоких давлениях были разработаны бомбы постоянного давления, т. е. толстостенные стальные сосуды, имеющие клапаны или сопла, обеспечивающие постоянное давление пороховых газов.

Законы горения пороха

Пожалуй, одним из самых важных приборов экспериментальной внутренней баллистики является манометрическая бомба, названная так потому, что в ней измеряется давление пороховых газов с помощью манометров. При горении пороха в постоянном объеме манометрической бомбы, т. е. в пиростатических условиях, давление непрерывно растет от атмосферного до наибольшей величины в момент окончания горения, которая называется **полным пиростатическим давлением P** .

Кривую давления в манометрической бомбе и масштаб времени в виде синусоиды записывают на закопченной ленте из плотной бумаги. Длина l_t (рис. 5) одной волны синусоиды соответствует вполне определенному промежутку времени, выраженному, например, в миллисекундах. Обмером кривой давления (с учетом масштаба времени) получают зависимость давления пороховых газов в манометрической бомбе от времени, анализ которой позволяет получить разнообразные сведения о горении пороха. В орудии (в предварительном периоде и в периоде форсирования) зависимость давления от времени будет аналогичной.

Многочисленные опыты показали, что полное пиростатическое давление зависит только от сорта пороха

и плотности заряжения Δ , равной отношению веса пороха ω в кг к объему камеры бомбы W_0 в литрах. Величина P не зависит, в частности, от формы и размеров пороховых элементов, а также от размеров самой бом-

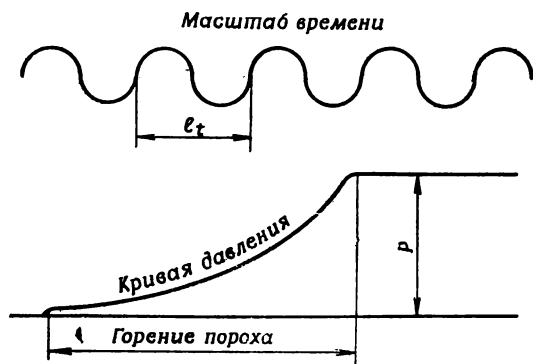


Рис. 5. Кривая давления в манометрической бомбе

бы. Выражение для полного пиростатического давления имеет вид:

$$P = \frac{f\Delta}{1 - \alpha\Delta},$$

где $\Delta = \frac{\omega}{W_0}$ — плотность заряжения;

f и α — сила пороха и коволюм пороховых газов.

Сила пороха f характеризует работоспособность пороха. Чем больше величина f , тем выше энергетические возможности пороха — температура пороховых газов и работа, которую способны совершить при расширении пороховые газы весом 1 кг. При этом предполагается, что процесс расширения проходит при атмосферном давлении и является изобарическим процессом.

Коволюм пороховых газов α характеризует объем, который будут занимать молекулы 1 кг пороховых газов.

Из формулы видно, что с увеличением плотности заряжения Δ (например, с увеличением веса заряда при неизменном объеме камеры) полное пиростатическое

давление P растет все более интенсивно и при $\Delta = \frac{1}{\alpha}$ стремится к бесконечности, так как в знаменателе будет стоять нуль. Например, если в 122-мм гаубице обр. 1938 г. при полном заряде весь порох сгорит до начала движения снаряда, то давление достигнет величины 20 тыс. атм.

Если в манометрической бомбе при двух значениях плотности заряжания определить величину P , то с помощью формулы можно найти силу пороха f и коэффциент α , т. е. опытные характеристики пороха, которые называются баллистическими.

В то время как величина полного пиростатического давления не зависит от формы и размеров пороховых элементов, ход кривой давления существенно зависит от этих факторов. В частности, времена горения геометрически подобных пороховых элементов, отличающихся размерами, будут относиться так, как относятся их толщины горящего свода $2e_1$. Площадь под кривой давления (давление в кг/дм^2 , время в сек) численно равна величине конечного импульса давления I_K . Величина I_K , полученная опытным путем в манометрической бомбе, является важнейшей характеристикой процесса горения пороха, которую можно переносить на условия горения пороха в орудии.

Для пороха данного сорта и данной формы величина конечного импульса давления растет с увеличением толщины горящего свода. Для порохов, применяемых в артиллерии, величина I_K изменяется от 300 до 2500 $\text{кг}\cdot\text{сек/дм}^2$.

Процесс горения пороха характеризуется законом скорости горения, под которым понимают зависимость скорости горения u от давления пороховых газов. При высоких давлениях, которые имеют место в артиллерийских орудиях, справедлива линейная зависимость вида:

$$u = u_1 p,$$

где u_1 — коэффициент пропорциональности (коэффициент скорости горения);

p — давление пороховых газов.

Как видим, скорость горения пороха в орудии прямо пропорциональна давлению пороховых газов. Величина u_1 равна скорости горения пороха в мм/сек при дав-

лении пороховых газов, равном 1 кг/см^2 (одной атмосфере).

В табл. 5 приводятся значения характеристик пороха f , α , u_1 и скорость горения u пороха при давлении 2000 кг/см^2 .

Т а б л и ц а 5

| Сорт пороха | Сила пороха f , $\text{кг} \cdot \text{дм/кг}$ | Коволюм пороховых газов α , $\text{дм}^3/\text{кг}$ | Коэффициент скорости горения u_1 , $\frac{\text{мм/сек}}{\text{кг/см}^2}$ | Скорость горения u (при $p = 2000 \text{ кг/см}^2$), мм/сек |
|-------------------|---|---|--|---|
| Дымный | 280000 | 0,50 | 1,00 | 2000 |
| Пироксилиновый | 950000 | 1,00 | 0,07 | 140 |
| Нитроглицериновый | 1000000 | 0,95 | 0,20 | 400 |
| Нитродигликолевый | 870000 | 1,13 | 0,04 | 80 |
| Нитрогуанидиновый | 907000 | 1,06 | 0,06 | 120 |

Коэффициент скорости горения u_1 должен зависеть от всех факторов (кроме давления), которые влияют на скорость горения пороха. Для бездымных порохов такими факторами являются состав или сорт пороха (см. табл. 2), влажность и температура пороха. Последние две характеристики зависят от условий хранения пороха.

С увеличением содержания влаги в пироксилиновом порохе на 1% величина u_1 уменьшается на 13%, а с увеличением температуры пороха на 10°C величина u_1 увеличивается на 1,6%.

При теоретическом изучении горения порохового заряда пользуются так называемым геометрическим законом горения, заключающимся в следующем:

- все пороховые элементы (зерна) заряда одинаковы по форме и размерам;
- воспламенение всех пороховых элементов заряда происходит мгновенно;
- горение пороховых элементов происходит параллельными слоями.

Геометрический закон является лишь приближенным отображением действительного — физического закона горения.

Образование пороховых газов

В результате горения пороха образуются пороховые газы, причем для бездымных порохов вес образовавшихся газов будет равен весу сгоревшего пороха $\omega_{сг}$.

Относительный вес сгоревшего пороха обозначают через $\psi = \frac{\omega_{сг}}{\omega}$.

При горении пороха величина ψ изменяется от нуля в момент начала горения ($\omega_{сг} = 0$) до единицы в момент окончания горения пороха.

Относительную толщину слоя сгоревшего пороха обозначают через $z = \frac{e}{e_1}$.

Она изменяется в тех же пределах, что и величина ψ . Поскольку пороховые газы являются носителем тепло-

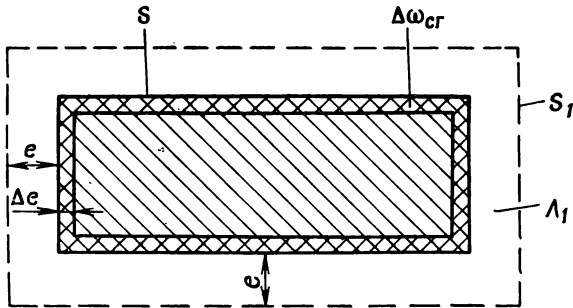


Рис. 6. Образование пороховых газов

вой энергии, то для определения энергетических возможностей орудия необходимо знать приход пороховых газов, т. е. количество образовавшихся газов в единицу времени.

Пусть в некоторый момент времени поверхность горения порохового заряда будет S (рис. 6) и за единицу времени (например, за миллионную долю секунды) по всей поверхности сгорит слой пороха толщиной Δe *

* Знак Δ в данном случае означает приращение, изменение толщины слоя сгоревшего пороха e или в дальнейшем других величин ($\omega_{сг}$, ψ , z и т. д.).

Тогда количество образовавшихся за единицу времени пороховых газов $\Delta\omega_{\text{сг}}$ определим, умножив плотность пороха δ на объем слоя сгоревшего пороха $S\Delta e$, что можно записать равенством:

$$\Delta\omega_{\text{сг}} = \delta S \Delta e.$$

Перейдем к относительным величинам прихода газов и толщины сгоревшего слоя пороха:

$$\left. \begin{aligned} \Delta\psi &= \frac{\Delta\omega_{\text{сг}}}{\omega} \\ \Delta z &= \frac{\Delta e}{e_1} \end{aligned} \right\}$$

которые удобны тем, что не зависят от величины заряда.

Получим новое равенство:

$$\Delta\psi = S \frac{\delta e_1}{\omega} \Delta z,$$

которое можно выразить словами: относительный приход пороховых газов $\Delta\psi$ пропорционален приросту относительной толщины слоя сгоревшего пороха Δz .

Обозначим начальную поверхность горения пороха через S_1 и введем величину σ :

$$\sigma = \frac{S}{S_1},$$

называемую коэффициентом прогрессивности.

Если при горении пороха поверхность горения не изменяется ($S=S_1$ и $\sigma=1$), то порох называется нейтральным. При убывании поверхности горения (коэффициент прогрессивности меньше единицы) будем иметь дегрессивный, а при ее возрастании — прогрессивный порох.

Нейтральным порохом является порох в виде трубки с бронированными (негорящими) торцами. К нейтральному пороху приближается обычный трубчатый порох. **Дегрессивными** порохами будут пороха в виде шара, куба, пластинки, ленты, бруска, стержня и др. **Прогрессивным** порохом будет, например, трубчатый порох, бронированный с наружной поверхности и горящий только изнутри. Если вместо одного канала в пороховом эле-

менте сделать множество каналов, то можно получить прогрессивный порох без бронирования наружной поверхности.

Известный русский пороходец Г. П. Киснемский предложил прогрессивный порох в форме квадратного бруска с квадратными каналами. Теоретически такой порох должен иметь высокую прогрессивность. Однако на опыте выяснилось, что при горении форма каналов не сохраняется, скругляясь в углах. В результате в конце горения зерно распадается на дегрессивные бруски, вес которых составлял около 10% первоначального веса.

Так же с распадом зерна горит семиканальный порох. Вначале он горит прогрессивно, а после распада зерна на 12 звездок продолжает гореть дегрессивно (более 15% веса). Следовательно, на процесс образования пороховых газов существенно влияет форма пороха.

Вернемся к равенству для относительного прихода газов, введя величину σ и записав его следующим образом:

$$\Delta\psi = \sigma x \Delta z,$$

где $x = \frac{\delta e_1 S_1}{\omega}$.

Учтем, что отношение веса заряда ω к плотности пороха δ равно объему Λ_1 (рис. 6), занимаемому порохом до начала горения.

Тогда окажется, что величина x зависит только от геометрических параметров:

$$x = \frac{e_1 S_1}{\Lambda_1}.$$

Эта величина характеризует форму пороха и поэтому называется **коэффициентом формы**. Численно она равна отношению объема воображаемой пластины толщиной e_1 , построенной на основании с поверхностью S_1 , к действительному объему пороха Λ_1 .

В табл. 6 приведены значения x и еще одного коэффициента формы λ для порохов разных форм.

У нейтрального пороха поверхность горения не изменяется и, следовательно, $\sigma = 1$, $x = 1$ и $\lambda = 0$.

Значит, относительный приход пороховых газов численно будет равен изменению относительной толщины слоя сгоревшего пороха. Скажем, обгорит такой порох

Таблица 6

| № по пор. | Форма пороха | | λ |
|-----------|---|-------|-----------|
| 1 | Куб, шар | 2,50 | -0,60 |
| 2 | Лента | 1,06 | -0,06 |
| 3 | Трубка | 1,007 | -0,007 |
| 4 | Трубка бронированная с наружной поверхности | 0,67 | 0,50 |
| 5 | Семиканальное зерно: | | |
| | — до распада | 1,10 | 0,31 |
| | — после распада | 1,88 | -0,47 |

на десятую часть толщины, в результате образуется ровно десятая часть всех пороховых газов.

Изобразим графически зависимость относительного веса сгоревшего пороха ψ от относительной толщины слоя сгоревшего пороха z .

До начала горения в точке 0 (рис. 7) для всех порохов будем иметь $z = 0$ и $\psi = 0$, а в момент окончания горения в точке $Kz = 1$ и $\psi = 1$. Между точками 0 и K для **нейтрального** пороха зависимость должна изображаться прямой, ибо в любой ее точке приращение Δz и соответствующее приращение $\Delta\psi$, как отмечалось, должны быть равны.

Для **дегрессивных** порохов кривые пойдут выше этой воображаемой* прямой и выпуклостью будут обращены вверх (кривые 1, 2, 3), а для **прогрессивных** порохов кривые пойдут ниже воображаемой прямой и выпуклостью будут обращены вниз (кривая 4). Кривая 5 для семиканального зерна будет комбинированной: первый участок выпуклостью обращен вниз, а второй — вверх.

Зависимость ψ от z называется законом образования пороховых газов. На основании геометрических соображений она для всех порохов, употребляемых в артиллерии, может быть выражена аналитически формулой:

$$\psi = kz(1 + \lambda z).$$

* На рис. 7 кривая 3 практически совпадает с воображаемой прямой OK , а порох в форме трубки практически является нейтральным.

Эта зависимость характеризует изменение прихода газов при горении пороха. Из рис. 7 видно, что в первые моменты горения пороха поступает больше газов от депрессивного ($\Delta\phi$ больше) и меньше от прогрессивного пороха, а в конце горения картина становится обратной.

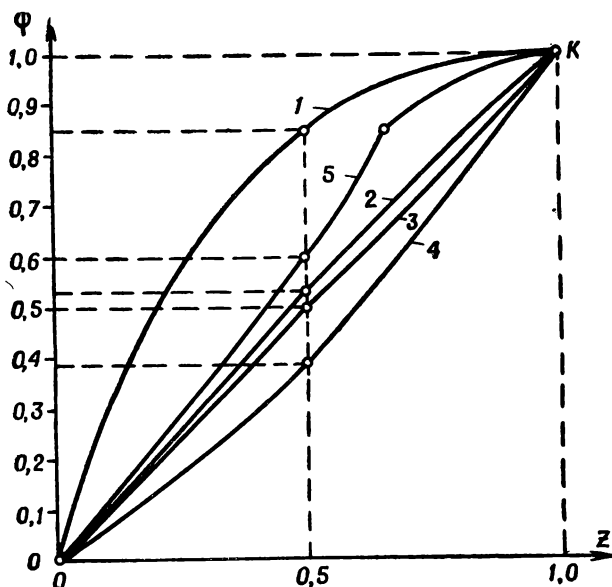


Рис. 7. Графическое изображение закона образования пороховых газов:

1 — куб; шар; 2 — лента; 3 — трубка; 4 — трубка, бронированная с наружной поверхности; 5 — семиканальное зерно

Например, при $z = 0,5$, т. е. при обгорании пороха на половину толщины, образуется пороховых газов: 85% для куба, чуть более 50% для трубки, около 40% для трубки, бронированной с наружной поверхности.

Для орудий более выгодными являются прогрессивные пороха, потому что основная часть газов будет образовываться, когда снаряд пройдет какой-то путь (давление будет меньше).

Пороховые газы совершают работы

При движении снаряда в канале ствола происходят расширение пороховых газов и термодинамический процесс превращения тепла в механическую работу.

Вследствие кратковременности явления выстрела можно полагать, что при расширении газов теплообмен между газами и окружающей средой отсутствует. При этом допущении получается уравнение адиабатического расширения пороховых газов в орудии, называемое **основным уравнением пиродинамики**:

$$\frac{sp(l_{\psi} + l)}{\theta} = \frac{f\omega\psi}{\theta} - \frac{qv^2}{2g}.$$

Основное уравнение пиродинамики выражает собою закон сохранения энергии при выстреле. Оно записано для произвольного момента времени, когда сгорит ψ -я часть заряда, а снаряд пройдет путь l и будет иметь скорость v .

В правой части равенства стоит разность тепловой энергии образовавшихся газов до их расширения (выражена в единицах работы $\kappaГМ$) и механической работы, которую совершат эти газы к рассматриваемому моменту времени.

Если сила пороха f определяет работоспособность $1 \kappaГ$ пороха при изобарном процессе, то произведение $f\omega$ будет выражать работоспособность заряда весом ω , а произведение $f\omega\psi$ — работоспособность сгоревшей части заряда.

При изобарном процессе часть тепла, выделяемого сгоревшим порохом, тратится на поддержание постоянного давления. При адиабатическом процессе все тепло идет на совершение работы. Поэтому для получения величины тепловой энергии в орудии произведение $f\omega\psi$ делят на величину θ , называемую **параметром расширения**. Величина θ численно равна отношению работ расширения газов изобарного и адиабатического процессов. Для пороховых газов в орудии она в среднем равна $0,20$, т. е. работа при изобарном процессе составляет 20% от работы адиабатического процесса.

Основной работой, которую совершают пороховые газы при расширении, является работа, затрачиваемая на сообщение снаряду поступательного движения.

Численно эта работа равна кинетической энергии $\frac{qv^2}{2g}$ поступательного движения снаряда, имеющего вес q (g — величина ускорения силы тяжести).

Кроме основной работы пороховые газы совершают второстепенные работы, учитываемые при изучении движения снаряда:

- на вращение снаряда;
- на преодоление трения между снарядом и каналом ствола;
- на перемещение пороховых газов;
- на движение откатных частей орудия.

Второстепенные работы составляют некоторую часть от основной работы и могут быть выражены с помощью коэффициента учета второстепенных работ ϕ . Величина ϕ показывает, на сколько следует увеличить основную работу, чтобы учесть второстепенные работы. Поэтому, умножая кинетическую энергию снаряда на коэффициент ϕ , мы получим величину $\frac{\phi qv^2}{2g}$, равную сумме всех учитываемых при изучении движения снаряда работ.

В табл. 7 приведены данные, характеризующие второстепенные работы для пушек и гаубиц.

Таблица 7

| Орудие | Второстепенные работы в % от основной | | | | Коэффициент учета второстепенных работ, ϕ |
|----------------|---------------------------------------|------------------------|-----------------------------|-------|--|
| | вращение снаряда | преодоление сил трения | перемещение пороховых газов | откат | |
| 100-мм пушка | 0,6 | 1,2 | 11,2 | 1,9 | 1,15 |
| 152-мм гаубица | 1,4 | 1,3 | 3,0 | 2,6 | 1,08 |

Из таблицы видно, что второстепенные работы составляют от основной работы 15% для пушки ($\phi=1,15$) и 8% для гаубицы ($\phi=1,08$). Наибольшей из второстепенных работ является работа, затрачиваемая на перемещение продуктов горения — пороховых газов и несгоревшего пороха. Для уменьшения этой работы за рубе-

жом стремятся создать специальные установки, называемые легкогазовыми пушками, в которых снаряд перемещается не пороховыми газами, а легкими газами (водородом или гелием), сжимаемыми при выстреле поршнем с помощью пороховых газов.

В левой части основного уравнения пиродинамики в соответствии с законом сохранения энергии должна быть тепловая энергия образовавшихся пороховых газов после их расширения, выраженная в единицах работы.

Численно она равна работе изобарного процесса расширения газов от объема, эквивалентного объему молекул, до объема, занимаемого газами, $sp(l_\phi + l)$, деленной на параметр расширения θ . Переменная величина l_ϕ называется **приведенной длиной свободного объема камеры**. При умножении l_ϕ на площадь поперечного сечения канала ствола s получается свободный объем камеры, т. е. объем за вычетом объема несгоревшего пороха и объема, эквивалентного объему молекул пороховых газов. Произведение $s(l_\phi + l)$ равно разности снарядного объема, занимаемого пороховыми газами, и объема, эквивалентного объему молекул.

Основное уравнение пиродинамики используется для определения величины давления пороховых газов в орудии.

Движение снаряда в орудии

Поступательное движение снаряда в орудии совершается по закону механики для прямолинейного ускоренного движения материальной точки. Произведение массы снаряда на его **ускорение** j должно равняться сумме всех сил, действующих на снаряд по оси ствола.

Поступательное движение снаряда относительно орудия в упрощенном виде можно описать следующим уравнением:

$$\frac{\varphi q}{g} j = sp.$$

Упрощения относятся прежде всего к учету действующих на снаряд сил. Движущей силой является сила давления пороховых газов на дно снаряда, равная произведению давления $p_{сн}$ на площадь поперечного сечения канала ствола. В уравнении же вместо $p_{сн}$ исполь-

зуются среднее баллистическое давление p , которое, как отмечалось раньше, немного больше $p_{сн}$.

Кроме того, в правой части уравнения отсутствует сила сопротивления движению снаряда (вследствие трения ведущего пояска о поверхность канала ствола и давления на ведущий поясок со стороны нарезов), что также приведет к завышению правой части.

Поскольку мы изучаем относительное движение снаряда, то в правой части следовало бы еще записать силу инерции от ускоренного движения откатных частей орудия.

Для нарезного орудия с цилиндрическим каналом ствола оказалось возможным отмеченные обстоятельства учесть с помощью коэффициента учета второстепенных работ φ , введенного в левую часть в качестве множителя. Из уравнения поступательного движения снаряда вытекают новая трактовка величины φ и смысл другого его названия «коэффициент фиктивности».

Путем увеличения действительного веса снаряда и введения фиктивного веса снаряда, равного φq , задача об относительном движении снаряда в стволе по формулировке сводится к задаче об абсолютном прямолинейном движении свободного тела: произведение массы (фиктивной) на ускорение равно движущей силе.

Уравнение поступательного движения показывает, что ускорение снаряда j пропорционально давлению пороховых газов и изменяется при движении снаряда так же, как давление, проходя через максимум. Ускорение снаряда j уменьшается при увеличении веса снаряда и при уменьшении площади поперечного сечения канала ствола.

При изменении калибра орудия вес снаряда изменяется пропорционально кубу, а площадь сечения — пропорционально квадрату калибра. Поэтому ускорение снаряда в орудиях большого калибра при одинаковом давлении пороховых газов будет меньше, чем в орудиях малого калибра, а время движения снаряда для достижения одной и той же скорости будет больше.

Истечение пороховых газов

После вылета снаряда из канала ствола орудия, а в минометах и в безоткатных орудиях во время движения снаряда происходит истечение пороховых газов.

Основной характеристикой процесса истечения является **расход пороховых газов**, т. е. количество газов, вытекших из канала ствола в единицу времени. Очевидно, от расхода пороховых газов будет зависеть величина давления пороховых газов, а следовательно, и сила давления, действующая на снаряд и на ствол.

Расход пороховых газов пропорционален давлению и площади отверстия, через которое вытекают газы. После вылета снаряда основная масса пороховых газов покидает канал ствола через дульный срез за сотые доли секунды, которыми измеряется длительность периода последствия пороховых газов на орудие. Небольшие количества пороховых газов на некоторое время остаются в канале ствола и при открывании затвора могут выноситься назад.

В минометах при выстреле через кольцевой зазор между миной и поверхностью канала ствола вытекает до 10% пороховых газов. В безоткатных орудиях для уравнивания давления в канале ствола до 75% пороховых газов вытекает через сопло затвора назад. Чтобы получить такую же скорость снаряда, как и в обычном орудии, необходимо в несколько раз увеличивать вес порохового заряда таких орудий.

ПАРАМЕТРЫ ВНУТРЕННЕЙ БАЛЛИСТИКИ

Роль параметров

Параметрами внутренней баллистики являются физические величины, характеризующие те или иные свойства артиллерийской системы и оказывающие влияние на движение снаряда в канале ствола орудия.

Например, параметрами внутренней баллистики будут **вес снаряда** и **сила пороха**, так как первая величина входит непосредственно в **уравнение поступательного движения снаряда**, а вторая величина — в **основное уравнение пиродинамики**, которое ее связывает с величиной давления пороховых газов, входящей также в уравнение поступательного движения.

Во внутренней баллистике движение снаряда полностью характеризуется с помощью пиродинамических кривых. Следовательно, совокупность параметров внутренней баллистики будет определять пиродинамические кривые или отдельные их элементы.

Для примера обратимся к человеческому организму, в котором протекают весьма сложные и тонкие биологические, химические и физические процессы. Внешним проявлением этих процессов является, в частности, выполняемая человеком механическая работа. Количество работы, которую человек может выполнить (например, число подтягиваний на перекладине), зависит от многих факторов, выражаемых определенными параметрами. К таким параметрам можно отнести объем некоторых групп мышц (бицепсы, мышцы спины), общий вес тела, объем легких. Как бы ни хотел человек, он не может выполнить работу, заметно превышающую некоторый предел, для него существующий.

Путем тренировок можно увеличить работоспособность, воздействуя соответствующим образом на пара-

метры, от которых она зависит: в нашем примере — укрепляя бицепсы, освобождаясь от излишнего веса тела, увеличивая объем легких и т. п.

Для сравнения работоспособности разных людей удобно пользоваться относительными параметрами, в данном случае величиной объема бицепсов, отнесенного к весу тела.

Аналогичную роль играют параметры внутренней баллистики. В результате протекания сложных процессов в канале ствола орудия при выстреле снаряд получает некоторую начальную скорость, которая будет зависеть от параметров внутренней баллистики; изменить величину начальной скорости можно только путем изменения одного или нескольких из этих параметров; если же начальная скорость изменилась, то можно утверждать, что произошло изменение одного или нескольких параметров внутренней баллистики.

Отсюда следует, что, зная параметры внутренней баллистики и характер их влияния, можно сознательно воздействовать на движение снаряда или объяснить особенности, отмеченные в движении снаряда, что очень важно для артиллерийской практики.

Параметры внутренней баллистики выявляются в ходе изучения процессов явления выстрела, как было это продемонстрировано в предыдущей главе. Они входят в математические зависимости, описывающие рассмотренные процессы. Если собрать вместе зависимости и дополнить их необходимыми определяющими соотношениями, то в результате получится система уравнений внутренней баллистики, связывающая между собой пиродинамические элементы и параметры внутренней баллистики.

Решение системы уравнений внутренней баллистики заключается в нахождении зависимостей всех пиродинамических элементов, кроме одного, принятого за аргумент, от этого последнего элемента. Зависимости могут быть получены в виде формул, чисел или числовых таблиц. Соответствующие методы решения называются **аналитическими, численными или табличными.**

Для решения системы уравнений внутренней баллистики необходимо задать так называемые **начальные**

условия, т. е. начальные значения пиродинамических элементов. Обычно считают, что в момент начала движения снаряда путь и скорость снаряда равны нулю, а давление пороховых газов равно некоторой величине, называемой давлением форсирования.

Будем для определенности считать, что в качестве аргумента принята величина пути снаряда в канале ствола орудия. Тогда значения остальных основных пиродинамических элементов — времени движения, скорости снаряда и давления пороховых газов будут зависеть от величины пути и параметров, входящих в систему уравнений внутренней баллистики.

Знакомство с параметрами

Параметры внутренней баллистики можно разделить на две группы: конструктивные параметры и параметры заряжения артиллерийской системы.

К конструктивным параметрам относятся:

- калибр орудия d ;
- площадь поперечного сечения канала ствола s ;
- объем каморы W_0 ;
- длина каморы $l_{\text{КАМ}}$;
- полная длина пути снаряда $l_{\text{Д}}$;
- длина канала ствола $L_{\text{КН}} = l_{\text{Д}} + l_{\text{КАМ}}$;
- длина ствола $L_{\text{СТВ}} = L_{\text{КН}} + (1 \div 2)d$;
- объем канала ствола $W_{\text{КН}}$.

К параметрам заряжения относятся:

- вес снаряда q ;
- вес порохового заряда ω ;
- плотность пороха δ ;
- сила пороха f ;
- коволум пороховых газов α ;
- параметр расширения θ ;
- конечный импульс давления пороховых газов $I_{\text{К}}$;
- коэффициент скорости горения пороха u_1 ;
- толщина горящего свода порохового элемента $2e_1$;
- коэффициент фиктивности φ ;
- плотность заряжения Δ ;
- давление форсирования p_0 .

Отметим, что одни параметры являются простыми, а другие — сложными, т. е. зависящими в свою очередь от нескольких простых параметров. К простым параметрам относятся: d , W_0 , l_d , q , ω , δ , f , α , θ , u_1 , $2e_1$. Остальные из перечисленных параметров являются сложными.

Каждый параметр внутренней баллистики имеет четкий физический смысл и определяется опытным или расчетным путем. От того, с какой точностью будут известны параметры, будет зависеть точность решения задач внутренней баллистики.

Дадим необходимые пояснения конструктивным параметрам.

Калибр орудия равен диаметру канала ствола по полям нарезов.

Площадь поперечного сечения канала ствола пропорциональна квадрату калибра. Она включает площадь сечения нарезов и поэтому зависит от числа и размеров нарезов.

Объемом каморы называется объем заснарядного пространства в момент начала движения. При патронном зарядании за объем каморы принимают внутренний объем гильзы, спатронированной со снарядом. При раздельном зарядании за объем каморы принимают объем заснарядного пространства при досланном до упора в соединительный конус снаряде.

Длина каморы равна расстоянию от дна канала ствола до дна снаряда в момент начала движения. Практически длину каморы можно измерить линейкой от дна досланного снаряда до казенного среза ствола. Необходимо отличать действительную длину каморы от условной длины каморы, которая измеряется с помощью прибора замера каморы (ПЗК). Условная длина будет больше приблизительно на расстояние от передней кромки ведущего пояска до дна снаряда.

Полная длина пути снаряда равна расстоянию от дна снаряда до дульного среза ствола (без дульного тормоза) в момент начала движения.

Длина ствола отличается от длины канала ствола приблизительно на длину затвора ($1 \div 2 d$).

Из параметров зарядания требуют пояснения сложные параметры Δ , I_K , ϕ и особенно ρ_0 .

Плотность заряжения орудия Δ определяется путем деления величины веса заряда в $\kappa\Gamma$ на величину объема камеры в дм^3 (т. е. в литрах) и характеризует степень заполнения камеры порохом.

Конечный импульс I_K давления пороховых газов может быть представлен как частное от деления половины толщины горящего свода на коэффициент скорости горения пороха. Этот параметр является характеристикой пороха и зависит только от толщины горящего свода, сорта и температуры пороха.

Коэффициент фиктивности φ в основном зависит от величины $\frac{\omega}{q}$, называемой относительным весом заряда, и может быть вычислен по формуле профессора В. Е. Слухоцкого ($K = 1,03 \div 1,06$):

$$\varphi = K + \frac{1}{3} \cdot \frac{\omega}{q}.$$

Внимание давлению форсирования

Давление форсирования требует более подробного объяснения. Как было отмечено выше, это единственный параметр внутренней баллистики, который входит не в систему уравнений, а в начальные условия.

С помощью давления форсирования во внутренней баллистике приближенно учитывается процесс врезания ведущих поясков снаряда в нарезы, т. е. учитываются особенности начального периода движения снаряда — периода форсирования.

Обратимся к графикам 1, 2, 3 (рис. 8). К моменту начала движения снаряда ($l = 0$) сгорит некоторая часть заряда, а давление пороховых газов достигнет величины p_H , необходимой для начала пластических деформаций ведущего пояска или дульца гильзы, в котором крепится снаряд при патронном заряжении. При выходе из дульца гильзы и особенно при врезании ведущих поясков в нарезы снаряд будет испытывать сопротивление, называемое **сопротивлением врезанию**.

Действительная (опытная) кривая давления пороховых газов изображена сплошной линией 1. Как видим, на участке форсирования $0l_{\phi}$ давление пороховых газов

растет интенсивнее, чем за его пределами, что объясняется действием на этом участке сопротивления врезанию, тормозящим снаряд.

Если при расчете движения снаряда сопротивление врезанию не учитывать, то получим теоретическую кривую 2, не совпадающую с действительной кривой, так как движение снаряда на участке форсирования в этом случае будет проходить быстрее.

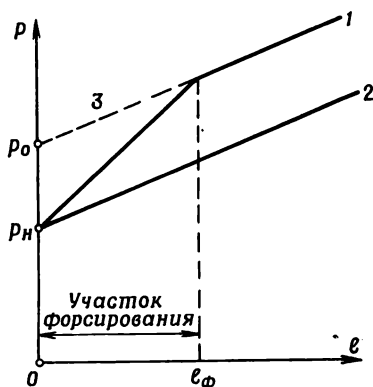


Рис. 8. Кривая давления на участке форсирования:

1 — действительная кривая; 2 — расчетная кривая без учета врезания ведущих поясков; 3 — расчетная кривая с учетом врезания ведущих поясков

Чтобы не учитывать в явном виде сложный процесс врезания ведущих поясков в нарезы и вместе с этим получить расчетные пиродинамические кривые, близкие к действительным (опытным), поступают следующим образом. Действительную кривую 1 (за пределами участка форсирования, где нет сопротивления врезанию) распространяют на участок форсирования или, как говорят в математике, экстраполируют (продолжают) к началу координат. Соответствующий участок кривой изображен пунктирной линией 3, которая пересекает ось ординат в точке с давлением p_0 , называемым **давлением форсирования**.

Если в момент начала движения вместо действитель-

ной величины давления p_H принять величину давления форсирования p_0 и вести расчет пиродинамических кривых без учета процесса врезания ведущих поясков в нарезы, то получим приблизительное совпадение расчетных и действительных пиродинамических кривых. Расхождение будет лишь на начальном участке движения небольшой длины — участке форсирования.

В чем же заключается смысл величины давления форсирования? Давление форсирования является параметром внутренней баллистики, учитывающим неявным образом процесс врезания; это такое фиктивное (т. е. нереальное) давление пороховых газов в момент начала движения снаряда, при котором пиродинамические кривые, полученные без рассмотрения периода форсирования, будут приближаться к действительным пиродинамическим кривым.

Профессор **Н. Ф. Дроздов** предложил для орудий принимать величину давления форсирования, равной 300 кг/см^2 .

Дальнейшие исследования показали, что величина давления форсирования изменяется в широких пределах: от 10 кг/см^2 до 1000 кг/см^2 . Она зависит, во-первых, от параметров, характеризующих движение снаряда на участке форсирования, т. е. от устройства ведущих поясков снаряда и начального участка канала ствола, а во-вторых, от параметров заряжания (плотности заряжания, веса снаряда, толщины горящего свода пороховых элементов). Например, для 122-мм гаубицы обр. 1938 г. на полном заряде в новом стволе величина давления форсирования равна 379 кг/см^2 , а на шестом заряде — 307 кг/см^2 .

При эксплуатации орудия и боеприпасов состояние (размеры, форма, чистота поверхности) ведущих поясков снаряда и нарезной части канала ствола может изменяться при износе, разогреве, нанесении смазок и т. п. Все это влияет на величину давления форсирования и через нее на дульную скорость снаряда и наибольшее давление пороховых газов. В частности, изменение величины давления форсирования при износе канала ствола является одной из причин, а при патронном заряжании практически единственной причиной изменения начальной скорости снаряда.

Пределы изменения параметров

Для определения пиродинамических элементов в произвольной точке необходимо задать значение аргумента и следующие параметры внутренней баллистики: давление форсирования p_0 , характеристики пороха f , α , δ , θ , κ , I_K и данные об оружии, снаряде и заряде s , W_0 , q , ω .

Пиродинамические элементы в момент достижения наибольшего давления пороховых газов и в момент окончания горения заряда будут определяться только значениями перечисленных выше параметров, а в дульном срезе еще и значением полного пути снаряда l_D .

Таким образом, при принятых во внутренней баллистике допущениях величина наибольшего давления пороховых газов зависит от 11 параметров, а величина дульной скорости дополнительно от параметра l_D .

Все параметры, кроме δ и θ , могут изменяться в довольно широких пределах. Параметры p_0 , f , α , δ , θ , κ непосредственно не зависят от калибра орудия. Остальные параметры s , W_0 , q , ω , l_D , I_K существенно зависят от калибра орудия. Причем параметр I_K изменяется вследствие зависимости от калибра орудия толщины горящего свода порохового элемента $2e_1$. Чтобы получить мало изменяющиеся характеристики таких параметров, их относят к калибру или квадрату калибра d^2 , или к кубу калибра d^3 .

В табл. 8 даны пределы изменения и относительные характеристики параметров.

Таблица 8

| Параметр | Размерность параметра | Калибр, мм | | Относительная характеристика параметра | Калибр, мм | |
|----------|-----------------------|------------|-------|--|------------|-------|
| | | 7,62 | 203 | | 7,62 | 203 |
| $2e_1$ | мм | 0,20 | 1,70 | $2e_1:d$ | 0,026 | 0,008 |
| l_D | дм | 3,68 | 41,65 | $l_D:d$ | 48,2 | 20,5 |
| I_K | кг·сек/дм | 250 | 1340 | $I_K:d$ | 3280 | 660 |
| s | дм ² | 0,0048 | 3,32 | $s:d^2$ | 0,827 | 0,807 |
| W_0 | дм ³ | 0,0019 | 27,8 | $W_0:d^3$ | 4,29 | 3,32 |
| q | кг | 0,0079 | 100 | $q:d^3$ | 17,8 | 12,0 |
| ω | кг | 0,0016 | 15,0 | $\omega:d^3$ | 3,61 | 1,79 |

Из таблицы видно, что относительные характеристики отличаются у орудий различного калибра сравнительно мало. Например, относительный вес 7,62-мм пули ($17,8 \text{ кг/дм}^3$) и 203-мм снаряда ($12,0 \text{ кг/дм}^3$) имеет один порядок величин.

Подобие артиллерийских систем

В артиллерийской практике встречаются задачи, в которых требуется найти параметры одной артиллерийской системы по известным параметрам другой. Например, при создании новой артиллерийской системы из ряда существующих систем выбирают одну или несколько наиболее удачных, обладающих хорошими боевыми и экономическими показателями. Естественным бывает желание перенести хорошие качества существующих систем на проектируемую.

Это можно сделать в определенной степени с помощью теории баллистического подобия, которая дает параметры проектируемой системы, подобной в баллистическом отношении существующей системе. При этом баллистически подобными артиллерийскими системами называются системы, имеющие геометрически подобные пиродинамические кривые. В свою очередь геометрически подобными кривыми называются такие кривые, которые могут быть совмещены одна с другой с помощью лишь изменения масштабов.

Наиболее полно теория баллистического подобия разработана в трудах профессора **Б. Н. Окунева**.

В самом простом частном случае подобия артиллерийских систем, у которых сохраняются неизменными дульная скорость, наибольшее давление, плотность заряжания, вес заряда (отнесенный к весу снаряда) и сорт пороха, а стволы геометрически подобны, между параметрами систем имеют место следующие соотношения:

а) линейные размеры ствола, толщины горящего свода пороха, конечные импульсы давления, времена движения снаряда относятся так же, как относятся калибры орудий;

б) вес снаряда, вес заряда, объемы камер относятся так же, как относятся кубы калибров.

Приведенные соотношения бывают полезными для приближенной оценки параметров системы одного ка-

либра на основании известных параметров системы другого калибра того же назначения.

Пример. Пусть известны параметры 122-мм гаубицы обр. 1938 г.:

$$\begin{aligned}d &= 122 \text{ мм}; & t_{\text{Д}} &= 0,01 \text{ сек}; \\L_{\text{СТВ}} &= 2,80 \text{ м}; & q &= 21,76 \text{ кг}; \\2e_1 &= 1,05 \text{ мм}; & \omega &= 2,08 \text{ кг}; \\I_{\text{К}} &= 900 \text{ кг}\cdot\text{сек}/\text{дм}^2; & W_{\text{О}} &= 3,6 \text{ дм}^3.\end{aligned}$$

Требуется найти те же параметры для 203-мм гаубицы.

Решение: 1. Находим отношение калибров орудий, которое будет равно 1,66, и отношение кубов калибров, которое будет равно 4,60.

2. Умножая величины $L_{\text{СТВ}}$, $2e_1$, $I_{\text{К}}$, $t_{\text{Д}}$ на первый коэффициент, а величины q , ω , $W_{\text{О}}$ — на второй, получим искомые параметры:

$$\begin{aligned}d &= 203 \text{ мм}; & t_{\text{Д}} &= 0,0166 \text{ сек}; \\L_{\text{СТВ}} &= 4,65 \text{ м}; & q &= 100 \text{ кг}; \\2e_1 &= 1,74 \text{ мм}; & \omega &= 9,57 \text{ кг}; \\I_{\text{К}} &= 1494 \text{ кг}\cdot\text{сек}/\text{дм}^2; & W_{\text{О}} &= 16,56 \text{ дм}^3.\end{aligned}$$

Эти значения довольно близки к действительным значениям параметров 203-мм гаубицы обр. 1931 г.

ГЛАВА 5

ОТ ЧЕГО ЗАВИСИТ НАЧАЛЬНАЯ СКОРОСТЬ СНАРЯДА?

О начальной скорости снаряда

Для артиллериста начальная скорость снаряда является едва ли не главной величиной из всех величин, рассматриваемых во внутренней баллистике.

И действительно, от этой величины зависит наибольшая дальность стрельбы, дальность прямого выстрела *, время движения снаряда до цели, ударное действие снаряда по броне и по сооружениям и другие показатели.

Вот почему необходимо внимательно отнестись к самому понятию начальной скорости, к способам ее определения, к тому, как изменяется начальная скорость при изменении параметров внутренней баллистики и при изменении условий стрельбы.

Внутренняя баллистика изучает движение снаряда относительно ствола и имеет дело с относительной скоростью снаряда. Ствол вместе со снарядом в свою очередь перемещается назад со скоростью отката, величина которой в момент вылета снаряда достигает $2 \div 5$ м/сек. Очевидно, скорость снаряда относительно Земли, т. е. в абсолютном движении, будет в момент вылета меньше дульной скорости снаряда на величину скорости отката ствола в тот же момент времени.

Внешняя баллистика, изучающая движение снаряда относительно Земли, имеет дело с абсолютной скоростью снаряда, которая после вылета снаряда из канала ствола изменяется определенным образом.

Действительное изменение скорости изображается кривой I (рис. 9). На участке последствия $0l_{\text{пд}}$ за

* Под дальностью прямого выстрела понимают наибольшую дальность стрельбы прямой наводкой по видимым целям (танкам, оборонительным сооружениям), при которой высота траектории снаряда не превосходит высоты цели.

дульным срезом орудия пороховые газы, истекающие из канала ствола, продолжают оказывать действие на снаряд. Вначале они будут обгонять снаряд, создавая заметную силу давления на дно снаряда и сообщая снаряду дополнительную скорость. В некоторой точке траектории скорость газовой струи сравнивается со скоростью

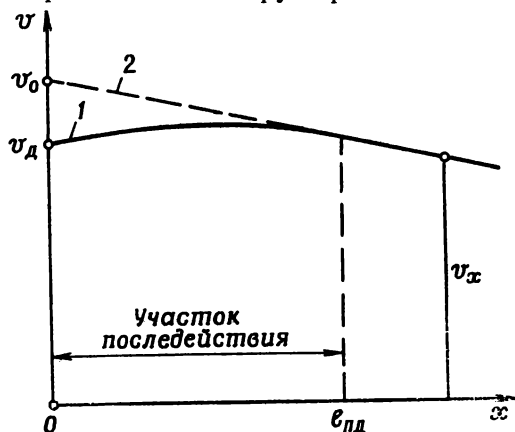


Рис. 9. Изменение скорости снаряда за дульным срезом:
1 — действительное; 2 — теоретическое

снаряда, а последняя достигнет максимальной величины. Приращение скорости снаряда на рассматриваемом участке обычно не превышает нескольких метров в секунду.

Далее снаряд начнет покидать газовую струю, опережая пороховые газы. При этом со стороны газов на снаряд будет действовать возрастающая сила сопротивления, приводящая к потере скорости снаряда относительно Земли. В момент окончания периода последействия пороховых газов на снаряд последний покинет газовую струю и дальнейшее его движение будет проходить в воздушной среде.

Период последействия пороховых газов на снаряд длится тысячные доли секунды, за которые снаряд успевает проделать путь, равный нескольким метрам. Действие же газовой струи на предметы, находящиеся перед дульным срезом орудия, простирается на расстояния, во много раз большие и достигающие нескольких десятков метров.

На таком или большем расстоянии от орудия и производят измерение скорости снаряда v_x (рис. 9), по величине которой затем рассчитывают начальную скорость v_0 .

При этом предполагают, что период последействия отсутствует и с момента вылета снаряда из ствола его скорость (вследствие сопротивления воздуха) непрерывно уменьшается. Иными словами, мы экстраполируем действительную кривую 1 (рис. 9) скорости снаряда за пределы участка последействия к началу координат (точке вылета) и получаем на участке последействия теоретическую кривую 2, которая пересечет ось ординат в точке, соответствующей начальной скорости v_0 . Тем самым производится неявный учет периода последействия. Понятие начальной скорости в этом смысле аналогично понятию давления форсирования.

Начальной скоростью артиллерийского снаряда называется такая фиктивная скорость, которую снаряд должен был бы иметь в точке вылета с тем, чтобы при допущении отсутствия периода последействия его скорость за пределами участка последействия была равна действительной скорости. Величина начальной скорости на $1 \div 2\%$ больше величины дульной скорости.

Хотя в действительности снаряд не будет иметь такой величины скорости, однако именно начальную скорость необходимо использовать для расчета траектории снаряда, поскольку во внешней баллистике период последействия пороховых газов не рассматривается.

Может показаться, что существует своеобразный разрыв между внутренней и внешней баллистикой. В действительности такого разрыва не существует, поскольку при решении практических задач во внутренней баллистике вместо дульной скорости используют начальную скорость, величина которой определяется стрельбой и обеспечивается подбором веса порохового заряда, о чем будет рассказано в следующей главе.

Измерение скорости снаряда

Существует множество методов измерения начальной скорости снаряда.

Скорость снаряда можно измерить на опыте в некоторой точке траектории или как среднюю величину на некотором участке траектории. В последнем случае величину скорости относят к середине участка.

Скорость снаряда в одной точке измеряется с помощью прибора, называемого **баллистическим маятником**. Баллистический маятник представляет собой подвешенный шарнирно массивный стальной приемник пуль

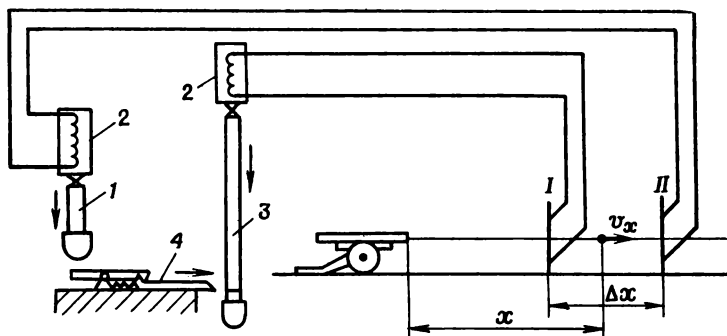


Рис. 10. Измерение скорости снаряда:

1 — стержень-отмечатель; 2 — электромагниты; 3 — стержень-хронометр;
4 — нож; I и II — блокирующие устройства (рамы-мишени)

или снарядов. При попадании в приемник снаряд задерживается там, а за счет его кинетической энергии маятник отклоняется на некоторый угол, по величине которого можно судить о величине скорости снаряда.

Баллистический маятник является самым старым прибором для определения скорости снарядов — появление его относится к середине 18 века.

Средняя скорость v_x (рис. 10) снаряда определяется на расстоянии x от дульного среза орудия по измеренному времени полета снаряда на участке Δx , длина которого известна. Поэтому приборы, измеряющие среднюю скорость снаряда, называются **хронографами**, т. е. регистраторами времени.

Выбранный участок траектории ограничивается блокирующими устройствами I и II, позволяющими фиксировать моменты прохождения снаряда в начальной и конечной точках этого участка. В качестве блокирующих

устройств могут использоваться рамы-мишени, соленоиды, радиолучи, световые лучи и т. п.

Рамы-мишени представляют собой деревянные рамы, на которые наматывается параллельными рядами тонкая медная проволока диаметром $0,20 \div 0,25$ мм (мишюра), являющаяся частью замкнутой электрической цепи. Снаряд, пролетая через рамы-мишени, разрывает проволоку и, следовательно, электрическую цепь, что фиксируется хронографом.

Соленоиды представляют собой многовитковые плоские катушки, в которых при прохождении через них намагниченного снаряда возникают электрические импульсы, поступающие на хронограф.

Радиолуч представляет собой узконаправленный радиосигнал ультравысокой частоты, направленный на летящий снаряд радиолокационной станцией. При встрече со снарядом возникает отраженный сигнал, который улавливается станцией и после преобразования передается на хронограф.

Современные хронографы можно разбить на две основные группы: электромеханические и электронные.

Одним из первых хронографов был электромеханический хронограф известного русского артиллериста и создателя ракет **К. И. Константинова**, разработанный в 1842 г.

Наиболее широкое применение в артиллерийской практике получил **электромеханический хронограф Ле-Буланже**. Основными элементами хронографа являются два электромагнита 2 (рис. 10), один из которых включен в электрическую цепь рамы-мишени I и удерживает стальной стержень-хронометр 3, а второй включен в электрическую цепь рамы-мишени II и удерживает стержень-отметчатель 1. Кроме того, хронограф для нанесения отметок на хронометре имеет устройство, основной частью которого является подпружиненный нож 4.

Перед стрельбой с помощью ножа на хронометре делается первая отметка. При стрельбе в момент разрыва цепи первой рамы-мишени I начинает падать хронометр 3, а в момент разрыва цепи второй рамы-мишени II начинает падать отметчатель 1, который освобождает нож 4, в результате чего на хронометре делается вторая отметка. По величине пути свободно падающего

хронометра (т. е. по расстоянию между отметками) можно вычислить время прохождения снарядом блокированного участка траектории.

В электронных хронографах промежутки времени между импульсами определяется по числу электрических колебаний строго определенной частоты, вырабатываемых генератором колебаний. При использовании для блокирования радиолокационной станции, работающей на принципе Доплера, в ней вырабатывается доплеровский сигнал, частота которого пропорциональна скорости снаряда. Поэтому одному и тому же числу полных колебаний доплеровского сигнала будет отвечать одна и та же длина участка траектории при любой скорости полета снаряда. В таких хронографах измеряется промежуток времени, отвечающий заданному числу полных колебаний доплеровского сигнала.

Итак, мы узнали, как измеряется на опыте скорость снаряда вблизи от орудия и, следовательно, как определяется начальная скорость снаряда.

Влияние параметров

Начальная скорость снаряда зависит от тех же самых параметров, что и дульная скорость. Она не зависит практически* от расстояния между орудием и точкой траектории, в которой измеряется.

С достаточной для практики точностью можно считать, что относительное изменение начальной скорости (т. е. изменение, отнесенное к самой величине скорости и выраженное, например, в процентах) равно относительному изменению дульной скорости. Вот почему дальше, говоря о начальной скорости, мы будем рассматривать дульную скорость.

В предыдущей главе было установлено, что дульная скорость снаряда зависит от 12 параметров: $s, \kappa, \theta, \delta, \omega, q, W_0, I_{\kappa}, f, a, \rho_0, l_d$.

Для данного орудия влияние изменения четырех первых параметров на начальную скорость в настоящее

* В действительности некоторая зависимость начальной скорости от расстояния до точки траектории, в которой измеряется скорость снаряда, существует ввиду того, что переход от измеренной к начальной скорости делается без учета колебательного движения снаряда.

время на практике не учитывается, а влияние изменения остальных параметров учитывается с помощью поправочных коэффициентов внутренней баллистики.

Поправочным коэффициентом называется величина, численно равная изменению начальной скорости (в процентах) при изменении рассматриваемого параметра на один процент. Знак величины поправочного коэффициента указывает на то, в каком направлении изменяется начальная скорость: при знаке «—» с ростом параметра скорость убывает, а при знаке «+» — увеличивается.

Сами поправочные коэффициенты зависят от тех же параметров, что и начальная скорость. В основном они будут зависеть от плотности заряжания, наибольшего давления пороховых газов и относительного пути снаряда $\Delta_d = \frac{l_d}{l_0}$.

Существуют таблицы поправочных коэффициентов внутренней баллистики, по которым можно найти поправочные коэффициенты для конкретного орудия.

В табл. 9 приводятся величины поправочных коэффициентов для 122-мм гаубицы обр. 1938 г. при стрельбе на полном заряде.

Таблица 9

| № по пор. | Наименование изменяемого параметра | Обозначение | Величина поправочного коэффициента |
|-----------|------------------------------------|-------------|------------------------------------|
| 1 | Вес заряда | ω | 0,75 |
| 2 | Вес снаряда | q | -0,32 |
| 3 | Объем камеры | W_0 | -0,29 |
| 4 | Конечный импульс давления | I_K | -0,33 |
| 5 | Сила пороха | f | 0,63 |
| 6 | Коволюм пороховых газов | α | 0,11 |
| 7 | Давление форсирования | p_0 | 0,03 |
| 8 | Полная длина пути снаряда | l_d | 0,18 |
| 9 | Калорийность пороха | Q_W | 0,81 |
| 10 | Температура заряда | t_3 | 0,08 |

Кроме поправочных коэффициентов для восьми известных параметров в табл. 9 помещены два дополнительных коэффициента, характеризующих влияние на начальную скорость калорийности пороха Q_W и температуры заряда t_3 .

Необходимо обратить внимание на то обстоятельство, что во внутренней баллистике непосредственная связь между начальной скоростью и двумя указанными параметрами отсутствует. Следовательно, влияние этих параметров на начальную скорость происходит косвенно, т. е. через другие параметры. В данном случае при изменении калорийности пороха одновременно изменяются сила пороха, коволюм пороховых газов и скорость горения пороха (конечный импульс давления), а при изменении температуры заряда — сила пороха и скорость горения пороха (конечный импульс давления).

В процессе эксплуатации орудия могут изменяться условия стрельбы (например: температура ствола, смазка ствола, усилие досылки снаряда и т. п.). Во всех этих случаях может изменяться начальная скорость снаряда.

Чтобы понять, каким образом при этом изменится скорость, надо найти связь между изменениями условий стрельбы и тех или иных параметров, связанных с начальной скоростью явным образом. Особенно часто изменение условий стрельбы сказывается через изменение давления форсирования.

Из табл. 9 следует:

— начальная скорость снаряда растет с увеличением всех рассмотренных параметров, кроме веса снаряда, объема камеры и конечного импульса давления (или толщины горящего свода пороха); с увеличением параметров q , W_0 , I_K начальная скорость снаряда уменьшается;

— наиболее сильно на начальной скорости сказывается изменение веса заряда, силы и калорийности пороха, а менее всего — изменение коволюма пороховых газов, давления форсирования и температуры заряда (на 1°C).

Значения поправочных коэффициентов характеризуют **чувствительность** начальной скорости к изменению параметров внутренней баллистики.

Для того чтобы определить, на сколько изменится начальная скорость при изменении параметра, нужно сначала узнать величину изменения самого параметра (в процентах), а затем умножить значение соответствующего поправочного коэффициента на изменение параметра.

Пусть вес снаряда изменился на два весовых знака, т. е. на $\frac{4}{3}\%$, начальная скорость при этом изменится на $0,32 \cdot \frac{4}{3} = 0,43\%$. При изменении температуры заряда на 20°C по отношению к табличной температуре, равной $+15^\circ\text{C}$, начальная скорость изменится на $0,08 \cdot 20 = 1,6\%$.

Очевидно, если параметр изменяется существенно, то даже при относительно малой чувствительности начальная скорость может изменяться также существенно. Сказанное, например, относится к давлению форсирования, величина которого при износе канала ствола в процессе эксплуатации орудия может изменяться до 100% .

В случае если изменяются одновременно несколько параметров, да еще в разных направлениях, без расчетов нельзя сказать, каким образом изменится величина начальной скорости. Можно, например, подобрать такие изменения двух или более параметров, что начальная скорость останется неизменной. Именно так поступают при подборе веса порохового заряда из валовых партий пороха.

Учет износа канала ствола

Рассмотрим влияние на начальную скорость износа канала ствола. Износ канала ствола при стрельбе заключается в комплексном механическом, тепловом, газодинамическом и химическом воздействиях снаряда и пороховых газов на поверхностный слой металла, в результате которых диаметр канала ствола (особенно на начальном участке нарезной части) увеличивается.

При раздельном заряжении в изношенном орудии снаряд будет «закусываться» (т. е. заклиниваться в соединительном конусе) в сечении, расположенном ближе к дульному срезу, что приведет к увеличению объема камеры и уменьшению полного пути снаряда.

Удлинение зарядной камеры при износе может быть определено с помощью специального прибора замера камеры (ПЗК), состоящего из штанги с делениями в мм и мерительного кольца, диаметр которого близок к диаметру ведущего пояска снаряда.

Кроме того, длина участка канала ствола, на котором будет происходить врезание ведущих поясков, при износе увеличится. Это, как правило, будет приводить к уменьшению величины давления форсирования. Обра-

шаясь к табл. 9 поправочных коэффициентов и учитывая характер изменения параметров W_0 , l_d , ρ_0 и знак соответствующих поправочных коэффициентов, приходим к **выводу**, что отмеченное изменение параметров при износе приведет к уменьшению начальной скорости.

В некоторых случаях (например, в гаубицах на уменьшенных зарядах) увеличение участка врезания будет приводить к росту давления форсирования и, следовательно, к увеличению начальной скорости. Поэтому в начальный период износа канала ствола, когда удлинение каморы еще невелико, в гаубицах на уменьшенных зарядах начальная скорость снаряда будет выше табличной.

При патронном зарядании орудия положение снаряда, закрепленного в дульце гильзы, не будет изменяться с износом канала ствола. Следовательно, объем каморы и полный путь снаряда останутся постоянными. Вследствие износа канала ствола произойдет увеличение пути свободного пробега снаряда (до начала врезания) и длины участка врезания. С ростом пути свободного пробега снаряда величина давления форсирования всегда будет уменьшаться. С ростом длины участка врезания, как отмечалось выше, величина давления форсирования может уменьшаться или увеличиваться, причем при существовании свободного пробега снаряда увеличение давления форсирования встречается чаще. Таким образом, при патронном зарядании орудия начальная скорость снаряда в связи с износом канала ствола вообще может как уменьшаться, так и увеличиваться в зависимости от условий зарядания орудия и соотношения между длиной свободного пробега снаряда и участка врезания. В начальный период износа канала ствола, если длина свободного пробега снаряда мала, начальная скорость может возрасть. Это явление в артиллерийской практике известно под названием «раскупыривание» орудия. Оно имеет место у 85-мм пушки и у некоторых других орудий.

Еще о влиянии параметров

Теперь посмотрим, как влияет на начальную скорость изменение не рассмотренных еще параметров внутренней баллистики s , κ , θ , δ .

Для заданного образца орудия площадь поперечного сечения канала ствола s может изменяться незначительно за счет производственного допуски на диаметр при износе или при изменении числа и глубины нарезков. При небольшом увеличении площади поперечного сечения канала ствола возрастет движущая сила — сила давления пороховых газов, действующая на снаряд. Очевидно, это приведет к увеличению начальной скорости (считаем, что прорыва газов нет).

В случае когда имеется прорыв пороховых газов между снарядом и поверхностью канала ствола (например, у минометов), увеличение площади поперечного сечения канала ствола приведет, очевидно, к увеличению прорыва газов и к уменьшению начальной скорости. Однако этот случай является особым.

При сравнении орудия одного калибра с орудием другого калибра площадь поперечного сечения канала стволов будет различаться существенно (пропорционально квадрату калибра). Как это отразится на начальной скорости? Здесь следует учитывать, что одновременно будут различаться и другие параметры: вес снаряда, вес заряда, объем каморы — пропорционально кубу калибра; полная длина пути снаряда — пропорционально калибру.

В результате в баллистически подобных орудиях разного калибра начальная скорость будет одинаковой, в других же случаях она может незначительно различаться. Заданную начальную скорость снаряда можно с одинаковым успехом получить в орудиях любого калибра.

Коэффициент формы пороха κ характеризует степень дегрессивности пороха. С увеличением коэффициента формы порох становится более дегрессивным, что приводит при прочих равных условиях к возрастанию наибольшего давления пороховых газов и начальной скорости снаряда. При этом если начальная скорость возрастет на один процент, то наибольшее давление пороховых газов увеличится на восемь процентов. Вот почему на практике предпочитают прогрессивные или слабо дегрессивные пороха.

С увеличением только параметра расширения θ или плотности пороха δ начальная скорость будет умень-

шаться. Причем влияние изменения плотности пороха пренебрежимо мало, а влияние изменения параметра расширения, наоборот, весьма существенно.

Скоростной барьер

Представляет большой интерес задача об изменении начальной скорости снаряда при неограниченном увеличении пути снаряда в канале ствола орудия.

Из физических представлений о явлении выстрела вытекает, что с увеличением пути снаряда в канале ствола орудия будет протекать процесс расширения пороховых газов и превращение внутренней тепловой энергии в кинетическую энергию снаряда. При этом скорость снаряда будет непрерывно увеличиваться, а давление пороховых газов — уменьшаться. Вследствие постепенного уменьшения давления (теоретически до нуля) приращение скорости снаряда будет замедляться, а сама скорость будет стремиться к некоторому предельному (теоретическому) значению $v_{пр}$.

Величину предельной скорости нетрудно получить из основного уравнения пиродинамики, положив в нем: $\psi = 1$ и $p = 0$. С учетом формулы профессора В. Е. Слухоцкого для коэффициента фиктивности получим:

$$v_{пр} = \sqrt{\frac{2gf\omega}{\theta \left(Kq + \frac{1}{3} \omega \right)}}$$

Чем больше будет предельная скорость, тем будет больше и в той же пропорции начальная скорость снаряда. Как показал профессор Б. Н. Окунев, для оптимально спроектированных пушек начальная скорость будет составлять приблизительно половину от предельной скорости.

Таким образом, формула позволяет установить, от каких основных параметров и каким образом зависит начальная скорость. В частности, из формулы следует, что с увеличением параметра расширения θ начальная скорость действительно убывает, а именно: с изменением параметра расширения на один процент она изменится на половину процента.

Далее, формула показывает основные пути повышения начальной скорости: за счет увеличения силы поро-

ха и веса порохового заряда, а также за счет уменьшения веса снаряда (например, за счет применения подкалиберных снарядов).

Наконец, из формулы видно, что наши возможности повышения начальной скорости не беспредельны. При уменьшении веса снаряда при прочих неизменных условиях предельная скорость не может быть более величины $v_{\text{ГР}}^*$, которая получается при $q = 0$:

$$v_{\text{ГР}}^* = \sqrt{\frac{6gf}{\theta}}.$$

При подстановке в последнее выражение значений параметров $g = 98,1 \text{ дм/сек}$, $f = 1\,000\,000 \text{ кг} \cdot \text{дм/кг}$, $\theta = 0,2$ получим предельную скорость, равную $5\,426 \text{ м/сек}$.

Следовательно, реальная наибольшая начальная скорость снаряда, которую можно достичь в классическом артиллерийском орудии, принципиально не может превзойти величины $2\,500 \div 3\,000 \text{ м/сек}$. В этом заключается особенность артиллерии, осознав которую человечество в стремлении к космическим скоростям обратилось к использованию реактивного принципа движения.

Рассеивание начальных скоростей

Рассмотрим основные причины рассеивания начальных скоростей при стрельбе. Рассеивание начальных скоростей определяется в конечном счете рассеиванием параметров внутренней баллистики. Основными параметрами, рассеивание которых вызывает рассеивание начальных скоростей, являются: вес снаряда, заряда и воспламенителя, объем камеры, давление форсирования и толщина горящего свода пороха.

Рассеивание перечисленных параметров определяется двумя группами причин: во-первых, неоднородностью в пределах установленных допусков технологии изготовления орудий, снарядов, пороховых зарядов; во-вторых, неоднородностью условий эксплуатации орудий и боеприпасов в войсках.

Существует наименьшее для данного уровня развития науки и техники техническое рассеивание начальных скоростей, характеризуемое **средним**

ной ошибкой в начальной скорости. В табл. 10 приводятся по данным профессора **С. И. Ермолаева** средние опытные значения срединных ошибок, соответствующие условиям валового производства.

Т а б л и ц а 10

| Начальная скорость, <i>м/сек</i> | 100 | 200 | 300 | 400 и более |
|----------------------------------|------|------|------|-------------|
| Срединная ошибка, % | 0,58 | 0,39 | 0,28 | 0,22 |

При стрельбе в войсковых условиях рассеивание начальных скоростей будет выше вследствие действия дополнительных факторов (неоднородия физико-химических свойств и температуры пороховых зарядов, неоднородия усилий досылки снарядов при зарядании и т. п.). Особенно большое повышение рассеивания начальных скоростей может быть при несоблюдении правил обращения с боеприпасами и правил стрельбы.

ГЛАВА 6

КАК НАЗНАЧАЮТ ЗАРЯД?

Двойное действие заряда

Для внутренней баллистики из трех элементов, составляющих артиллерийскую систему: орудия, снаряда и заряда — главным является пороховой заряд.

До конца прошлого столетия сама внутренняя баллистика чаще называлась «теорией действия пороха». Известный русский баллистик **А. Ф. Бринк** в изданном в 1901 г. курсе «Внутренняя баллистика» дал в виде подзаголовка и другое название своей книге «Свойства порохов и действие их в закрытых сосудах и в артиллерийских орудиях».

Пороховой заряд в основном определяет баллистические качества артиллерийского орудия, т. е. его способность сообщать снаряду определенную начальную скорость при наименьших материальных затратах.

В старину говорили, что порох в орудии производит двойное действие — полезное и вредное.

Полезное действие пороха состоит в сообщении снаряду кинетической энергии. Его можно охарактеризовать площадью, заключенной под пиродинамической кривой давления в функции от пути, или, как говорят в теплотехнике, с помощью площади индикаторной диаграммы. В артиллерийской практике характеристикой полезного действия пороха является величина начальной скорости снаряда.

Вредное действие пороха состоит в стремлении пороховых газов разрушить ствол, лафет, снаряд и другие элементы системы. Это действие определяется характером пиродинамической кривой давления в функции от времени или пути. Наиболее распространенной в артиллерийской практике характеристикой вредного действия пороха является величина наибольшего давления пороховых газов.

Как видим, для оценки полезного и вредного действия пороха в орудии нужно знать давление пороховых газов.

Измерение давления пороховых газов

Наиболее распространенным методом измерения давления является крешерный метод, основанный на обжатии крешера. Крешер, или крешерный столбик, представляет собой цилиндрический *б* (рис. 11) или кониче-

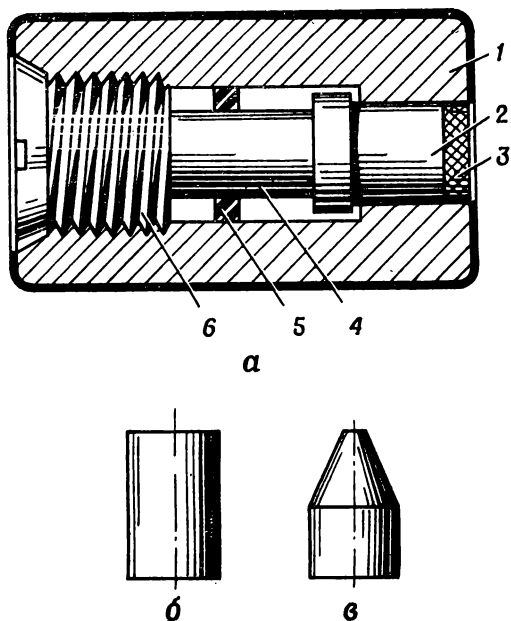


Рис. 11. Измерение давления пороховых газов: а) вкладной крешерный прибор; б) цилиндрический крешерный столбик; в) конический крешерный столбик;

1 — корпус; 2 — поршень; 3 — мастика; 4 — крешерный столбик; 5 — резиновое кольцо; 6 — крышка

ский *в* столбик, сделанный из красной меди. Размеры крешера обозначаются двумя цифрами, из которых меньшая является диаметром, а большая — высотой крешера (в мм). В настоящее время применяются крешеры следующих размеров: 10×15; 8×13; 6×9,8; 5×8,1; 4×6,5

и 3×4,9. Конический крешер был предложен профессором **М. Е. Серебряковым** с целью повышения его чувствительности к нагрузке.

Для передачи давления пороховых газов на крешер последний помещают в крешерный прибор *а*. Эти приборы бывают вк л а д н ы м и или в в и н т н ы м и. Вкладные крешерные приборы помещают в камеру орудия или в гильзу у дна. Прибор состоит из цилиндрического полого стального корпуса *1*, покрытого рубашкой из мягкого материала и имеющего с одной стороны гладкое отверстие, в котором перемещаются поршень *2* и слой мастики *3* для изоляции внутренней полости, а с другой — нарезное отверстие под крышку *б*. Вкладные приборы различаются между собой объемом: 4 см^3 , 35 см^3 , 50 см^3 и 78 см^3 . Объем крешерного прибора не должен превосходить 2,5% от объема камеры. Если это условие не может быть выполнено, применяются винтные крешерные приборы, которые ввинчиваются в специальные гнезда, сделанные в стенке ствола.

Под действием силы давления пороховых газов, передаваемой через поршень *2*, крешерный столбик *4*, удерживаемый по оси прибора с помощью резинового кольца *5*, подвергается пластическим деформациям. О величине давления пороховых газов судят по величине обжатия крешерного столбика, т. е. по осевой остаточной его деформации, с помощью таражной таблицы. Таражные таблицы составляют для каждой партии крешеров по результатам обжатия 50 крешеров на прессе. Следует иметь в виду, что величина обжатия зависит также от продолжительности приложения нагрузки, от температуры крешера и от состояния опорных плоскостей. С увеличением продолжительности приложения нагрузки величина обжатия крешера увеличивается. В условиях орудия нагрузка к крешеру прикладывается весьма быстро, поэтому крешерный метод дает заниженные величины давлений в среднем (по данным профессора **В. Е. Слухоцкого**) на 12%.

Крешерные приборы дают возможность измерить величину наибольшего давления пороховых газов. При сжигании пороха в манометрической бомбе регистрируют кривую обжатия крешера и масштаб времени (рис. 5) и в результате обработки получают кривую давления пороховых газов в функции от времени.

Помимо крешерного метода измерения давлений существуют и другие методы, основанные на измерении упругих деформаций, электрических величин и т. п.

Пьезоэлектрический метод основан на свойстве кристаллов кварца, турмалина, сегнетовой соли и других при их сжатии в направлении электрической оси выделять электрические заряды на гранях, перпендикулярных этой оси.

Тензометрический метод основан на свойстве металлической проволоки (например, манганиновой) изменять омическое сопротивление при ее растяжении или сжатии под действием нагрузки.

Пьезоэлектрический и тензометрический методы позволяют записать в орудии кривую давления в функции от времени.

О марке пороха

Пороховой заряд характеризуется весом и маркой пороха. Под **маркой пороха** понимается сорт (природа), форма и размеры пороха. Из размеров пороховых элементов наиболее важным является толщина горящего свода.

Марка пороха и данные о партии пороха содержатся в условном обозначении порохов. Например, обозначение НДТ-3¹⁷/₁ Пер⁵/₄₆ 0 в/в расшифровывается: нитроглицериновый порох третьей группы по калорийности, трубчатой формы с одним каналом и толщиной горящего свода 1,7 мм, переделанный, 5-й партии, изготовленный в 1946 г. заводом «0» из пороха военного времени.

Другое обозначение ¹²/₇ св⁶/₄₉ 0 уф расшифровывается: пироксилиновый порох (впереди нет буквенного обозначения), зерненный, с семью каналами и толщиной горящего свода 1,2 мм, из свежего пироксилина, 6-й партии, изготовленный в 1949 г. заводом «0», ускоренной фабрикации.

При создании новой артиллерийской системы заряд назначают исходя из желания получить наибольшее полезное действие при наименьшем вредном его действии.

Заряд назначают параллельно с выбором конструктивных параметров и условий заряжания будущего орудия в процессе баллистического проектирования.

Во внутренней баллистике разработаны методы баллистического проектирования, которые указывают пути поиска и признаки наиболее выгодного варианта баллистического решения, наилучшим образом удовлетворяющего тактико-техническим требованиям.

Выбор окончательного варианта решения производится с помощью специальных критериев, представляющих собой комбинацию параметров, характеризующих тактические, технические, эксплуатационные и экономические свойства артиллерийской системы. Обычно наиболее выгодному варианту соответствует наибольшее значение критерия.

Сорт и форма пороха назначаются при выборе исходных данных. Наиболее общей характеристикой сорта пороха является калорийность пороха. С увеличением калорийности пороха при прочих равных условиях начальная скорость растет. Однако одновременно прогрессивно падает живучесть ствола вследствие сильного его износа.

С целью максимального повышения живучести орудия стремятся применять по возможности пороха низкой калорийности ($600 \div 700$ ккал/кг). В минометах, где вопросы живучести играют меньшую роль, применяют высококалорийные нитроглицериновые пороха с калорийностью свыше 1000 ккал/кг.

Пороха различных сортов отличаются составом и технологией их изготовления. Поэтому при выборе сорта пороха нужно учитывать наличие в стране стратегического сырья и экономические возможности государства. Наиболее целесообразно выбирать один из сортов пороха, освоенных отечественной промышленностью.

При выборе формы пороха используется общее указание внутренней баллистики о целесообразности повышения прогрессивности пороха. Кроме того, учитываются технологические возможности изготовления зарядов из пороха данной формы, а также надежность и единообразие действия зарядов при выстреле.

В настоящее время в орудиях наиболее широко применяются трубчатые пороха и зерновые пороха с семью каналами: первые в мощных орудиях среднего и крупного калибров, а вторые в гаубицах и орудиях малого калибра. Такой выбор формы пороха определяется условиями обеспечения хорошего воспламенения зарядов

при выстреле и высокой производительности валового изготовления порохов и зарядов. В минометах обычно применяются пороха пластинчатой и ленточной формы.

Расчет заряда

Возьмем коэффициент использования веса заряда η_{ω} , который численно равен кинетической энергии снаряда, приходящейся на 1 кг порохового заряда:

$$\eta_{\omega} = \frac{qv_0^2}{2g\omega}.$$

Величина коэффициента η_{ω} незначительно убывает с увеличением коэффициента могущества орудия C_E , что видно из табл. 11, полученной по статистическим данным.

Таблица 11

| Коэффициент могущества орудия C_E , тм/дм ³ | 200 | 500 | 1000 | 1500 |
|---|-----|-----|------|------|
| Коэффициент использования веса заряда η_{ω} , тм/кг | 130 | 116 | 104 | 100 |

Найдем выражение для веса заряда ω :

$$\omega = \frac{qv_0^2}{2g\eta_{\omega}}.$$

Из формулы видно, что вес заряда в основном зависит от начальной скорости и от веса снаряда и не зависит, в частности, от величины наибольшего давления пороховых газов. Зная начальную скорость и вес снаряда, а также другие параметры внутренней баллистики, можно определить вес заряда.

Изменяя вес заряда, можно в широких пределах изменять величину начальной скорости заданного снаряда. Именно так поступают на практике при желании получить навесную траекторию при стрельбе на сравнительно небольшие дальности.

Заряды гаубиц, минометов и даже некоторых пушек делаются переменными, т. е. состоящими из нескольких навесок пороха. Так, заряд 122-мм гаубицы обр. 1938 г. имеет **основной пакет** пороха марки $\frac{4}{1}$ и шесть допол-

нительных пучков пороха марки $\frac{9}{7}$. Извлекая один или несколько пучков перед заряданием орудия, можно составить так называемые уменьшенные заряды и получить меньшую начальную скорость. При стрельбе на заданную дальность это приведет в свою очередь к необходимости увеличить угол бросания, что сделает траекторию навесной.

Расчет переменного заряда проводят по шкале начальных скоростей, которая задается на основании внешнебаллистических расчетов. Для каждой заданной начальной скорости находят вес заряда и строят график зависимости начальной скорости от веса заряда. Затем составляют разности соседних значений весов зарядов и путем некоторого изменения весов заряда стремятся добиться, чтобы разности были одинаковы. При этом веса дополнительных пучков будут одинаковы, что является целесообразным с точки зрения производства и эксплуатации зарядов.

В табл. 12 приведены веса зарядов и соответствующие начальные скорости для 122-мм гаубицы обр. 1938 г.

Таблица 12

| Номер заряда | Состав заряда | Вес заряда, кг | Начальная скорость, м/сек |
|--------------|---|----------------|---------------------------|
| Полный | Пакет + 2 нижних пучка + + 4 верхних пучка | 2,100 | 515 |
| Первый | Пакет + 2 нижних пучка + + 3 верхних пучка | 1,775 | 458 |
| Второй | Пакет + 2 нижних пучка + + 2 верхних пучка | 1,450 | 402 |
| Третий | Пакет + 2 нижних пучка + + 1 верхний пучок | 1,125 | 346 |
| Четвертый | Пакет + 2 нижних пучка | 0,800 | 290 |
| Пятый | Пакет + 1 нижний пучок | 0,685 | 269 |
| Шестой | Пакет | 0,570 | 248 |

Толщина горящего свода определяет разрушительное действие пороха через величину наибольшего давления пороховых газов. Если сделать заряд из мелких частиц пороха, то он полностью сгорит до начала движения снаряда, а величина давления пороховых газов достигнет 20 000 атм при плотности заряжания $0,70 \text{ кг/дм}^3$.

Можно не сомневаться в том, что ствол орудия будет разрушен.

С увеличением толщины горящего свода пороха при прочих неизменных условиях величина наибольшего давления уменьшается, а снаряд в момент окончания горения пороха перемещается к дульному срезу орудия. При достаточно большой толщине горящего свода порох не успевает сгорать в канале ствола орудия и выбрасывается из ствола. Вследствие этого начальная скорость снаряда начнет уменьшаться, что является плохим признаком. Ввиду важного значения величины наибольшего давления пороховых газов ее при назначении заряда обязательно рассчитывают.

Толщину горящего свода пороха выбирают таким образом, чтобы на полном заряде при температуре пороха $+50^{\circ}\text{C}$ величина наибольшего давления не превзошла допустимого по условиям прочности ствола, снаряда или взрывателя значения, а на наименьшем заряде при температуре пороха -50°C в изношенном стволе величина наибольшего давления не стала меньше допустимого значения, обеспечивающего правильную работу при выстреле взрывателя и механизмов автоматики орудия.

Задав величину допустимого наибольшего давления пороховых газов и зная параметры внутренней баллистики, можно определить величину конечного импульса давления I_K , а затем найти толщину горящего свода пороха $2e_1$ по формуле

$$2e_1 = (2u_1) I_K.$$

Значение коэффициента скорости u_1 будет известно после выбора сорта пороха.

На практике пользуются также опытными соотношениями между $2e_1$ и I_K .

После определения толщины горящего свода можно или выбрать одну из марок существующих порохов, или заказать новую марку пороха. Поскольку зависимости внутренней баллистики не являются совершенно точными и, кроме того, при изготовлении пороха трудно обеспечить заданные свойства, то целесообразно заказывать кроме выбранной марки пороха еще две или четыре марки с толщинами горящих сводов, отличающимися на 10%.

Подбор заряда стрельбой

Окончательно решить вопрос о том, какая из заказанных марок окажется пригодной, можно только путем отстрела спроектированного орудия на полигоне. При испытании орудия на полигоне производят не только окончательный выбор марки пороха, но также и окончательный выбор веса заряда.

После принятия спроектированного орудия на вооружение для каждой валовой партии пороха (вследствие неоднородности изготовления порохов) устанавливается стрельбой свой вес заряда, обеспечивающий табличную начальную скорость. Поэтому на практике вес заряда колеблется от партии к партии пороха, что видно из табл. 13 (100-мм пушка, начальная скорость 900 м/сек).

Таблица 13

| Партия пороха | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Вес заряда, кг | 5,700 | 5,740 | 5,950 | 5,605 | 5,553 |

Порядок установления веса заряда стрельбой определяется специальным документом.

Для стрельб по подбору веса заряда из валовых партий порохов отбираются специальные стволы и выстрелы, называемые **образцовыми** и являющиеся эталонами. При стрельбе из образцового ствола образцовыми выстрелами при нормальной температуре заряда получается **табличная** начальная скорость.

Приборы, с помощью которых производятся измерения начальных скоростей и наибольших давлений, подвергаются специальным выверкам, обеспечивающим однообразие их показаний при пользовании ими на различных полигонах.

Образцовый ствол должен отбираться из числа новых стволов валового производства со средними допусками на изготовление камеры и диаметральной размеры нарезной части. Образцовый ствол должен служить только для установления веса заряда и контроля начальной скорости образцовых выстрелов.

Образцовые выстрелы должны составляться

из снарядов одной партии изготовления с одинаковыми средними допусками на диаметр ведущего пояска и из зарядов образцовой партии пороха.

Образцовая партия пороха должна быть изготовлена в полном соответствии с установленной технологией и обладать наибольшей стабильностью.

Стволы, стрельбой из которых производят подбор заряда из валовых партий порохов, называются **баллистическими** стволами.

Баллистические стволы отбираются из числа новых или малоизношенных стволов и служат до тех пор, пока падение начальной скорости (вследствие износа) не достигнет 2%.

Существует два метода проведения стрельб для подбора зарядов: стрельба из малоизношенного орудия зарядами, составленными из валовой партии пороха, и сострел зарядов, составленных из валовой партии пороха, с образцовыми выстрелами.

В первом случае на величину начальной скорости будет влиять степень износа ствола и величины допусков, с которыми изготовлен его канал.

Во втором случае отстреливаются поочередно испытуемый и образцовый выстрелы из одного и того же орудия, вследствие чего влияние износа ствола и допусков на размеры канала ствола исключается.

Современный уровень развития внутренней баллистики позволяет успешно решить проблему установления без стрельбы веса заряда из пороха валовой партии, зная вес образцового заряда и физико-химические характеристики образцовой и валовой партии порохов. В результате этого будут сбережены большие материальные ценности и сокращены затраты труда и времени.

Метод установления веса заряда без стрельбы можно применять прежде всего для орудий, из которых стрельба производится прямой наводкой или без полной подготовки данных.

При назначении заряда существенную роль играет его конструкция, от которой зависят надежность и однообразие действия заряда, начальная скорость снаряда и наибольшее давление пороховых газов. Вот почему окончательный выбор зарядов для нового образца орудия остается и еще долгое время будет оставаться делом экспериментаторов.

ВНУТРЕННЯЯ БАЛЛИСТИКА РЕКОМЕНДУЕТ

Исходный вариант орудия

Внутренняя баллистика проникает в самые глубинные процессы, происходящие в артиллерийской системе при выстреле и затрагивающие все части и элементы системы. Поэтому многие ее выводы носят характер рекомендаций. Изучая начальный период движения снаряда к цели, она определяет начальные условия движения в пространстве и, следовательно, помогает понять поведение снаряда на траектории.

Источниками рекомендаций внутренней баллистики являются:

— экспериментальные и теоретические результаты изучения отдельных процессов, отдельных сторон явления выстрела;

— анализ системы уравнений внутренней баллистики, взаимных связей между пиродинамическими элементами и параметрами внутренней баллистики;

— анализ и обобщение результатов опытных и боевых стрельб.

При проектировании нового орудия за исходный вариант целесообразно принять вариант орудия с наименьшим объемом канала ствола или сокращенно «орудие наименьшего объема».

Под орудием наименьшего объема понимается такое орудие, у которого объем канала ствола будет минимальным при заданных параметрах d , q , v_d , f , α , δ , θ , κ , p_0 и при условии, что наибольшее давление пороховых газов сохраняется постоянным.

В этом случае величина объема канала ствола, отнесенного к весу снаряда, является функцией только плотности заряжания Δ и относительного веса заряда $\frac{\omega}{q}$.

Геометрически она может быть представлена поверхностью, имеющей вид гамака.

Задача об «орудии наименьшего объема» была впервые рассмотрена в 1942 г. профессором **М. Е. Серебряковым**. Эта задача эквивалентна задаче об «орудии наибольшего могущества», которая была решена ранее **А. Ф. Бринком**, **Н. Ф. Дроздовым** и другими баллистиками.

Математическое решение задачи состоит в отыскании минимума объема канала ствола при условии постоянства наибольшего давления. В результате решения задачи получают значения параметров Δ_H и $\frac{\omega_{\pi}}{q}$ (отвечающие минимуму объема канала ствола), которые называются **наивыгоднейшими**.

Вместо относительного веса снаряда обычно рассматривают коэффициент полезного действия (КПД) орудия r'_d , который увеличивается с уменьшением веса заряда.

Наивыгоднейшая плотность заряжания зависит от наибольшего давления, калорийности и формы пороха, давления форсирования, а наивыгоднейший КПД зависит, кроме того, от начальной скорости, причем его зависимость от давления форсирования очень слабая.

В табл. 14 приведены величины $r'_{д,н}$, а в табл. 15 — величины Δ_H для рубчатого пороха.

Таблица 14

| Давление пороховых газов p_m , кг/см ² | Дульная скорость снаряда v_d , м/сек | | | |
|--|--|-------|-------|-------|
| | 600 | | 1400 | |
| | Калорийность пороха Q_{ψ} , ккал/кг | | | |
| | 500 | 1100 | 500 | 1100 |
| | Наивыгоднейший КПД $r'_{д,н}$ | | | |
| 1000 | 0,192 | 0,183 | 0,243 | 0,224 |
| 3000 | 0,217 | 0,198 | 0,261 | 0,234 |
| 6000 | 0,246 | 0,216 | 0,282 | 0,250 |

Из табл. 14 видно, что наивыгоднейший КПД увеличивается с увеличением начальной скорости, наибольшего давления и с уменьшением калорийности пороха.

Таблица 15

| Давление пороховых газов p_m , кг/см ² | Давление форсирования p_0 , кг/см ² | | | |
|--|--|------|-----|------|
| | 0 | | 600 | |
| | Калорийность пороха $Q_{\text{п}}$, ккал/кг | | | |
| | 500 | 1100 | 500 | 1100 |

Наивыгоднейшая плотность заряжания Δ_H

| | | | | |
|------|-------|------|-------|------|
| 1000 | 0,43 | 0,38 | 0,24 | 0,17 |
| 3000 | 0,76 | 0,75 | 0,68 | 0,67 |
| 6000 | >1,00 | 1,00 | >1,00 | 0,95 |

Из табл. 15 следует, что наивыгоднейшая плотность заряжания увеличивается с увеличением наибольшего давления и с уменьшением давления форсирования и калорийности пороха.

Зная наивыгоднейшие плотность заряжания и КПД, можно определить все остальные параметры «орудия наименьшего объема» (в частности, длину канала ствола).

Каким быть орудью?

Отход от наивыгоднейших значений Δ_H и $r'_{д, H}$ в сторону их уменьшения или увеличения всегда связан с увеличением объема канала ствола и длины канала ствола.

Если длина канала ствола, полученная для «орудия наименьшего объема», окажется слишком большой, то ее нельзя будет уменьшить за счет изменения плотности заряжания или веса заряда. Для этого необходимо изменить исходные данные, например, калорийность пороха, наибольшее давление пороховых газов и т. д.

Вариант «орудия наименьшего объема» интересен как исходный. Однако, как правило, он не может быть окончательным (оптимальным). От этого варианта рекомендуется отойти в сторону более высоких значений КПД, т. е. в сторону уменьшения веса заряда, объема камеры и увеличения длины канала ствола. Возможны также отступления в ту или другую сторону от наивыгоднейшей плотности заряжания.

Для выбранного объема канала ствола можно указать **три предельных варианта**: с наименьшим весом заряда, наименьшим объемом камеры и наименьшей

плотностью заряжания. Последний вариант не имеет практического значения, так как обладает низким КПД — более низким, чем у «орудия наименьшего объема».

Вариант орудия с наименьшим весом заряда характеризуется наивыгоднейшей плотностью заряжания.

Увеличение плотности заряжания сверх наивыгоднейшей приведет к варианту с наименьшим объемом камеры, что является желательным при проектировании автоматического оружия.

Однако увеличение плотности заряжания может быть ограничено вместимостью заряда в камору (в гильзу). Предельная по вместимости плотность заряжания зависит от формы пороха: для трубчатого пороха она достигает величины 0,75, а для зернового пороха — 0,80 и более. Для повышения предельной плотности заряжания стремятся устранить искривление пороховых трубок, покрыть графитом зерновые пороха или даже создать пороховой заряд-зерно, состоящий из одного зерна с каналами.

Профессор **М. Е. Серебряков** аналитические свойства основных зависимостей внутренней баллистики очень удачно изобразил геометрически в виде директивной диаграммы, представляющей собою совокупность изолиний основных характеристик артиллерийской системы. Достоинством директивной диаграммы является наглядность взаимосвязей между отдельными характеристиками, что делает ее полезным инструментом поиска оптимального баллистического решения.

Расчеты показывают, что оптимальный вариант орудия будет всегда характеризоваться плотностью заряжания, близкой к наивыгоднейшей.

Что касается веса заряда, то он, безусловно, должен быть меньше веса заряда «орудия наименьшего объема», поскольку в области минимума объема канала ствола существенное уменьшение веса заряда приводит лишь к незначительному росту объема канала ствола. В окончательном варианте приходится примирять противоречивые желания иметь поменьше вес заряда и длину канала ствола с учетом всех требований, предъявляемых к орудью.

Когда одинаково важно получить хорошее использо-

вание заряда и длины нарезной части ствола, следует по рекомендации профессора **Б. Н. Окунева** считать оптимальной величину КПД орудия, равную 0,27.

Когда использование заряда имеет более важное значение, т. е. когда желательно иметь возможно меньшие вес и размер заряда (автоматическое оружие), оптимальная величина КПД орудия должна быть больше и достигать значений порядка 0,33.

Если более важное значение имеет использование длины нарезной части ствола, т. е. желательно, чтобы длина ствола получилась возможно меньшей (орудия большой мощности), оптимальная величина КПД орудия должна быть меньше и приближаться к значениям порядка 0,24.

Профессор **В. Е. Слухоцкий** в поисках оптимального веса заряда рекомендует примирять требования экономного использования заряда, длины ствола и высокой живучести орудия. В результате вес заряда определяется по максимуму специального критерия, равного произведению коэффициента использования заряда в первой степени, коэффициента использования длины орудия в четвертой степени и корня квадратного из условного числа выстрелов, характеризующих живучесть орудия. Оптимальные величины КПД орудия в этом случае будут лежать в пределах $0,26 \div 0,33$.

Создание нового образца орудия должно быть всегда новым шагом вперед. Вот почему этот ответственный шаг делается после внимательного анализа существующих образцов. Результаты такого анализа накапливаются и выражаются в виде рекомендаций, правил или таблиц исходных данных.

Важную роль при создании нового образца орудия играет умение подметить рациональное в существующих образцах и почувствовать степень совершенства создаваемого образца. В этом смысле проектирование остается искусством, областью удач и находок, а любые рекомендации играют роль стимуляторов творческого процесса конструктора.

Взгляд на боеприпасы

Для проектировщиков боеприпасов внутренняя баллистика дает рекомендации по выбору **ведущей части** снаряда и по повышению **кучности** стрельбы.

Ведущая часть снаряда и в особенности ведущие пояски должны разрабатываться совместно с ведущей частью канала ствола — соединительным конусом и нарезами. От их устройства зависит величина давления форсирования, которая существенно влияет на многие характеристики артиллерийской системы. Выбором оптимальной конструкции ведущих устройств можно обеспечить оптимальное баллистическое решение, уменьшить рассеивание начальных скоростей и изменение начальной скорости при износе канала ствола.

В принципе выгодно иметь величину давления форсирования, близкую к нулю, что может дать уменьшение длины канала ствола при сохранении постоянным наибольшим давлением. В этом случае будет малым влияние на величину начальной скорости рассеивания самой величины давления форсирования. Кроме того, при износе канала ствола изменение величины давления форсирования будет небольшим и скажется на изменении начальной скорости слабо.

Для сравнения вариантов конструкции ведущих частей снаряда и канала ствола орудия следует в каждом случае рассчитывать величину давления форсирования. Предварительно необходимо опытным или теоретическим путем получить кривую врезания, т. е. зависимость от пути силы сопротивления врезанию ведущих поясков в нарезы.

Можно разработать ведущие устройства, обеспечивающие любую заданную величину давления форсирования (в частности, можно обеспечить постоянство величины давления форсирования при износе канала ствола или при изменении условий заряжания орудия).

Кучность стрельбы, т. е. явление, обратное рассеиванию снарядов, связано через процессы внутренней баллистики с рассеиванием начальных скоростей. Для уменьшения рассеивания начальных скоростей нужно стремиться уменьшать рассеивание весов снарядов, зарядов и воспламенителей, объемов камер, давлений форсирования и толщин горящих сводов порохов. Особенно важным направлением считается уменьшение рассеивания давлений форсирования за счет повышения однородности размеров и механических свойств материала ведущих поясков.

Кроме того, при создании нового образца орудия и

боеприпасов следует учитывать возможности уменьшения влияния рассеивания параметров внутренней баллистики на рассеивание начальных скоростей. В этом плане можно рекомендовать увеличение наибольшего давления пороховых газов, калорийности пороха, давления форсирования (если рассеивание самого давления форсирования невелико) и относительного пути снаряда.

Пути модернизации

Задача модернизации артиллерии никогда не снималась с повестки дня, хотя следует признать, что по сравнению с другими областями техники артиллерия более консервативна ко всякого рода техническим изменениям существующих образцов. Это связано в первую очередь с обеспечением безопасности стрельбы и со значительными изменениями, которые обычно касаются таблиц и правил стрельбы, порядка и документации по эксплуатации и т. д.

Наиболее часто при модернизации артиллерии преследуется цель повышения ее могущества. Каковы же пути повышения могущества артиллерии?

Самым простым путем является **увеличение калибра орудия**. При этом пропорционально кубу калибра будет расти вес снаряда и, следовательно, возрастет могущество действия снаряда у цели. Кроме того, при неизменной начальной скорости будет расти наибольшая дальность стрельбы (дальнобойность).

Именно таким путем шло развитие артиллерии на разных этапах, особенно когда все возможности повышения начальной скорости бывали исчерпаны. Приведем несколько примеров.

В середине прошлого века для борьбы с броненосными кораблями калибр гладкоствольных береговых орудий был увеличен до 500 мм. Так, на Всероссийской мануфактурной выставке 1870 г. демонстрировалась 20-дюймовая (508-мм) пушка. В 30-х годах нашего столетия стремление иметь превосходство в дальности стрельбы привело к появлению на флагманских кораблях флотов — линкорах 16-дюймовых (406-мм) орудий. За последние 40 лет калибр орудий противотанковой артиллерии постепенно возрастал от 37 до 100 мм.

Для того чтобы с ростом могущества орудия действие выстрела на лафет и вес орудия не превосходили допустимых пределов, параллельно совершенствовались противооткатные устройства и стали применяться мощные дульные тормоза.

Если калибр орудия не изменять, то основным путем повышения могущества остается **увеличение начальной скорости снаряда**.

Для увеличения скорости снаряда конструктор может использовать следующие направления:

- увеличение веса заряда;
- уменьшение веса снаряда;
- повышение калорийности пороха;
- повышение наибольшего давления пороховых газов;
- увеличение длины канала ствола орудия;
- применение активно-реактивных снарядов;
- применение легкогазовых орудий.

Следует иметь в виду, что реализация каждого из перечисленных направлений связана со многими техническими трудностями и требует использования самых последних достижений науки.

Подход к эксплуатации

Рекомендациями внутренней баллистики необходимо пользоваться также и в процессе эксплуатации артиллерийской системы. Особое внимание должно уделяться учету и анализу условий эксплуатации артиллерийской системы.

Под условиями эксплуатации артиллерийской системы следует понимать совокупность внешних воздействий на орудие, снаряд и заряд на всех этапах их эксплуатации в войсках — от поступления с завода до боевого применения и полного израсходования боевых качеств (ресурса).

Оптимальные условия эксплуатации установлены длительной артиллерийской практикой и зафиксированы в эксплуатационной документации, требования которой должны выполняться безукоризненно.

В орудии при эксплуатации могут изменяться состояние поверхности канала ствола и диаметральный его размеры. Причинами этого являются износ

канала ствола при стрельбе, нагрев или охлаждение ствола, наличие смазки и грязи в канале ствола, омеднение ствола, деформация (расплющивание) полей нарезов, местная деформация (раздутие ствола).

В процессе эксплуатации снарядов может быть повреждена их поверхность — окраска, баллистический наконечник, оперение, ведущие пояски. При зарядании орудия снаряд может быть загрязнен, покрыт смазкой. Все это скажется на полете снаряда к цели.

Обычно в группе снарядов, предназначенных для стрельбы, каждый снаряд имеет индивидуальные особенности: размеры, вес, характеристики ведущих поясков, соединение с гильзой и т. д. При зарядании орудия снаряды будут досылаться с различными усилиями.

Особенно сильно могут изменяться при длительном хранении и при изменении условий эксплуатации свойства боевых зарядов. К сожалению, пороха способны «стареть», в результате чего изменяются их баллистические характеристики. Наиболее сильно изменяются со временем свойства пироксилиновых порохов, содержащих в большом количестве летучие вещества — остаток растворителя и влагу.

Кроме того, характеристики порохового заряда будут существенно изменяться при изменении температуры пороха, разрушении пороховых зерен, отсыревании воспламенителя, нарушении конструкции заряда (взаимное перемещение его частей, удаление отдельных элементов).

Первая рекомендация состоит в том, чтобы условия эксплуатации по возможности сохранялись стабильными при хранении и подготовке к стрельбе и в течение стрельбы. Для этого стремятся хранить боеприпасы при постоянной температуре и влажности, боевые заряды помещают в герметические футляры, на огневой позиции боеприпасы сортируют по партиям изготовления и другим признакам, снаряды в орудие досылают с одинаковым усилием, канал ствола орудия оберегают и тщательно очищают перед стрельбой и т. д.

Вторая рекомендация состоит в том, чтобы изменения условий эксплуатации, которых нельзя избежать, по возможности слабо отражались на величине начальной скорости и результатах стрельбы. Здесь большую роль могут сыграть создатели орудий, снарядов и

зарядов, выбирая соответствующим образом конструкцию и материалы. Например, для уменьшения износа канала ствола его поверхность покрывают тугоплавким металлом, ведущие пояски снарядов защищают поясами, которые снимают перед заряданием, для изготовления пороха применяют композиции, малочувствительные к изменению температуры и т. д.

Третья рекомендация состоит в том, чтобы значительные изменения условий стрельбы и вследствие этого начальной скорости учитывать с достаточной точностью при подготовке стрельбы.

Именно так поступают, рассчитывая поправки в начальную скорость на износ канала ствола, отклонение температуры заряда, изменение баллистических свойств пороха (пороховая поправка). Может быть, следовало вводить поправки в начальную скорость на нагрев ствола, наличие смазки при первом выстреле, допуски на диаметр канала ствола и ведущих поясков и другие изменения условий эксплуатации.

Кроме выдачи общих и частных рекомендаций внутренней баллистика способна дать ответ на многие и многие вопросы, постоянно возникающие перед конструкторами и артиллеристами.

ГЛАВА 8

ОТ ПРОШЛОГО К БУДУЩЕМУ

Накопление фактов

Несмотря на то что артиллерия около шести столетий с успехом применяется на поле боя, внутренняя баллистика является сравнительно молодой наукой. Оформление ее в самостоятельную науку относится к середине прошлого столетия.

Это было время бурного развития машинного производства, расцвета физических и химических наук, великих открытий. В артиллерии это время ознаменовалось переходом от гладкостенных к нарезным орудиям.

В результате многочисленных стрельб из орудий постепенно накапливались факты, которые косвенно характеризовали явление выстрела. Так, с первых шагов применения артиллерии наблюдались случаи разрыва орудий. Это говорило о том, что в орудии порох при горении выделяет вещество (флюид), которое распирает стенки ствола и толкает ядро. Наблюдая за дальностью полета ядра, скоро убедились, что она не остается постоянной, а меняется в зависимости от количества пороха, от степени его уплотнения, от веса и расположения заряда. В результате отбора и обобщения устойчивых фактов складывались эмпирические правила, которые не объясняли еще явление выстрела, однако помогали создавать хорошие для того времени образцы орудий.

При первых же попытках объяснить наблюдаемые факты основное внимание было обращено на порох, систематическое изучение свойств которого началось в 16 в. В это время было введено понятие силы пороха как характеристики его энергетических возможностей.

Первым результатом изучения пороха было введение в начале 18 в. вместо пороховой мякоти зеренных порохов. В дальнейшем много занимались улучшением со-

става дымного пороха путем отыскания наилучшей пропорции основных исходных материалов — серы, угля и селитры, а также путем введения различных веществ — мышьяка, нашатыря, уксуса и даже вина.

Развитие в 17 в. теории газов способствовало появлению первых механических представлений о явлении выстрела, при этом причиной движения снаряда была названа упругость пороховых газов.

Даниил Бернулли в работе «Гидродинамика», которая вышла в 1738 г., делает одну из первых попыток описать процесс расширения газов и движение снаряда в орудии. Он получил теоретическую формулу для вычисления начальной скорости снаряда.

Более подробные сведения о движении снаряда в орудии даны в работе английского артиллериста **Робинса** «Новые принципы артиллерийской науки», опубликованной в 1742 г.

В середине 18 в. член Петербургской академии наук **Л. Эйлер** предложил свою теорию расширения газов в орудии.

К началу 19 в. о явлении выстрела артиллеристы знали все еще очень мало. Известный русский ученый-артиллерист **Платов** отмечал в 1839 г.: «Можно заключить без большой ошибки, что теория пороха составляла до сих пор для артиллериста предмет более любопытный, нежели полезный».

Полоса экспериментов

В первой половине 19 века значительное развитие получили представления о горении пороха и о превращении химической энергии пороха в механическую энергию движения снаряда. Этому способствовало развитие химии и термодинамики.

В 1823 г. **Гей-Люссак** впервые определил химический состав пороховых газов и порохового остатка.

Горение пороха на воздухе изучал в 30-х годах французский генерал **Пиобер**, который обнаружил, что плотный дымный порох способен гореть параллельными слоями; это позволило решить вопрос о законе образования пороховых газов.

В России законы образования газов при горении пороха призматической и сферической форм были полу-

чены первым преподавателем внутренней баллистики в Артиллерийской академии полковником **П. М. Альбицким**. В 1869 г. он был за это удостоен большой Михайловской премии, присуждаемой артиллеристам за выдающиеся научные труды и изобретения. В 1870 г. **П. М. Альбицкий** составил первое в нашей стране литографированное руководство по внутренней баллистике.

Наиболее полной работой по изучению горения пороха при малых давлениях была работа известного русского химика **Л. Н. Шишкова**, которую он провел за границей в лаборатории **Бунзена** в 1857 г.

Дальнейшим шагом в изучении горения пороха была работа полковника **Н. П. Федорова**, выполненная в 1868 г. в созданной **Л. Н. Шишковым** первоклассной химической лаборатории Артиллерийской академии.

В 1868 г. для изучения горения пороха английскими учеными **Ноблем** и **Эйблом** была создана манометрическая бомба. После изобретения в 1883 г. французскими артиллеристами **Сарро** и **Вьелем** регистрирующего устройства для записи кривой давления в манометрической бомбе стало возможным изучать горение пороха и образование пороховых газов при больших давлениях.

Теоретические обобщения

Для расчета толщины стенок ствола нужно было знать кривую давления в функции от пути, пройденного снарядом в орудии. Еще в 1856 г. выдающийся русский ученый-артиллерист **Н. В. Маиевский** разработал метод построения такой кривой для любого орудия на основании опытов, а десять лет спустя дал теоретический способ построения кривой давления в орудии. Спроектированная **Н. В. Маиевским** с использованием кривой давления 60-фунтовая пушка оказалась лучше других русских и иностранных орудий.

Наряду с механической точкой зрения на явление выстрела в 19 в. стала развиваться энергетическая точка зрения (в особенности после открытия закона сохранения энергии). Во внутренней баллистике закон сохранения энергии был применен французским ученым **Резалем**, получившим в 1864 г. уравнение баланса энергии в орудии.

Открытие в конце 80-х годов бездымного пороха потребовало приведения теории внутренней баллистики в соответствие с новыми данными о горении бездымного пороха. Эту задачу с успехом выполнил полковник морской артиллерии **А. Ф. Бринк**, читавший с 1892 г. курс внутренней баллистики в Артиллерийской академии. В 1901 г. **А. Ф. Бринк** издал наиболее полный в то время Курс внутренней баллистики, который был переведен в Германии и США.

Первое математически точное решение системы уравнений внутренней баллистики принадлежит русскому артиллеристу профессору **Н. Ф. Дроздову** (опубликовано в 1904 г.). Однако наряду с точным решением **Н. Ф. Дроздова** на практике использовались эмпирические методы, более удобные в применении.

Так, в 1904 г. крупный русский баллистик **Н. А. Забудский** получил известные эмпирические формулы для определения начальной скорости и наибольшего давления.

Внутренняя баллистика в СССР

Особенно успешно стала развиваться внутренняя баллистика в нашей стране после победы Октября. С 1918 по 1926 г. основные проблемы внутренней баллистики, как отмечалось во второй главе, разрабатывались в Комиссии особых артиллерийских опытов (Косартоп), которой руководил известный русский артиллерист **В. М. Трофимов**. В комиссию входили видные ученые страны **Н. Е. Жуковский**, **С. А. Чаплыгин**, **А. Н. Крылов** и ученые-артиллеристы **Н. Ф. Дроздов**, **И. П. Граве**, **В. А. Пашкевич** и многие другие. В Косартопе готовились молодые кадры баллистиков, из которых выросли крупные ученые профессора **М. Е. Серебряков**, **Д. А. Вентцель**, **Б. Н. Окунев**, **В. Е. Слухоцкий**.

В Артиллерийской академии долгие годы внутренней баллистикой плодотворно занимался профессор **И. П. Граве**, создавший баллистическую лабораторию и написавший обширный Курс внутренней баллистики. Большое внимание **Граве** уделял разработке вопросов горения пороха в полузамкнутом объеме, что имело прямое отношение к теории пороховых реактивных снарядов.

В 20-х годах **Н. Ф. Дроздов** на основании своего точного метода составил первые таблицы внутренней баллистики.

Большой вклад сделал инженер **Н. А. Упорников**, под руководством которого в 1934 г. были составлены полные таблицы пиродинамических элементов (таблицы АНИИ). На базе таблиц АНИИ впоследствии были созданы таблицы внутренней баллистики ГАУ под редакцией **С. И. Ермолаева** и **В. Е. Слухоцкого**.

В 1935 г. профессор **Б. Н. Окунев** предложил относительные переменные, которые позволили ему создать более универсальные таблицы.

При составлении таблиц внутренней баллистики большое значение имело применение методов численного интегрирования дифференциальных уравнений. Применением и развитием методов численного интегрирования во внутренней баллистике занимались **А. Н. Крылов**, **В. М. Трофимов**, **Н. А. Упорников**, **Г. В. Оппоков**, **Б. Н. Окунев**.

Развитием методов внутренней баллистики (в частности, изучением газодинамических процессов явления выстрела) занимались профессора **М. С. Горохов**, **М. А. Мамонтов**, **Б. В. Орлов**.

В настоящее время внутреннюю баллистику у нас развивают научные работники, работающие во многих организациях.

Слово за техникой эксперимента

В середине нашего столетия, по-видимому, завершился один из этапов развития внутренней баллистики, основанный на экспериментальных данных, полученных еще в конце прошлого века.

Сейчас имеются возможности глубже проникнуть в явление выстрела и первое слово в этом остается за экспериментаторами. Эксперимент всегда во внутренней баллистике играл важную роль. В экспериментальной баллистике были разработаны оригинальные методы измерений и разнообразная аппаратура. Многие из этого вышли за пределы баллистики и стало достоянием исследователей в других областях знаний. Например, в баллистике зародились аэродинамическая труба, искровая фотография, статические и динамические методы

измерения высоких давлений, хронометры для измерения быстротечных процессов, аппаратура для измерения высоких температур и т. д.

Можно с уверенностью сказать, что дальнейший прогресс во внутренней баллистике зависит главным образом от успехов в создании новых методов и новой техники эксперимента*.

По-прежнему в центре внимания остаются экспериментальные работы по горению пороха и порохового заряда. Предстоит пересмотреть систему характеристик пороха, дополнив ее новыми параметрами, а главное более совершенными методами их определения. Требуют внимательного экспериментального изучения предварительный период и период форсирования в явлении выстрела. Получат дальнейшее усовершенствование в направлении повышения точности и доступности приборы для измерения давления пороховых газов и скорости снаряда в канале ствола орудия.

На новом этапе эксперимент поможет уточнить химические, тепловые, механические, газодинамические и другие процессы, протекающие во время выстрела в орудии.

Большую роль в постановке экспериментов и в обсуждении результатов должна сыграть теория подобия, развитию которой во внутренней баллистике всегда уделялось особое внимание.

Реальный выстрел из орудия с подробным описанием условий стрельбы и регистрацией возможно большего числа параметров остается важным средством для получения наиболее достоверных экспериментальных данных. Поэтому методика экспериментальных стрельб и техническое их оснащение должны соответствовать современному научно-техническому уровню.

Вычислительные машины-помощники

Если раньше вычислительные возможности ручного счета сдерживали развитие и особенно применение точных методов решения задач внутренней баллистики, то теперь в связи с громадными достижениями в области

* Здесь и далее излагаются мнения, опубликованные в открытой печати.

вычислительной техники эти ограничения практически сняты полностью.

При решении задач внутренней баллистики открываются возможности учитывать процессы, которые раньше относились к разряду второстепенных, а основные процессы явления выстрела рассматривать с большей глубиной и с использованием самых современных научных теорий и методов. Система уравнений внутренней баллистики может быть пополнена новыми зависимостями без боязни затруднить ее решение и исследование.

Вычислительная машина способна сравнить и оценить большое число вариантов баллистических решений, что делает более надежной методику баллистического проектирования орудий различных конструктивных схем.

Вычислительная машина помогает накапливать и обрабатывать информацию, характеризующую условия эксплуатации артиллерии, и использовать достижения внутренней баллистики при подготовке и проведении практических стрельб.

Проблемы, проблемы...

В истории развития науки бывают периоды, когда кажется, что все основные проблемы науки решены. Нечто подобное произошло в 50-х годах во внутренней баллистике, когда один известный баллистик в полшутливой форме утверждал, что он не видит больше проблем для решения.

Научно-техническая революция всколыхнула умы исследователей, выдвинула новые задачи в науке, дала в руки ученых более совершенные средства для исследований.

Дальнейшее развитие внутренней баллистики должно пойти по линии углубления наших знаний о химических, термодинамических, газодинамических, механических и других процессах, происходящих в орудии.

Ждут разрешения вопросы, связанные с воспламенением и горением порохового заряда с учетом перемещения зерен пороха. Потребуется дополнить механические, термодинамические и газодинамические представления о явлении выстрела результатами, которые даст изучение термохимических процессов. Должна быть решена

и доведена до практического применения задача Лагранжа о движении газообразных продуктов горения пороха в заснарядном пространстве.

Очень важной практической задачей считается задача о назначении веса заряда без стрельбы. Успех в этом деле в большой степени будет зависеть от уточнений системы уравнений внутренней баллистики и методов определения баллистических характеристик пороха. Первоочередной задачей по уточнению системы уравнений считается исследование сил сопротивления движения снаряда и тепловых потерь через стенки ствола.

В орудиях более сложных схем потребуется изучить дополнительные процессы, свойственные данной схеме, и учесть их при решении задач внутренней баллистики.

Сегодня отчетливо вырисовываются новые горизонты одной из главнейших артиллерийских наук — внутренней баллистики.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Бринк А. Ф. Внутренняя баллистика. Спб., 1901.
2. Серебряков М. Е. Внутренняя баллистика. М., Оборонгиз, 1949.
3. Корнер Дж. Внутренняя баллистика. Пер. с англ. Издательство иностранной литературы, 1953.
4. Зарубежные журналы за 1960—1970 гг.
5. Журнал «Memoriale de l'artillerie française», 1960—1970.

О Г Л А В Л Е Н И Е

| | <i>Стр.</i> |
|---|-------------|
| От автора | 3 |
| Повышать баллистическую культуру (вместо предисловия) | 5 |
| Глава 1. Артиллерийское орудие — тепловая машина | 7 |
| Многообразие качеств орудия | — |
| Орудие — древнейшая тепловая машина | 9 |
| Порох как топливо особого вида | 12 |
| Преобразование энергии при стрельбе | 17 |
| Коэффициент полезного действия орудия | 19 |
| Глава 2. Чем занимается внутренняя баллистика? | 21 |
| Баллистика — наука о движении снаряда | — |
| Цель — пиродинамические кривые | 22 |
| Задачи выдвигает артиллерийская практика | 25 |
| Диапазон интересов: от расчета до эксплуатации | 27 |
| Глава 3. Явление выстрела | 30 |
| Пять периодов за доли секунды | — |
| Процессы основные и второстепенные | 31 |
| Все начинается с горения пороха | 33 |
| Законы горения пороха | 35 |
| Образование пороховых газов | 39 |
| Пороховые газы совершают работы | 44 |
| Движение снаряда в орудии | 46 |
| Истечение пороховых газов | 47 |
| Глава 4. Параметры внутренней баллистики | 49 |
| Роль параметров | — |
| Знакомство с параметрами | 51 |
| Внимание давлению форсирования | 53 |
| Пределы изменения параметров | 56 |
| Подобие артиллерийских систем | 57 |
| Глава 5. От чего зависит начальная скорость снаряда? | 59 |
| О начальной скорости снаряда | — |
| Измерение скорости снаряда | 61 |
| Влияние параметров | 64 |
| Учет износа канала ствола | 67 |
| Еще о влиянии параметров | 68 |
| Скоростной барьер | 70 |
| Рассеивание начальных скоростей | 71 |
| Глава 6. Как назначают заряд? | 73 |
| Двойное действие заряда | — |

| | <i>Стр.</i> |
|---|-------------|
| Измерение давления пороховых газов | 74 |
| О марке пороха | 76 |
| Расчет заряда | 78 |
| Подбор заряда стрельбой | 81 |
| Глава 7. Внутренняя баллистика рекомендует | 83 |
| Исходный вариант орудия | — |
| Каким быть орудию? | 85 |
| Взгляд на боеприпасы | 87 |
| Пути модернизации | 89 |
| Подход к эксплуатации | 90 |
| Глава 8. От прошлого к будущему | 93 |
| Накопление фактов | — |
| Полоса экспериментов | 94 |
| Теоретические обобщения | 95 |
| Внутренняя баллистика в СССР | 96 |
| Слово за техникой эксперимента | 97 |
| Вычислительные машины-помощники | 98 |
| Проблемы, проблемы... | 99 |
| Использованная литература | 101 |

Чурбанов Евгений Васильевич

**ВНУТРЕННЯЯ БАЛЛИСТИКА АРТИЛЛЕРИЙСКОГО
ОРУДИЯ**

Редактор *Ю. А. Николаев*

Технический редактор *А. Н. Медникова* Корректор *Л. А. Кузьмичева*

Г-14021. Сдано в набор 31.12.71 г. Подписано к печати 18.7.72 г.
Формат бумаги 84×108¹/₃₂ — 3¹/₄ печ. л. 5,46 усл. печ. л. 4,84 уч.-изд. л.

Бумага типографская № 2 Тираж 9 500 экз.

Изд. № 5/4818. Цена 17 коп. Зак. 15

Ордена Трудового Красного Знамени
Военное издательство Министерства обороны СССР
103160, Москва, К-160

1-я типография Воениздата
103006, Москва, К-6, проезд Скворцова-Степанова, дом 3