

Показатели достигнутого потребления, производства продукции и вкладов в модернизацию приведены в табл. 4. Здесь эти показатели тоже отличаются незначительно, хотя вклад в НТП (модернизацию) у первого элемента выше всех.

Таблица 4. Потребление и производство в активных элементах

<i>i</i>	Потребление	Производство	Вклад в НТП
1	0,43	1,6	2,75
2	0,37	1,6	2,0
3	0,51	1,5	1,85

Сравнивая варианты, можно сказать, что для производственных элементов лучше ставить две цели – производство и потребление, а центру выгоднее получать максимальную прибыль. Развитие производства при этом происходит за счет целей производственных элементов.

Список литературы

1. Новиков, Д. А. Курс теории активных систем / Д. А. Новиков, С. Н. Петраков. – М. : СИНТЕГ, 1999. – 108 с.
2. Тенев, В. А. Решение задачи многокритериальной оптимизации генетическими алгоритмами. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ. – 2006 – № 2. – С. 103–108.

УДК 623.522

А. В. Кулагин, кандидат технических наук, доцент
Ижевский государственный технический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ВТОРОСТЕПЕННЫХ РАБОТ В ОГНЕСТРЕЛЬНОМ ОРУЖИИ

В статье исследуются теоретические и экспериментальные данные штатных нарезных систем артиллерийского и стрелкового оружия по второстепенным работам в ходе выстрела. Предлагается возможность более детального исследования и универсализации давления форсирования и силы сопротивления движению пули (снаряда) как одной из основных внутриваллистических характеристик второстепенных работ.

Выстрел из огнестрельного оружия представляет собой довольно сложный процесс быстрого превращения химической энергии порохового заряда в тепловую и кинетическую энергии взаимосвязанной системы снаряд–заряд–оружие.

Процесс выстрела начинается с воспламенения порохового заряда и заканчивается, если не рассматривать последствие пороховых газов, в момент вылета снаряда из дульного среза ствола.

Пороховые газы, образующиеся при горении заряда, в процессе выстрела совершают различного рода работы по перемещению взаимосвязанной системы снаряд–заряд–оружие и теряют часть своей энергии под охлаждающим влиянием стенок ствола (потери на теплоотдачу).

Работу газов, затраченную на перемещение снаряда и равную его кинетической энергии поступательного движения $E_q = \frac{qV^2}{2g^2}$, принято называть главной основной

работой. В этой формуле q – вес снаряда, V – дульная скорость снаряда, g – ускорение свободного падения.

Все другие виды работ, совершаемые газами, называются второстепенными работами.

В их число включают и все потери тепловой энергии (охлаждение газов в результате теплообмена со стенками ствола, потеря тепла в результате прорыва газов), эквивалентные некоторому количеству механической работы.

В обыкновенных артиллерийских орудиях и системах стрелкового оружия с цилиндрической нарезной частью кинетическая энергия поступательного движения

$$\frac{qV^2}{2g}$$

составляет основную долю полной работы пороховых газов и обычно больше

не только каждой из второстепенных работ в отдельности, но и суммы второстепенных работ. Доля последних в общей работе газов изменяется в довольно широких пределах в зависимости от особенностей устройства снаряда и оружия.

Если в артиллерийских орудиях среднего и крупного калибра второстепенные работы составляют от 5 до 15 % полной работы пороховых газов, то в стрелковом оружии на их долю приходится уже от 30 до 40 %. Более того, если принять во внимание потерю пороховыми газами тепловой энергии в процессе выстрела, то удельный вес второстепенных работ будет еще больше, особенно в стрелковом оружии, где тепловые потери становятся сравнимыми с основной работой.

Таким образом, появление второстепенных работ и их величина связаны не только с характером самого процесса выстрела, но и с особенностями устройства снаряда и орудия. Значение их в балансе энергий системы снаряд–заряд–оружие неодинаково для различных систем, а влияние их на процесс выстрела возрастает при переходе от крупных калибров к более мелким, и особенно значительно в стрелковом оружии.

В настоящее время при исследовании внутрибаллистических процессов рассматриваются и учитываются при выводе основных уравнений следующие второстепенные работы:

1. E_1 – работа вращательного движения снаряда, равная его кинетической энергии во вращательном движении.
2. E_2 – работа по сообщению движения газам и несгоревшим частицам пороха, равная сумме их кинетических энергий.
3. E_3 – работа отката, равная кинетической энергии откатных частей.
4. E_4 – работа, затрачиваемая на преодоление сопротивления, возникающего между боевой гранью нарезов и ведущей частью снаряда за счет реакции нарезов.

Эти работы при выводе основных уравнений (уравнения Резаля и уравнения движения снаряда) учитываются путем введения в эти уравнения коэффициента учета второстепенных работ $\varphi > 1$, который называют обычно коэффициентом фиктивности массы [1]. Основная работа газов принимается равной единице, и тогда коэффициент φ показывает, какую часть от основной работы составляют учитываемые второстепенные работы.

На первых порах, пока неизвестны конструктивные данные о нарезах орудия, φ можно вычислять по упрощенным формулам, например по формуле В. Е. Слуцкого

$$\varphi = K + b \frac{\omega}{q},$$

где ω – вес заряда; K – суммарный коэффициент, учитывающий все виды работ, за исключением работы на перемещение газов и заряда [1]:

$K = 1,06$ – для гаубиц;

$K = 1,04 \dots 1,05$ – для пушек средней мощности;

$K = 1,03$ – для пушек большой мощности;

$K = 1,10$ – для стрелкового оружия;

$b = f(\Lambda, \chi)$ берут по таблице [1], обычно $b = 0,03 - 0,13$. $\Lambda = \frac{l}{l_0}$ – относительная

длина пути снаряда, $\chi = \frac{l_0}{l_{\text{кам}}}$ – коэффициент уширения каморы.

К числу других работ или потерь энергии, не учитываемых непосредственно в основном по причине трудности определения их выражений и неизученности явлений, которыми они сопровождаются, и являющихся наиболее важными с точки зрения их влияния на баллистику выстрела, относятся:

5. E_5 – работа врезания ведущей части снаряда в нарезы ствола.

6. E_6 – работа результирующей составляющей сил трения по полям и доньям нарезов.

7. E_7 – потери тепла на теплоотдачу, эквивалентные механической работе.

Работа E_5 , затрачиваемая на врезание ведущей части снаряда (пули) в нарезы ствола, имеет, на первый взгляд, только местное значение, т. к. сопротивление врезанию, которое может быть довольно значительным по своей величине, действует только на сравнительно малом пути врезания ведущей части снаряда до полной глубины нарезов. Для большинства существующих артиллерийских орудий путь полного врезания пояса снаряда $l_{\text{п.в}}$ составляет меньше половины калибра. Поэтому и величина работы врезания по сравнению с основной работой газов в момент вылета снаряда из канала ствола будет пренебрежительно малой. Такого рода оценка приведена, например в [2].

На этом основании, а также по причине того, что переменная сила сопротивления врезанию снаряда в условиях выстрела неизвестна, работой врезания обычно пренебрегают и учитывают лишь начальное сопротивление движению снаряда по следующей схеме: снаряд не начинает двигаться до тех пор, пока давление в камере не достигнет некоторой величины p_0 , называемой давлением форсирования. После того, как давление достигнет этого значения, снаряд начинает двигаться, встречая только сопротивление реакции нарезов на боевых гранях, которое учитывается с помощью коэффициента фиктивности.

При такой упрощенной схематизации начального периода движения снаряда не следует забывать о некоторых обстоятельствах, которые, как мы увидим дальше, имеют немаловажное значение во внутренней баллистике стрелкового оружия.

Во-первых, при оценке величины работы врезания следует учитывать, что к моменту конца врезания снаряда будет мала не только работа врезания E_5 , но также и работа пороховых газов. Тогда относительная величина работы врезания не будет пренебрежимо малой по сравнению с полной работой газов к этому моменту, потому что сравнение надо проводить для одного и того же момента времени или определенного значения пройденного пути.

Во-вторых, следует считаться с тем, что учет начального сопротивления при врезании посредством введения так называемого давления форсирования p_0 представляет грубую схему, которая не всегда может быть применима с должным успехом.

Учет начального сопротивления движению пули в периоде врезания посредством введения давления форсирования p_0 должен приводить к значительному искажению характера изменения давления газов, скорости и пути пули в канале ствола не только на начальном участке движения пули, но и на протяжении всего периода выстрела.

Что касается работы E_6 , затрачиваемой на преодоление сопротивления сил трения по доньям и полям нарезов, то ее не учитывают в силу трудности получения ее выражения, т. к. ни значение коэффициента трения f , ни величина радиального взаимодействия между стволом и ведущей частью снаряда (пули) в условиях выстрела неизвестны. По этой же причине при выводе уравнения баланса энергии (Резаля) обычно непосредственно не учитывается и количество тепла E_7 , поглощаемого стенками ствола, хотя попытки косвенного учета ее можно встретить во многих работах [1].

Среди многочисленных проблем внутренней баллистики, поставленных ранее или возникающих по мере ее развития, проблема учета второстепенных работ является далеко не новой и, тем не менее, до сих пор еще полностью не решена.

Важность этой проблемы, ее значение для теории внутренней баллистики определяется тем, что она является частью более общей проблемы – основной задачи внутренней баллистики, т. е. проблемы, заключающейся в определении теоретическим путем закона изменения скорости снаряда и давления пороховых газов в канале ствола данного орудия при заданных условиях заряжания.

Если основная задача внутренней баллистики не получила до настоящего времени совершенно удовлетворительного решения, и многие ее стороны теоретически не освещены, то в значительной степени это объясняется тем, что в теоретических зависимостях, полученных на основе упрощающих допущений, не отражено (наряду с другими факторами, зависящими в основном от особенностей горения порохов) в достаточно полной мере влияние второстепенных работ на процесс выстрела.

Как уже неоднократно подчеркивалось, правильный учет второстепенных работ имеет особенно важное значение во внутренней баллистике стрелкового оружия.

Не существует никакой принципиальной разницы между орудием самого крупного калибра и малокалиберным пистолетом. Тем не менее, стрелковое оружие обладает некоторыми специфическими особенностями, которые, по-видимому, и дали Дж. Корнеру основание отнесения их даже к типу специальных орудий.

Корнер отмечает следующие наиболее важные особенности [2]:

- 1) Значительно более высокая чувствительность к особенностям воспламенения.
- 2) Большая роль охлаждения газов вследствие передачи тепла стенкам ствола, что объясняется большим отношением поверхности канала к его объему.
- 3) Отсутствие ведущих поясков у снарядов этого вида оружия, что является характерной отличительной чертой пуль от снарядов. Пули врезаются в нарезы своей оболочкой, изготовленной из мягкого металла.
- 4) Частое применение флегматизированных порохов с замедленной скоростью горения наружных слоев зерна.
- 5) Значительно большая величина относительного пути пули к моменту полного врезания, что объясняется большей относительной длиной ведущей части пули и малым углом конического ската нарезов.
- 6) Наибольший диаметр пули меньше диаметра канала ствола по дну нарезов (отсутствует форсирование по доньям нарезов).

Все эти особенности приводят к тому, что в баллистическом отношении стрелковое оружие отличается от орудий более крупного калибра. Поэтому баллистические характеристики более мощных систем нельзя просто переносить на малокалиберное оружие.

С точки зрения баллистики выстрела наиболее существенными особенностями стрелкового оружия являются увеличение потерь тепла в результате большого охлаждающего влияния стенок ствола и увеличение относительной величины работы силы сопротивления при врезании и движении пули.

Между тем, как раз эти второстепенные работы во всех существующих аналитических методах решения основной задачи внутренней баллистики либо совсем не учитываются, либо учитываются только частично или косвенным путем.

Естественно ожидать, что применение таких методов к решению задачи для стрелкового оружия без учета указанных факторов не может дать хороших результатов, и данные расчета будут значительно отличаться от действительности.

Известно, что аналитические методы решения основной задачи внутренней баллистики или таблицы, составленные на основе этих методов, позволяют с удовлетворительной для практики точностью решать ряд задач для орудий больших (по сравнению с калибром стрелкового оружия) калибров. Например, точное решение основных уравнений, полученных на основе весьма грубых допущений, по методу профессора Н. Ф. Дроздова дает неплохое совпадение расчетных данных с опытными данными по отношению к артиллерийским орудиям, как при решении прямой задачи, так и при баллистическом проектировании. Это указывает на то, что та схема, которая была принята за основу при составлении основных уравнений, правильно отражает реальные явления, происходящие при выстреле в условиях рассматриваемой задачи.

Совершенно иные результаты мы получим, если будем решать по тем же таблицам или аналитическим путем аналогичные задачи для стрелкового оружия. Расчетные данные, как правило, имеют значительное отличие от опытных данных.

Для согласования расчета с опытом в этом случае необходимо значительно изменить некоторые численные величины, имеющие определенный физический смысл, и величина которых не должна зависеть от условий выстрела. При этом нет никакой уверенности в том, что такое согласование расчетных данных с опытом в отдельных точках (например, максимума давления или дульной скорости) гарантирует совпадение согласуемых величин и в промежуточных точках.

Из всего сказанного выше о специфических особенностях стрелкового оружия следует, что явление выстрела в этом случае протекает в несколько иных условиях, чем в обыкновенных артиллерийских орудиях. Следует подчеркнуть, что здесь речь идет не о принципиальных различиях, которых не может быть, а о различиях в частностях, деталях, но, тем не менее, существенных для внутренней баллистики стрелкового оружия.

Чтобы правильно описывать как с качественной, так и с количественной стороны процесс выстрела, теория должна учитывать подобные особенности. Это может быть возможным только при более углубленном, чем до сих пор, изучении явлений, которые происходят при стрельбе, и правильной оценке влияния различных факторов на процесс выстрела.

Экспериментальные данные, полученные различными авторами, подтверждают тот несомненный факт, что в стрелковом оружии влияние на баллистику выстрела таких факторов, как тепловые потери в результате поглощения стенками тепла,

работа силы сопротивления при врезании и движении пули по нарезному каналу и других работ возрастают по сравнению с влиянием их в обычных орудиях более крупного калибра.

Однако имеющихся данных еще недостаточно для полного представления о характере протекания отдельных явлений при выстреле и тем более их недостаточно для удовлетворительного решения основной задачи внутренней баллистики стрелкового оружия.

Малое количество опытных данных по затронутым вопросам объясняется исключительной сложностью и трудностью проведения исследований в тех условиях, при которых происходит выстрел, и связанных с малой продолжительностью явлений и развивающимися при этом большими силами и высокими температурами.

Как во всякой другой области, изучение таких явлений стало возможным в связи с развитием техники эксперимента и с появлением специальной аппаратуры для баллистических измерений.

Более детально изучим только некоторые аспекты, которые могут стать базовыми при изучении влияния второстепенных работ. Для начала проанализируем опытные данные относительно давления форсирования p_0 , принимаемого при решении основной задачи для стрелковых систем, в частности для 7,62-миллиметровой винтовки [3–5].

Опытные данные о величине максимальной силы сопротивления R_m для различных пуль (1630 н, 2160 н, 2280 н) показывают, что при определении величины давления форсирования по способу профессора М. Е. Серебрякова [1] $p_0 = \frac{R_m}{S}$ для винтовочных пуль получаются следующие значения:

$$\text{для легкой } p_0 = \frac{1630 \text{ н}}{0,48 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2} = 840 \cdot 10^5 \frac{\text{н}}{\text{м}^2};$$

$$\text{для тяжелой } p_0 = \frac{2160 \text{ н}}{0,48 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2} = 450 \cdot 10^5 \frac{\text{н}}{\text{м}^2};$$

$$\text{для бронебойной } p_0 = \frac{2280 \text{ н}}{0,48 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2} = 475 \cdot 10^5 \frac{\text{н}}{\text{м}^2}.$$

Одновременно с измерением максимальной силы сопротивления R_m определялась и величина давления газов в камере p_m в этот же момент.

Сопоставим полученные значения максимальной силы R_m , давления форсирования p_0 и давления газов p_m и p_m (табл. 1) [5]. Из этой таблицы видно, что действительное давление газов в камере p_m , которое по своей величине мало отличается от максимального давления p_m , в 6–8 раз больше давления форсирования p_0 , определяемого по способу профессора М. Е. Серебрякова.

Оба давления p_0 и p_m относятся к одному и тому же значению пройденного пулей пути $l_{п.в}$ в конце его врезания (форсирования). Если бы разница между указанными значениями давления p_0 и p_m была не столь значительной, какой она получилась при эмпирическом подходе, а была бы меньше, например, получила бы отношение $\frac{p_m}{p_0} \approx 1 \div 2$, то в этом ничего особенного нельзя было бы увидеть.

При выстреле пуля начинает движение раньше и приобретает к концу полного врезания скорость, отличную от нуля. Поэтому действительное давление газов в камере p_m в момент полного врезания пули (снаряда) всегда должно получиться

немного больше принимаемого при расчетах давления форсирования p_0 , определяемого из условия $p_0 = \frac{R_m}{S}$.

Таблица 1. Максимальная сила сопротивления, давление форсирования, давление газов в камере и в районе максимума

Тип пули	R_m , н	$p_0 = \frac{R_m}{S}$, МПа	p_m , МПа	p_m , МПа	$\frac{p_m}{p_0}$
Легкая	1534	34	268	287	7,9
Тяжелая	2159	45	294	301,5	6,3
Бронебойная	2280	47,5	288,5	301,8	6,0

Опытные данные показывают значительное расхождение между p_0 и p_m , что заставляет задуматься о численных величинах давления форсирования, которые приняты в настоящее время при решении основной задачи внутренней баллистики для систем стрелкового оружия.

При решении основной задачи любым методом понятие о давлении форсирования вводится для учета того начального сопротивления, которое встречает пуля (снаряд) в процессе врезания в нарезы ствола.

Сопротивление движению пули (снаряда) в этот период возрастает постепенно и достигает своего наибольшего значения в момент полного врезания ведущей части.

Следует отметить, что задача о постепенности нарастания силы сопротивления не имеет пока аналитически точного решения, поэтому можно учитывать только наибольшее сопротивление в момент врезания пули (снаряда) путем введения давления форсирования по следующей схеме [4]: врезание ведущей части пули (снаряда) в нарезы совершается мгновенно, а движение самой пули (снаряда) начинается только после того, как давление газов достигнет некоторой величины p_0 , равной давлению форсирования.

В самом деле, давление форсирования призвано учитывать тот реальный факт, что до конца полного врезания ведущей части пули (снаряда) порох в заснарядном пространстве горит при слабо изменяющемся объеме, который считается постоянным и равным начальному объему.

Последнее утверждение можно считать верным и применение давления форсирования достаточно обоснованным, если путь пули (снаряда) к моменту полного врезания $l_{п.в}$ будет мал по сравнению с приведенной длиной камеры $l_0 = \frac{W_0}{S}$, т. е. изменение объема камеры будет малым.

В этом случае при правильно выбранном значении давления форсирования p_0 и коэффициенте фиктивности ϕ можно ожидать, что расчетные значения давления $p(l)$ и скорости движения пули (снаряда) по каналу ствола $v = v(l)$ при данных условиях заряжания для конкретной системы оружия изначально будут мало расходиться с действительными значениям.

По-видимому, указанное допущение достаточно хорошо оправдывается на практике по отношению к орудиям крупного и среднего калибра, для большинства из которых путь полного врезания ведущего пояса составляет меньше полукалибра $l_{п.в} < 0,5d$.

В случае, если первоначальный объем каморы до конца полного врезания пули (снаряда) изменяется значительно, т. е. пуля (снаряд) к этому моменту проходит значительный путь, то расчетное давление $p(l)$, начинающееся от значения p_0 , равного давлению форсирования, будет с самого начала значительно расходиться с опытным давлением, следовательно, будет расходиться также и расчетная скорость $v = v(l)$.

Введение давления форсирования, определяемого по величине максимального усилия врезания, может стать причиной большого расхождения между расчетными и опытными значениями давления газов, скорости, пути и при движении снаряда в канале ствола.

Такая опасность весьма реальна при решении основной задачи для стрелкового оружия, хотя в меньшей степени она имеет место и по отношению к орудиям более крупных калибров.

В качестве примера на основании чертежных размеров каморы и при непосредственных измерениях установлено, что в 7,62-миллиметровой винтовке путь пули до момента полного врезания равен приблизительно $l_{п.в} = 25$ мм или $l_{п.в} = 3,4d$. В результате можно сделать вывод, что увеличение запульного пространства к концу врезания составляет:

$$\text{для легкой пули } \delta W_{п.в} = \frac{26}{82,1} = 31,7 \%;$$

$$\text{для тяжелой пули } \delta W_{п.в} = \frac{26}{77,1} = 33,7 \%.$$

Однако для любых артиллерийских орудий эта величина в несколько раз меньше.

Кроме различия в изменении начального объема до конца полного врезания можно указать еще на другую особенность пули по сравнению с поясковым снарядом. Эта особенность связана с тем, что ведущие пояски снарядов имеют положительное форсирование по диаметру, под которым понимают превышение первоначального наружного диаметра пояса над диаметром ствола по доньям нарезов, а у пули такое форсирование отсутствует.

При врезании снаряда его пояс сначала обжимается коническим скатом каморы до определенного диаметра и только после этого начинается его врезание в нарезы ствола. Поэтому сила сопротивления с самого начала возрастает очень быстро. На участке своего врезания снаряд перемещается медленно, а это в сочетании с малым относительным изменением начального объема заснарядного пространства приводит к тому, что горение пороха до конца врезания происходит в слабо изменяющемся объеме, который в первом приближении можно считать постоянным.

При врезании пули сопротивление сначала возрастает слабо, особенно на участке движения пули от начального положения до упора ее оболочки в нарезы, затем оно быстро растет до максимального значения в момент полного врезания.

Давление газов в каморе сначала также растет медленно, а с началом интенсивного врезания пули (с ростом сопротивления) начинает быстро возрастать и к моменту полного врезания пули достигает значения, которое не намного меньше максимального давления p_m (табл. 1).

К этому моменту пуля проходит значительный путь (порядка 3,4 калибра) и приобретает большую скорость (порядка 150...200 м/с) [4; 5].

Таким образом, при стрельбе пулями, например из винтовки, горение пороха от начала движения пули до конца его врезания происходит в объеме, который даже в первом приближении нельзя считать постоянным, как это можно было сделать по отношению к орудиям.

Оценим теперь, к каким изменениям расчетных кривых $p(l)$ и $v(l)$ по сравнению с их действительными значениями может привести учет начального сопротивления посредством введения давления форсирования, определяемого по величине максимальной силы сопротивления $p_0 = \frac{R_m}{S}$, если допустить, что влияние всех прочих

факторов, имеющее место в действительности, полностью учитывается в решении.

При выстреле движение пули начинается при давлении газов p_n , определяемом усилием выталкивания пули из гильзы ($p_n \leq 10 \dots 15$ МПа), а при решении основной задачи считают, что движение пули начинается при давлении форсирования $p_0 = 30 \dots 45$ МПа.

Во втором случае порох горит под большим давлением, чем в первом, следовательно, расчетная кривая давления $p(l)$ с самого начала пойдет выше опытной; соответственно этому расчетная скорость $v(l)$ на начальном участке будет больше действительной.

Поскольку величина давления газов зависит одновременно, с одной стороны, от скорости газообразования $\frac{d\psi}{dt}$, с другой стороны, от быстроты увеличения объема запульного пространства, зависящей от скорости пули v , то расчетная величина наибольшего давления p_m получится при меньшем значении пути пули, чем опытное давление p_m ($l_{m \text{ расч}} < l_{m \text{ оп}}$), т. к. при большем значении v скорее наступит соответствие между $\frac{d\psi}{dt}$ и $\frac{dW}{dt} = Sv$.

При одинаковом наибольшем давлении p_m , к чему всегда стремятся при расчетах, относительная доля сгоревшей части заряда ψ_m к моменту наибольшего давления на опыте будет больше, чем в расчете ($\psi_{m \text{ расч}} < \psi_{m \text{ оп}}$), т. к. $l_{m \text{ расч}} < l_{m \text{ оп}}$.

Очевидно также, что опытная диаграмма $p(l)$ на начальном участке до максимума давления будет более растянутой, чем это получается в расчете, т. к. в действительности порох в это время горит более медленно (под меньшим давлением).

После достижения наибольшего значения p_m расчетная кривая $p(l)$ пойдет ниже опытной вплоть до вылета пули, что вполне понятно из того, что падение расчетного давления начинается при меньшем значении пути, в то время как действительное давление еще возрастает.

В силу того, что $\psi_{m \text{ расч}} < \psi_{m \text{ оп}}$ и после достижения наибольшего давления p_m , порох на опыте горит под большим давлением, чем это получается в расчете, конец горения на опыте наступает на меньшей длине пути l_k , чем дает расчет ($l_{k \text{ оп}} < l_{k \text{ расч}}$).

Все указанные выводы относительно значительного искажения расчетной кривой давления $p(l)$ под влиянием нерационального выбора величины давления форсирования на основе установившегося взгляда по сравнению с опытной кривой подтверждаются как опытными данными, так и расчетами, проведенными при разных значениях давления форсирования p_0 [1; 5].

В упомянутой работе [1] профессора М. Е. Серебрякова проведено сравнение результатов двух расчетов при различных значениях давления форсирования

и одинаковых прочих условиях заряжания, обеспечивающих получение постоянно-го наибольшего давления.

Расчеты были проведены для орудия калибром $d = 20$ мм при значениях давления форсирования $p_0 = 2$ МПа и $p_0 = 30$ МПа.

Эти расчеты показали, что при сохранении наибольшего давления постоянной величиной ($p_m = \text{const}$) переход от общепринятого значения $p_0 = 30$ МПа к $p_0 = 2$ МПа не только не ухудшает, как считали до этого, а напротив – улучшает баллистические характеристики орудия.

Не приводя данных, на основании которых был сделан этот вывод, можно отметить интересный для нас результат, заключающийся в том, что при переходе от давления форсирования $p_0 = 30$ МПа к $p_0 = 2$ МПа происходит такое же изменение кривой давления $p(l)$, какое будет иметь место в винтовке при переходе от расчетной кривой давления ($p_0 = 30 \dots 45$ МПа) к опытной кривой давления ($p_n = 10 \dots 15$ МПа).

На основании вышеизложенных соображений относительно давления форсирования в стрелковом оружии, в частности в 7,62-миллиметровой винтовке, мы приходим к заключению, что при назначении величины начального давления, при котором начинается движение пули, следует исходить не из установившегося представления о величине давления форсирования порядка $p_0 = 30 \dots 45$ МПа, а из более реальной величины.

Поскольку все системы стрелкового оружия имеют только унитарный патрон, то в качестве начального давления можно принять величину, связанную с усилием выталкивания пули из гильзы. В этом случае расчетные данные будут лучше соответствовать опытным данным.

Теперь обратим внимание на влияние винтовой нарезки на силу сопротивления.

Нарезы канала ствола, имеющие постоянную или переменную крутизну и предназначенные для придания пуле вращательного движения, вызывают появление дополнительного сопротивления движению пули в канале ствола по сравнению с той силой сопротивления, которая действовала бы на пулю в случае ее движения в стволе с прямыми нарезами, т. е. в стволе с нарезами нулевой крутизны.

Влияние винтовой нарезки на силу сопротивления при врезании и движении пули по каналу ствола можно проследить по опытным данным, приведенным

в табл. 2 [5], в которой введены следующие обозначения: $\eta = \frac{R_{m,n} - R_{m,k}}{R_{m,k}}$,

$$\zeta = \frac{R_{\phi n} - R_{\phi n}}{R_{\phi n}}.$$

Сопоставим максимальную силу R_m для двух серий опытов, проведенных на пулях с одинаковыми характеристиками.

По опытным данным, приведенным в табл. 2, можно сделать заключение, что винтовая нарезка по сравнению с прямой увеличивает максимальную силу сопротивления R_m в среднем на 7,4 %, а точнее, на 6,9 % – для легкой пули, на 8,3 % – для тяжелой пули и на 7,0 % – для бронебойной пули.

Для пуль, различных по своим геометрическим характеристикам ведущей части, относительное увеличение максимальной силы R_n при переходе от прямой нарезки к винтовой получилось почти одинаковым. Это значит, что влияние винтовой нарезки на силу сопротивления не должно зависеть от геометрических характеристик ведущей части.

Таблица 2. Опытные данные влияния винтовой нарезки на силу сопротивления при врезании движения пули с железной оболочкой и штатным зарядом по каналам стволов*

Тип пули	p_m , МПа		R_m , н		R_{δ} , н		$R_{н.в} - R_{м.к.}$ н	η , %	ζ , %
	винтовая	прогрессивная	винтовая	прогрессивная	винтовая	прогрессивная			
Легкая	287	277,1	1634	1529	870	530	105	6,9	64,2
Тяжелая	301,5	291,3	2159	1994	950	630	165	8,3	50,8
Бронебойная	301,8	298,3	2280	2130	1030	620	150	7,0	66,1

*Диаметр пули $d_m = 7,89$ мм; путь пули $l_{\delta} = 240$ мм

В этой же таблице приведены результаты измерения силы сопротивления в момент вылета пули из ствола R_{δ} . Исследуемые стволы имеют длину нарезной части, при которой в момент вылета пули проходит путь $l_{\delta} = 240$ мм или 31,5 калибра. На этом пути влияние винтовой нарезки сказывается в том, что при переходе от ствола с прямыми нарезами к стволу с винтовыми нарезами сила сопротивления R_{δ} увеличивается в среднем:

для легкой пули $870 - 530 = 340$ н или на 54,2 %;

для тяжелой пули на $950 - 630 = 320$ н или на 50,8 %;

для бронебойной пули на $1030 - 620 = 410$ н или на 66 %.

О зависимости наибольшего давления газов в камере от максимальной силы сопротивления вследствие большого расхождения баллистических характеристик для валовых партий стрелкового и артиллерийского оружия говорить не будем, т. к. это является самостоятельной задачей. Однако при решении этого вопроса на первых порах для исследований можно использовать характеристики, приведенные в отраслевых стандартах или в литературных источниках [1–3; 6].

Список литературы

1. Серебряков, М. Е. Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет. – М. : Оборонгиз, 1962.
2. Корнер, Дж. Внутренняя баллистика орудий / пер. с англ. ; под ред. И. П. Граве. : ил., 1953.
3. Горохов, М. С. Внутренняя баллистика. – Ч. I–III. – Томск : Изд-во ТГУ, 1943.
4. Вердин, Г. А. Прикладная баллистика / Г. А. Вердин, А. А. Родин. – М. : Машиностроение, 1975.
5. Касимов, З. И. Исследование второстепенных работ во внутренней баллистике стрелкового оружия : дис. ... канд. техн. наук : – Томск : Физико-технический научно-исследовательский институт, 1955.
6. Теория и расчет артиллерийского оружия. – Пенза : ПВАИУ, 1973.