

УДК 623.53

DOI: 10.22213/2410-9304-2017-1-82-84

С. Г. Селетков, доктор технических наук, профессор
ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

АНАЛИЗ РЕШЕНИЙ ЗАДАЧ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ БАЛЛИСТИКИ

В статье автор анализирует состояние проблем расчета процессов, имеющих место в период последействия, и определения эффективности устройств, работающих в этот период. Рассматриваются методики расчета, построенные на аналитических зависимостях, и численные методики; указываются особенности, которые требуется учитывать при использовании решений в квазистационарной или в нестационарной постановке. В статье подчеркивается необходимость учитывать при расчете параметров течения наличие фазы установления, в продолжение которой наблюдается движение в газовой ударной волне и волн разряжения, а также изменение под действием термодинамических и волновых процессов положения критических сечений течения потока, образование циркуляционных и застойных зон, других нестационарных газодинамических явлений. Указанные процессы играют существенную роль при образовании дульных ударных волн и пламенности выстрела, что во многом определяет качество настольных устройств ствольного оружия.

Ключевые слова: промежуточная баллистика, расчет импульса отдачи, период последействия, определение эффективности гашения отдачи.

Задачи промежуточной баллистики имеют место при расчете параметров истечения газа и характеристик устройств, работающих в период последействия, то есть с момента вылета снаряда или пули из канала ствола до полного истечения газов. В основном это дульные устройства гашения импульса отдачи и некоторые виды динамореактивных орудий. Для оценки эффективности гашения отдачи с помощью дульного устройства обычно используются две величины: энергетическая эффективность и импульсно-конструктивная характеристика, между которыми существует функциональная зависимость [1, с. 201].

Укажем на известные аналитические методики расчета импульсно-конструктивной характеристики (ИКХ) Б. В. Орлова [2] и Ю. В. Чуева [3], которые позволяют в первом приближении оценить значение ИКХ на конец периода последействия для хорошо известных дульных тормозов, таких как калиберные и камерные. Преимуществом аналитических методов расчета перед численными остается их оперативность, однако в настоящее время доминирующими методами расчета характеристик дульных устройств являются методы, базирующиеся на численном решении системы дифференциальных уравнений сохранения массы, энергии, импульса в квазистационарной постановке.

Достоверность расчета эффективности устройств гашения импульса отдачи, а также значений характеристик ряда факторов, сопровождающих выстрел, зависит от правильности определения параметров газового потока при его движении в каналах и камерах газопровода. При этом необходимо учитывать две фазы течения. Первую фазу можно назвать фазой установления течения, когда наблюдается движение в газовой ударной волне и волн разряжения, изменение под действием термодинамических и волновых процессов положения критических сечений течения потока, образования циркуляционных и застойных зон течения, других нестационарных газодинамических явлений. Вторая фаза характеризуется установлением относительно стационарного течения, то есть допускающая квазистационарное рассмотрение газодинамических процессов истечения газов из канала ствола. Продолжительность первой фазы, за исклю-

чением случаев использования устройств с длинными газоотводами, невелика, однако она оказывает существенное влияние на ряд факторов выстрела, таких как значения избыточного давления в дульной ударной волне и максимальных нагрузок на детали устройств, которые необходимо определять для проведения расчетов на прочность.

Инструментом исследования фазы установления является нестационарная газовая динамика, рассматривающая движение сплошной среды по каналам и трубам с присутствием скачков уплотнения и волн разряжения газодинамических параметров. Основные положения теории нестационарных течений разработаны в трудах видных российских и зарубежных ученых. Здесь можно указать на недостаток в экспериментальном материале по исследованию поведения газов со свойствами, близкими к свойствам порохового газа при различных нестационарных воздействиях.

Более полно в литературе представлены решения задач газодинамики ствольного вооружения при течении газа в квазистационарной фазе, которые можно разделить на следующие группы:

1. Рассматривающие перетекание газа из одного резервуара в другой, а также истечение газа в окружающую среду с отведением части потока. В частности, это задачи по определению расходных характеристик при отводе части газа через боковой канал, расчету реакций и импульсов потока.

2. Связанные с расчетом параметров газа, движущегося по каналам с переменной по длине конфигурацией, без деления потока. Это задачи о движении газа в проточном резервуаре с внезапным или плавным расширением или сужением канала, наличием поворотов потока.

3. Связанные с определением параметров газа при наличии особенностей в структуре самого потока, например вихревого течения в кольцевой камере.

При решении задач в квазистационарной постановке допускается, что газ является идеальным, процесс течения адиабатический и стационарный. Использование таких моделей течения газа оправдано в случае, если различие в значениях параметров газа в одно и то же время в различных точках расчетного

объема не существенно влияет на правильность определения интегральных характеристик устройства. Однако укажем, что такая постановка задач во многом зависит от значений различного рода коэффициентов потерь: расхода, скорости, давления, импульса, энергии и других величин. При этом необходимо учитывать различие в значениях одних и тех же коэффициентов в зависимости от режима течения – дозвукового или сверхзвукового. Так, для нахождения расхода газа при дозвуковом режиме истечения могут использоваться формулы, приведенные в работах [4–6], аппроксимирующих обширный экспериментальный материал и позволяющих с достаточной для практики точностью находить величину расхода газа через боковой канал при относительно грубых допущениях, например осреднении скорости потока у газоотводного канала за все время истечения и пренебрежении влиянием противодавления со стороны окружающей среды. Для сверхзвуковых течений известны аналитические зависимости Б. В. Орлова [7], полученные при допущении о равенстве скорости потока, втекающего в боковой канал, проекции скорости основного потока на направление оси бокового канала, что является довольно грубым допущением и дает значительно завышенные результаты. В работе И. Р. Степанова и В. И. Чудинова [8] коэффициент расхода для боковых каналов с углом наклона до 90° находится с привлечением теории течения Прандтля – Майера, что более полно соответствует картине истечения газов через боковой канал при сверхзвуковых режимах. В работе автора [9] аналогичная задача решена для истечений газа через боковой канал при углах его наклона более 90° .

Внезапное изменение поперечного сечения потока приводит к появлению потерь, поскольку часть энергии потока затрачивается на образование вихревых течений в застойных зонах и турбулентное перемешивание, что не позволяет отнести его к изэнтропическим течениям. В работах [10, 11] для коэффициента потерь при внезапном изменении поперечного сечения канала приводятся зависимости, основывающиеся на известной формуле Борда – Карно, выведенной для потока жидкости, встречающего внезапное расширение.

Одним из наиболее часто встречающихся элементов в устройствах гашения импульса отдачи является замкнутая цилиндрическая камера с входным и выходным отверстиями по оси и представляет собой комбинацию из элементов с внезапным расширением и внезапным сжатием потока. При установке такой камеры на дульный срез ствола она имеет специальное название – тепловой дульный тормоз. Воздействие на поток проточной камеры исследовалось в работах [12–14]. В работе [15] рассматривалась возможность гашения турбулентного шума ударной волны в замкнутой камере при выстреле, в которой эмпирически выявлены сочетания геометрических параметров, позволяющих снизить акустическое воздействие ударной волны, но без анализа влияния параметров камеры на характеристики потока. Ана-

литическая методика [16] построена на допущении безвихревого течения потока в камере, что не соответствует реальной картине и поэтому может использоваться лишь для предварительных расчетов. Полуэмпирическая методика в работе [17] точнее описывает происходящие в камере газодинамические процессы, однако приведенные данные в ней получены для довольно узких границ изменения геометрических параметров камеры, поэтому приведенные результаты нуждаются в уточнении.

Использование в устройствах гашения импульса отдачи газодинамических эффектов, в частности Магнуса, Ранка, позволяет в частных случаях поднять эффективность этих устройств, однако как опытных, так и теоретических знаний об этих эффектах в приложении к газодинамическим устройствам ствольного вооружения недостаточно. О других эффектах взаимодействия газа с твердыми телами в литературе имеются довольно скудные и разрозненные данные [18–22] и требуют специальных исследований для применения в наствольных устройствах.

Отметим важный аспект решения задачи по расчету устройств гашения импульса отдачи. Методы расчета могут быть существенно уточнены при отказе от допущения о равенстве скорости истечения газов из канала ствола критической скорости в начальной фазе периода последствия. Указанное допущение возможно лишь в частном случае, когда скорость снаряда в дульный момент равна критической скорости газа в дульном сечении. При несоблюдении этого условия имеют место фазы установления критического течения в дульном сечении: инерционная, если начальная скорость снаряда V_0 больше критической скорости истечения a^* и колебательная, если V_0 превосходит значение a^* . На существование этих фаз указывалось еще в работе М. А. Мамонтова [23], позднее подтверждено расчетами фаз истечения в нестационарной постановке [24] и рядом экспериментальных исследований. Важность этого вопроса заключается в том, что в инерционную фазу периода последствия возможен выброс массы газа из канала ствола до 70 % от полного заряда. По поводу колебательной фазы существуют различные мнения о ее длительности и характере протекания.

Точность расчета устройств, действующих в период последствия, влияет на точность оценки эффективности ствольного комплекса в целом. В период последствия начинает формироваться и действует ряд негативных факторов, таких как дульная ударная волна и пламенность выстрела. Однако эти воздействия, особенно процессы, участвующие в их формировании, исследованы недостаточно, что обусловлено, прежде всего, сложностью физической картины этих процессов, их интенсивностью и скоротечностью. Значительных усилий требуют экспериментальные исследования в камерах дульных устройств, где собственно образуются мощные ударные волны, происходит их трансформация при взаимодействии между собой, стенками камер и областями течения газа, отражение и дифракция на диафрагмах, с последующим выходом через снарядное окно и боковые газоотводные каналы.

В статье [25] предлагается метод расчета, основанный на численном решении системы обыкновенных дифференциальных уравнений, формируемой для каждого из контрольных объемов, на которые «прозрачными» границами разбивается весь массо-энергетический поток в камере. При этом формирование структуры контрольных объемов играет в методе важную роль и определяется не только конфигурацией разбиваемого макрообъема, определяемого границами всего исследуемого течения, но и известными теоретическими и экспериментальными положениями о характере и особенностях течения. Такое представление решения можно назвать развитием «нульмерной» постановки известной задачи, существенным отличием которого является решение «нульмерной» термодинамической задачи для каждого из сообщающихся между собой контрольных объемов, на каждом шаге по времени.

Приведенный в статье анализ возможных решений задач промежуточной баллистики показывает их достаточное многообразие, и выбор того или иного метода решения зависит от необходимой степени детализации картины течения. При этом остается еще достаточно много задач, требующих своего разрешения, в частности, при выполнении диссертационного исследования, элементы которого изложены в работах [26–28].

Библиографические ссылки

1. Чуев Ю. В. Проектирование ствольных комплексов. – М. : Машиностроение, 1976. – 216 с.
2. Орлов Б. В., Мазинг Г. Ю. Термодинамические и баллистические основы проектирования ракетных двигателей на твердом топливе : учеб. пособие для вузов. – М. : Машиностроение, 1979. – 392 с.
3. Чуев Ю. В. и др. Баллистика периода последействия и расчет дульных тормозов. – М. : НИИ-3-ГАУ, 1959.
4. Орлов Б. В., Мазинг Г. Ю. Термодинамические и баллистические основы проектирования ракетных двигателей на твердом топливе. 392 с.
5. Кулагин В. И., Черезов В. И. Газодинамика автоматического оружия. – М. : ЦНИИИнформации, 1985.
6. Шишков А. А. Газодинамика пороховых ракетных двигателей. – М. : Машиностроение, 1974.
7. Орлов Б. В., Мазинг Г. Ю. Термодинамические и баллистические основы проектирования ракетных двигателей на твердом топливе. 392 с.
8. Степанов И. П., Чудинов В. И. Некоторые задачи движения газа и жидкости в каналах и трубопроводах энергоустановок. – М. : Наука, 1977.
9. Селетков С. Г., Черезов В. И. Определение коэффициента расхода газа через боковые каналы в стволе при больших скоростях движения снаряда // Вопросы проектирования. – 1978. – Вып. 4. – С. 87–93.
10. Шишков А. А. Указ. соч.
11. Емцев Б. Т. Техническая гидродинамика. – М. : Машиностроение, 1978.
12. Орлов Б. В., Мазинг Г. Ю. Термодинамические и баллистические основы проектирования ракетных двигателей на твердом топливе. 392 с.
13. Чуев Ю. В. и др. Баллистика периода последействия и расчет дульных тормозов...
14. Проектирование ракетных и ствольных комплексов / под ред. Б. В. Орлова. – М. : Машиностроение, 1974.
15. Шкирматов В. М. Возникновение звука орудия выстрела // Известия ААН. – 1951. – № 321. – С. 21–25.
16. Проектирование ракетных и ствольных комплексов. 1974.
17. Чуев Ю. В. и др. Баллистика периода последействия и расчет дульных тормозов...
18. Бородастов Г. В. и др. Указатель физических явлений и эффектов для решения изобретательских задач : учеб. пособие. – М. : Наука, 1979.
19. Половинкин А. И. Банк данных по физическим эффектам // Техника и наука. – 1981. – № 12.
20. Смирнов Г. Рожденные вихрем. – М. : Знание, 1982.
21. Соболев А. Н., Смирнский Е. А. Некоторые вопросы сбора и обработки информации для фонда физических эффектов // Автоматизация и проектирование в машиностроении. – Горький, 1976.
22. Струйная автоматика в системах управления / под ред. Б. В. Орлова. – М. : Машиностроение, 1975.
23. Мамонтов М. А. Некоторые случаи течения газов. – М. : Оборонгиз, 1951.
24. Промежуточная баллистика артиллерийских орудий. – М. : ЦНИИИнформации, 1982. – 285 с.
25. Селетков С. Г. Метод контрольных объемов для расчета массо-энергетических потоков // Моделирование технических систем. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 1996. – С. 45–49.
26. Селетков С. Г., Иванова С. С. О компетенциях диссертантов: магистров, кандидатов и докторов наук // Вестник ИжГТУ. – 2015. – № 1. – С. 139–140.
27. Селетков С. Г. Гипотеза в диссертации // Современный взгляд на будущее науки : сб. стат. Международной научно-практической конференции (25 июня 2015 г., г. Уфа). – Уфа : Аэтерна, 2015. – С. 197–198.
28. Селетков С. Г. Конструктор научной публикации // Вестник ИжГТУ. – 2015. – № 3. – С. 115–117.

S. G. Seletkov, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU

Analysis of Solutions of Intermediate Ballistics Problems

In this paper the author examines the problems of calculation of processes specific for the period of aftereffect and of determining the effectiveness of devices that are operating during this period. Calculation techniques designed by analytic relations and numerical techniques are considered. Features are shown that should be considered when applying the solutions in quasi-stationary or non-stationary statements. The paper emphasizes that it is necessary to consider the presence of the setting phase when calculating the flow parameters; during this phase the following phenomena are observed: motion of impact waves and depression waves in the gas pipe, variation of the position of critical sections of the flow under the action of thermo-dynamic and wave processes; generation of circulation and stagnation zones; and other non-stationary gas dynamic phenomena. The pointed processes are of essential importance in generation of muzzle impact waves and shot ardour, thus determining the quality of upper barrel devices of the barrel-type guns.

Keywords: intermediate ballistics, recoil impulse calculation, aftereffect period, determining the effectiveness of damping impact.

Получено: 18.01.17