

Н.А. КОНОВАЛОВ, О.В. ПИЛИПЕНКО, Ю.А. КВАША,
Г.А. ПОЛЯКОВ, А.Д. СКОРИК, В.И. КОВАЛЕНКО

О ТЕРМОГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ В ПРИБОРАХ СНИЖЕНИЯ УРОВНЯ ЗВУКА ВЫСТРЕЛА СТРЕЛКОВОГО ОРУЖИЯ

В статье приведено описание существующих представлений о характере термогазодинамических процессов в полостях приборов снижения уровня звука выстрела (ПСУЗВ) – глушителей и даны ссылки на методики расчета характеристик ПСУЗВ, основывающиеся на этих представлениях. Показано, что методики не учитывают ряда факторов, оказывающих существенное влияние на характеристики ПСУЗВ, в частности, реального физического и химического состава пороховых газов выстрела и химико-термических реакций в полостях глушителя. Приведены существующие представления о термогазодинамических процессах, реализующихся в некоторых конструкциях глушителей, разработанных авторами. Намечены пути получения более близкой к реальной расчетно-теоретической картины течения газа в полостях ПСУЗВ, и приведены соображения относительно физических явлений, которые необходимо исследовать с целью уточнения методик расчета основных характеристик глушителей.

В статті приведено опис уявлень, які існують, щодо характеру термогазодинамічних процесів у порожнинах пристроїв зниження рівня звуку пострілу (ПЗРЗП) – глушників та дано посилання на методики розрахунку характеристик ПЗРЗП, що ґрунтуються на цих уявленнях. Показано, що методики не враховують ряд факторів, які суттєво впливають на характеристики ПЗРЗП, зокрема, реального фізичного та хімічного складу порохових газів пострілу та хіміко-термічних реакцій в порожнинах глушників. Приведено існуючі уявлення щодо термогазодинамічних процесів, що реалізуються в деяких конструкціях глушників, розроблених авторами. Намічено шляхи отримання більш близької до реальної розрахунково-експериментальної картини течії газу в порожнинах ПЗРЗП, та приведені міркування відносно фізичних явищ, які необхідно досліджувати з метою уточнення методик розрахунку основних характеристик глушників.

The paper concerns description of the existing concepts of a character of thermogasdynamic processes through cavities of sound suppressors (PSUZV) as well as calculated techniques for the PSUZV characteristics, based on these concepts. It is shown that the techniques do not take into account a number of factors affecting the PSUZV characteristics, in particular real physical and chemical components of powder gases of a back-shot and chemical and thermal reactions through sound suppressor cavities. The existing concepts of thermogasdynamic processes in some designs of sound suppressors developed by the authors are presented. Ways for providing a more realistic calculated-theoretical presentation of gas flows through the PSUZV cavities are directed, and considerations applied to physical phenomena to be studied to refine calculated techniques for basic characteristics of sound suppressors are presented.

При разработке приборов снижения уровня звука выстрела из огнестрельного оружия (глушителей) необходимо установить действительную физическую картину течения пороховых газов в полости глушителя и значения их термогазодинамических параметров.

Как правило, прибор снижения уровня звука выстрела (ПСУЗВ) проектируется для конкретного оружия. При этом учитывается, что разрабатываемое изделие должно иметь при заданной эффективности максимальную простоту конструкции, минимально необходимые габариты и массу, высокую надежность и большой ресурс использования, быть сравнительно недорогим и удобным в эксплуатации. ПСУЗВ не должен оказывать негативного влияния на основные характеристики образца оружия (ухудшать показатели точности стрельбы и рассеивания, условия прицеливания и стрельбы, работу автоматики оружия, уменьшать энергию пули и т.д.).

На этапе исследования и разработок необходимо максимально учесть весь комплекс названных факторов, так как пренебрежение каким-либо из них повышает вероятность получения в конечном итоге изделия с характеристиками, не соответствующими требуемым.

Конструктивные особенности ПСУЗВ к различным типам стрелкового оружия описаны, например, в [1 – 11] и др.

© Н.А. Коновалов, О.В. Пилипенко, Ю.А. Кваша,
Г.А. Поляков, А.Д. Скорик, В.И. Коваленко, 2011

Для оружия малого калибра с невысокой энергетикой боеприпаса применяются глушители, достаточно простые по конструкции и имеющие при этом сравнительно высокую эффективность снижения уровня звука выстрела $\sim 25,0 - 30,0$ дБ.

На этапе эскизного проектирования таких глушителей для определения их основных характеристик и компоновки, предполагаемой эффективности снижения уровня звука выстрела используются представления о термогазодинамических процессах и значениях их параметров, учитываемых в расчетных методиках, основные аспекты которых изложены в [1, 3, 10, 12 – 27].

В случае проектирования глушителей на оружие, имеющее боеприпас с большой энергетикой, для получения приемлемых значений эффективности снижения уровня звука выстрела при сохранении удовлетворительных массогабаритных характеристик приходится усложнять устройство внутренних элементов конструкции глушителя, обеспечивающих преобразование энергии пороховых газов в тепловую и, как следствие, приводящих к уменьшению уровня генерируемого звука. Для этой цели используются, например, конструкции, содержащие геликоидальные поверхности или рассекатели, представляющие собой набор конструктивных элементов сложной, иногда экзотической формы.

При разработке конструкций таких глушителей и предварительной оценке их эффективности следует иметь в виду, что теоретические методики оценки эффективности приборов снижения уровня звука выстрела с многократным расширением потока основаны на использовании ряда упрощений. Например, принимают, что параметры газа в каждой камере в течение всего времени от момента входа пули в прибор до момента выхода из него являются постоянными по объему камеры, но переменными во времени. Скорость газа в центральной трубке принимают равной скорости пули, в камерах – равной нулю. Для расчета параметров рассматриваемого нестационарного процесса используется система обыкновенных дифференциальных уравнений, полученная в результате применения законов сохранения массы и энергии к объему газа в каждой камере прибора с учетом перетекания газа через отверстия в стенках камер

$$\frac{dy_{ij}}{dt} = f_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, 4, \quad i = 5, \quad j = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

где N – общее число камер (при нумерации камер номер 1 соответствует камере переменного объема, объединяющей канал ствола оружия и часть центральной трубки до пули); t – время; y_{ij}, \dots, y_{4j} – плотность, давление, температура и скорость газа в j -той камере; y_{51} – объем 1-ой камеры.

При заданных начальных значениях система уравнений (1) интегрируется по времени методом Эйлера. После интегрирования эффективность работы прибора определяется с использованием общего выражения

$$E = 10 \lg \frac{p_1(t^*)}{p_1(0)} \text{ дБ},$$

где E – понижение уровня звукового давления при работе прибора; $p_1(t^*)$ – давление газа в 1-й камере при вылете пули из прибора; $p_1(0)$ – давление газа в канале ствола оружия при входе пули в прибор.

При расчете характера течения и основных характеристик глушителя, например, в работе [19] используются следующие допущения:

- 1) процессы горения в канале ствола завершены до вылета пули;
- 2) характеристики рабочего тела (пороховых газов) подчиняются уравнению состояния идеального газа;
- 3) течение пороховых газов в устройстве считается двумерным и описывается системой нестационарных двумерных уравнений газовой динамики в осесимметричной постановке;
- 4) пренебрегается вязкой диссипацией по сравнению с рассеянием энергии в ударных волнах.

Цель работы – установление путей получения более достоверных данных об основных конструктивных параметрах глушителей звука выстрела стрелкового оружия и их эффективности путем уточнения физической картины термогазодинамических процессов в полостях ПСУЗВ, для последующего совершенствования расчетных методик их определения.

Так, касаясь скорости пороховых газов в дульном отверстии в период последствия, что исключительно важно для определения конструктивных параметров надульных устройств, в [28] приведены следующие соображения:

– вследствие равенства сечений канала оружия и сечения отверстия истечения разграничение общего объема газа канала оружия на зону малоподвижного газа и зону образования струи провести невозможно: по существу весь объем канала представляет собой зону образования потока газа;

– скорости газа в канале оружия за исключением сечений, примыкающих ко дну канала, не являются пренебрежительно малыми и вполне соизмеримы со скоростью газа в дульном отверстии;

– вследствие постоянства сечения потока газа в канале нет условий для резкого нарастания скорости газа вблизи дульного отверстия, а следовательно, условий для резкого изменения плотности и давления газа в дульной части канала, как это наблюдается в зоне образования потока при истечении газа из сосуда через малое отверстие;

– наличие течения газа во всем объеме канала ствола, соизмеримого с его истечением в дульном отверстии, не позволяет вводить в рассмотрение какое-либо начальное давление в потоке, аналогичное давлению в неподвижной или малоподвижной среде сосуда, как это наблюдается при истечении газа через малое отверстие; при наличии ускоренного движения газа вдоль всего канала ствола давление газа будет различно в различных сечениях канала;

– большой диаметр дульного отверстия и сравнительно небольшой объем канала ствола, а также равенство их сечений превращает весь объем канала в зону образования потока газа, обеспечивающего быстрое опорожнение канала ствола оружия.

Таким образом, величина и закономерности изменения скорости потока порохового газа в дульном отверстии огнестрельного оружия являются основными факторами, определяющими закономерности его истечения из канала оружия.

Важно изучение и знание закономерностей движения снаряда в канале ствола с учетом его взаимодействия со столбом воздуха впереди снаряда. Возникающая впереди снаряда ударная волна и опережающие снаряд горячие газы являются существенными при определении картины дульного выхлопа, что

важно при исследовании работы различных устройств, устанавливаемых в дульной части ствола.

Скорость ударной волны относительно снаряда положительна, следовательно, зона сжатого воздуха перед снарядом увеличивается с течением времени.

К моменту вылета снаряда из дула воздух будет вытолкнут из канала ствола, а пороховые газы, находящиеся в заснарядном пространстве, будут иметь в различных сечениях канала различные скорости движения, начиная от нуля у дна канала и кончая скоростью, равной скорости снаряда в слое, прилегающем ко дну снаряда.

Представления авторов статьи о характере термогазодинамических процессов, происходящих в глушителях звука выстрела стрелкового оружия, изложены, например, в разделах «Работа глушителя» описания изобретения к выданному авторам патенту Украины [8] и заявки авторов на выдачу патента на изобретение Украины [9].

Газодинамические процессы в полости глушителя звука выстрела стрелкового оружия по патенту Украины [8] (рис. 1) происходят следующим образом.

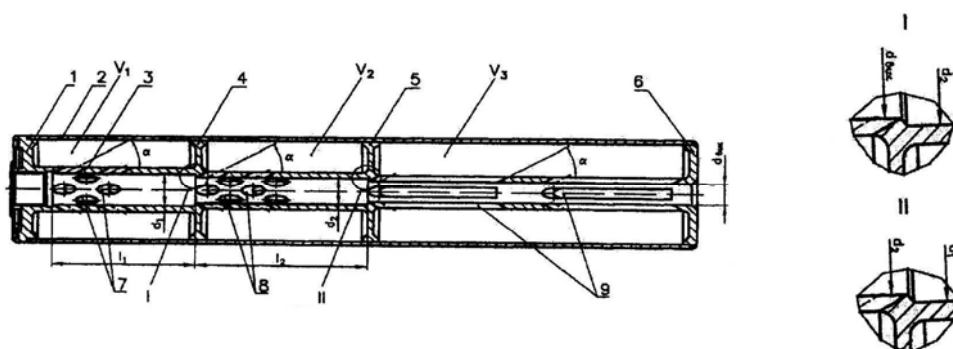


Рис. 1

При прохождении пули по стволу оружия со сверхзвуковой скоростью впереди неё образуется слой сжатого воздуха (отошедшая ударная волна), который через стыковой узел 1 достигает перфорированной трубки 3 глушителя. За пулей со сверхзвуковой скоростью движутся пороховые газы, имеющие высокую температуру и давление.

Когда пуля входит в глушитель, газы через перфорацию в центральной трубке начинают заполнять первую расширительную камеру. При прохождении пулей первой расширительной камеры на сужении $d_1 - d_2$ (см. I, II рис. 1) образуется прямой скачок уплотнения, что резко повышает сопротивление движению пороховых газов, и на котором происходит превращение и рассеивание их энергии. Благодаря выполненным отверстиям в центральной трубке на первой половине длины расширительных камер, обеспечивается более эффективное их заполнение пороховыми газами.

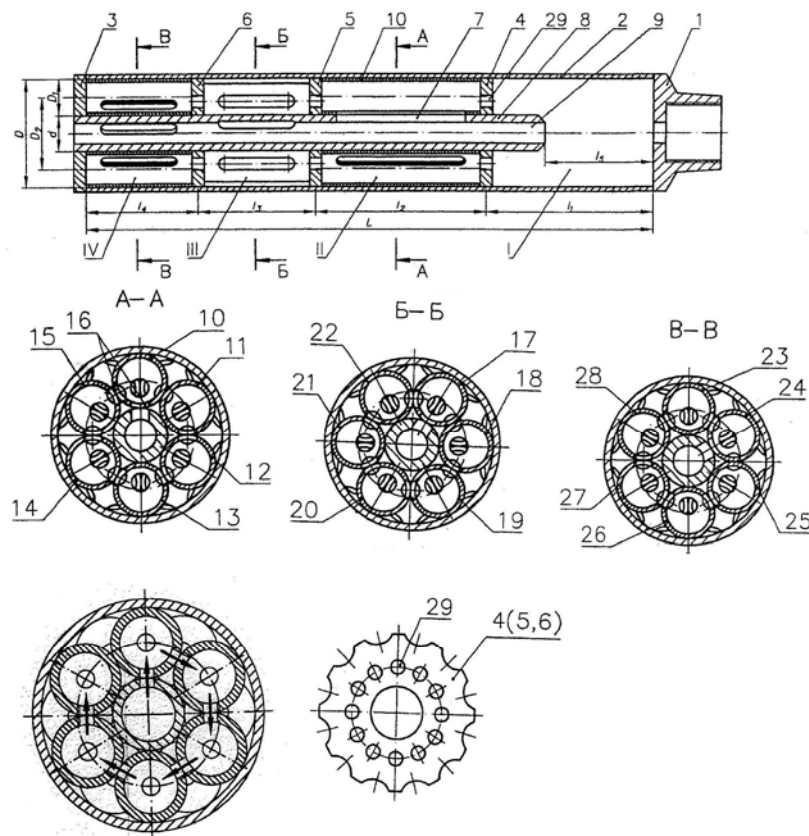
Процессы в центральной трубке и во второй расширительной камере при вхождении пули во вторую расширительную камеру и ее прохождении практически не отличаются от процессов в первой расширительной камере, за исключением того, что на сужении $d_2 - d_{\text{вых}}$ будет формироваться более слабый, нежели первый, скачок уплотнения (ударная волна).

Процессы в третьей расширительной камере отличаются от процессов в первой и второй расширительных камерах более низкими значениями температур и давлений пороховых газов.

Цилиндрические и щелевые отверстия в центральной трубке, их площадь, форма, расположение, угол наклона к продольной оси обеспечивают наиболее эффективное преобразование и рассеивание энергии в цикле заполнения – опорожнение расширительных камер и, таким образом, повышение эффективности снижения уровня звука выстрела.

Термогазодинамические процессы в глушителе звука выстрела стрелкового оружия [9] (рис. 2) представляются происходящими таким образом.

Когда пуля входит в глушитель, газы заполняют первую расширительную камеру I, и через отверстия 29 в первой перегородке 4 начинают заполнять внутренние объемы отрезков осесимметричных цилиндрических оболочек (10 – 15), создавая течение газа, имеющее скорость, направленную параллельно продольным осям отрезков осесимметричных цилиндрических оболочек.



а

Рис. 2

В дальнейшем этот поток образуется также и во внутренних полостях группы отрезков осесимметричных цилиндрических оболочек (17 – 22) и (23 – 28). Одновременно между внутренней поверхностью корпуса глушителя 2, внешней поверхностью групп отрезков осесимметричных цилиндрических оболочек (10 – 15), (17 – 22), (23 – 28) и внешним контуром перегородок 4, 5 и 6 формируется поток газа на всю длину внутренней полости корпуса глушителя, параллельный его продольной оси.

Поток дросселируется в этой фигурной щели, его энергия рассеивается, эффективность глушителя возрастает.

Когда пуля входит во вторую расширительную камеру, газы выстрела через щелевое перфорационное отверстие заполняют объем внутреннего отрезка осе-

симметричной цилиндрической оболочки 10 и, двигаясь, как показано на рис. 2а, последовательно заполняют внутренние свободные объемы всей группы осесимметричных цилиндрических оболочек (10 – 15), создавая поток газа, направление скорости которого перпендикулярно продольным осям оболочек. Во внутренних полостях оболочек 10 – 15 этот поток газа сталкивается с потоком, образованным течением газа через отверстия 29 в перегородках. Возникает столкновение двух потоков, приводящее к интенсивным завихрениям и перемешиванию газа и, как следствие, значительному рассеиванию и потерям энергии.

При дальнейшем движении пули вдоль перфорированной центральной трубки 8 в работу включаются третья и четвертая расширительные камеры, причем газодинамические явления и процессы, происходящие в них, практически не отличаются от процессов в третьей расширительной камере, за исключением того, что температура и давление пороховых газов имеют более низкие значения.

Таким образом, организация термогазодинамических процессов в глушителе этой конструкции – наличие групп отрезков осесимметричных цилиндрических оболочек, их взаимное расположение, выполнение их щелевых отверстий одно против другого, форма контура и выполнение перфораций в перегородках так, что их продольные оси совпадают с продольными осями отрезков оболочек, выбор размеров конструктивных элементов глушителя из полученных соотношений обеспечивают наиболее эффективное преобразование энергии в цикле заполнения – опорожнение расширительных камер и приводят к значительному снижению уровня звука выстрела.

Несмотря на то, что проблема термогазодинамических процессов в приборах снижения уровня звука выстрела рассмотрена в ряде публикаций, она продолжает оставаться актуальной, так как нередко случаи повреждения и разрушения ПСУЗВ, рассчитанных по имеющимся методикам на этапе натурной отработки глушителей. На рис. 3 с помощью киносъёмки зафиксировано повреждение разработанного авторами глушителя звука выстрела для пулемета Калашникова (ПК) калибра 7,62 мм на этапе натурных испытаний.



167



168



170



180

Рис. 3



Рис. 4

На рис. 4 в разных ракурсах показана первая разрушившаяся расширительная камера этого глушителя, что привело к выходу его из строя.

На рис. 5 показаны рассекатели-преобразователи энергии пороховых газов глушителя, разработанного авторами, потерявшие устойчивость в процессе стрельбы штатными патронами. Потеря устойчивости произошла из-за значительной площади перфораций между поперечными перегородками, образующими расширительные камеры.

На рис. 6 приведен деформированный геликоидальный преобразователь энергии пороховых газов в глушителе из-за его недостаточной прочности при высокой температуре (преобразователь был выполнен из алюминиевого сплава).

На рис. 7 представлен внешний вид рассекателя глушителя разработки авторов после натурных испытаний. Отчетливо видно, что в районе щелевых отверстий центральной трубки трубка деформирована, так как в местах выполнения щелевых отверстий она оказалась недостаточно прочной при стрельбе штатным патроном.

Из [29] известно, что при сгорании порохового заряда примерно 25 – 30 % выделяемой энергии затрачивается на сообщение пуле поступательного движения (основная работа); 15 – 25 % энергии – на совершение второстепенных работ (врезание и преодоление трения пули при движении по каналу ствола; нагревание стенок ствола, гильзы и пули; перемещение подвижных частей оружия, газообразной и несгоревшей части пороха). Около 40 % энергии не используется и теряется после вылета пули из канала ствола. Согласно [28] пороховые газы содержат CO_2 , O_2 , CO , H_2 , N_2 и H_2O , кроме того в работе [3] указывается на то, что вместе с пороховыми газами движутся частицы металлов выстрела (мелкая пыль, «стружка» от дульца гильзы и с поверхности пули в результате её трения о ствол), частично сгоревшие пороховые зерна, шлакообразные углеродистые продукты сгорания пороха, лакового покрытия и маркировки пули, капель

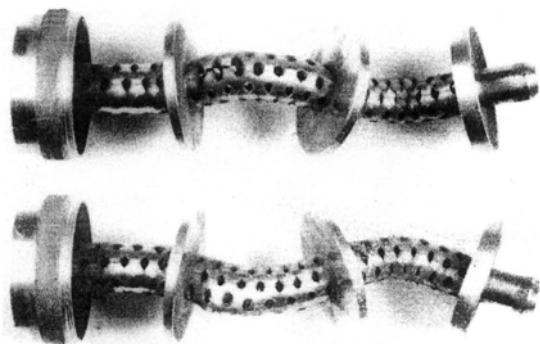


Рис. 5

ружейного масла и др. В заключительной фазе выстрела в пороховых газах преобладают элементы сгорания капсюльного состава (сурьма, олово, барий, ртуть).

Как видим, важной особенностью продуктов выстрела, не учитываемой существующими методиками расчета характеристик глушителей, является то, что все они содержат металлы выстрела (железо, медь, свинец, сурьму, олово, цинк и др.). Их источником являются стенки гильзы, капсюль, боковая поверхность и доньшко пуль, стенки ствола оружия, а также определенные сорта пороха.



Рис. 6



Рис. 7

При этом в процессе выстрела продукты горения пороха помимо основного действия – сообщения снаряду движения, приводят к ряду сопровождающих выстрел физико-химических явлений [1]. К этим побочным явлениям, сопровождающим выстрел, относятся звук выстрела, пламя, дым и разгар канала ствола.

Пламя при выстреле образуется главным образом благодаря догоранию в кислороде воздуха горючих газов CO , H_2 и CH_4 , содержащихся в газовом облаке. Пламя появляется на некотором расстоянии от дульного среза и зарождается в передней части газового облака, продолжительность пламени измеряется тысячными и сотыми долями секунды.

При установлении на дульном срезе огнестрельного оружия глушителя происходит так называемый феномен первого выстрела. Первый выстрел с использованием глушителя может быть до 8 дБ громче, чем последующие выстрелы [6]. Считается, что первый громкий выстрел вызван догоранием несгоревших остатков пороха и воспламеняемых газов. Первый выстрел потребляет большую часть кислорода в полости корпуса глушителя, так что последующие выстрелы не являются такими громкими. Эффект первого выстрела длится несколько минут [6].

Большое значение для определения характеристик ПСУЗВ имеет установление характера взаимодействия пороховых газов в полости глушителя с расположенными в ней конструктивными элементами. По отношению к преграде различают такие виды поражающего действия пороховых газов: механическое, химическое и термическое [3].

Механическое действие пороховых газов определяется их давлением на срезе ствола, расстоянием до преграды и её свойствами.

Зерна пороха вылетают из ствола в виде частично сгоревших частиц [3]. Кроме обгорания, зерна пороха подвергаются механическому разрушению и превращаются в мелкие частицы черного цвета. Частично сгоревшие зерна пороха и металлические частицы имеют значительную кинетическую энергию и действуют как мелкие абразивные элементы.

На рис. 8 приведены диаграммы относительного состава твердых частиц при выстреле 5,45 мм патроном УС из автомата АКС-74У с прибором бесшумной стрельбы ПБС-4 (8а) и без него (8б) [3].

Из приведенных данных видно, что особенностями

выстрела из оружия специального назначения, оснащенного устройствами подавления звука выстрела, являются:

- высокая степень закопченности всех микрообъектов (частиц пороха, металлов, лака и капель оружейного масла);
- повышенная концентрация в продуктах выстрела крупных полусгоревших частиц пороха;
- образование конгломератов сплавленных между собой полусгоревших частиц пороха;
- отсутствие в продуктах выстрела шлакообразующих микрочастиц – продуктов полного сгорания порохового заряда.

Таким образом, при проектировании и отработке приборов снижения уровня звука выстрела необходимо иметь информацию о термогазодинамических процессах в его внутренних каналах с учетом приведенных сведений.

В общем виде, принцип действия ПСУЗВ основан на организации процессов преобразования и потери энергии пороховых газов, что уменьшает уровень звука выстрела. При прохождении пули по стволу оружия со сверхзвуковой скоростью впереди неё образуется ударная волна, а за пулей движется высокотемпературный газ сложного химического состава, включающий твердые частицы. При развитии течения в ПСУЗВ происходит расширение потока газа в расширительных (в том числе – периферийных) камерах, образование скачков уплотнения газа, развитых вихревых потоков, дросселирование потоков на перепускных отверстиях в диафрагмах, разделяющих камеры, взаимодействие встречных и взаимноперпендикулярных потоков.

Течение в полости ПСУЗВ имеет неустановившийся, нестационарный характер, в потоке возникают ударные волны, давление на фронте которых может превышать дульное давление, и волны разрежения, давление в которых может быть ниже атмосферного. Ударные волны, многократно взаимодействуя с внутренними сторонами камер, потоком и между собой, вызывают пульсации давления в полости глушителя. Сложный характер течения в полости глушителя требует усовершенствования существующих и разработки новых методов его расчета, что возможно как при наличии адекватных методов, связанных с постановкой и решением задач с использованием численных экспериментов, так и надежных экспери-

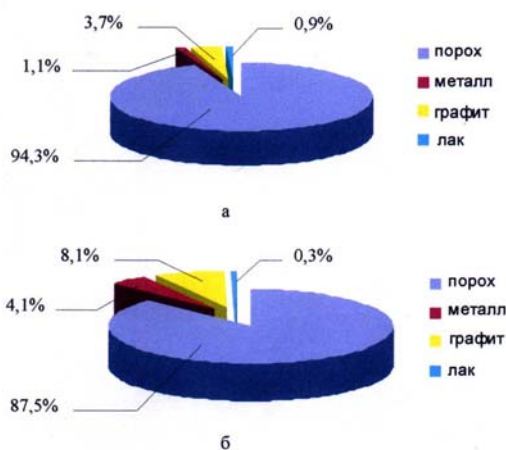


Рис. 8

ментальных данных о характере термогазодинамических процессов в полости глушителя.

В связи с вызывающим резонансные акустические колебания импульсным воздействием на ограничительные поверхности ударных волн, важен вопрос о генерации пиковых шумовых излучений отдельными элементами ПСУЗВ (как в частотном, так и энергетическом выражении). Несмотря на наличие ряда методик, не менее значительными и малоисследованными являются вопросы локального участия элементов ПСУЗВ в преобразовании потенциальной и кинетической энергии пороховых газов в тепловую.

При разработке методик расчета характеристик ПСУЗВ наибольшее значение получил численный эксперимент [30]. Это объясняется следующим:

- возможностью реализации режимов, которые нельзя получить в физическом эксперименте;
- значительной экономией времени и энергии;
- низкой себестоимостью по сравнению с физическим экспериментом.

При этом возможны четыре уровня приближений уравнений Навье – Стокса [30].

1-й уровень. Используются линеаризованные уравнения движения идеального (невязкого, нетеплопроводного) газа (волновое уравнение).

2-й уровень. Нелинейные уравнения движения идеального газа (уравнение Эйлера) – расчет транс-, сверх- и гиперзвуковых течений, использование методов конечных разностей, релаксации Годунова, схем разностной аппроксимации типа Лакса – Вендроффа, и т.д.

3-й уровень. Уравнения Навье – Стокса, упрощенные или осредненные по методу Рейнольдса. Рассматриваются ламинарные и турбулентные течения с помощью полуэмпирических моделей турбулентности.

4-й уровень. Решение полных уравнений Навье – Стокса, с помощью которых рассчитывается движение крупномасштабных вихрей, а влияние мелкомасштабных вихрей учитывается с помощью полуэмпирических моделей турбулентности.

Причем, как показано в [17], создание универсальных методов и алгоритмов струйных течений, основанных на численном решении полной системы уравнений Навье – Стокса, не всегда целесообразно. Это связано не столько с проблемами численного решения самих уравнений, сколько со многими неопределенностями в моделях турбулентности, кинетических параметрах горения, межфазном взаимодействии в многофазных течениях и др. Поэтому, при определении характеристик ПСУЗВ имеется необходимость формулировки упрощенных математических моделей и разработки алгоритмов, максимально учитывающих особенности рассматриваемых течений. Большой круг задач может быть рассмотрен в приближении невязкого газа.

При экспериментальных исследованиях течений в полостях ПСУЗВ могут быть использованы следующие оптические методы [31].

Методы визуализации потоков (лазерной плоскости, лазерной индуцированной люминесценции, газового разряда, скоростной видеосъемки) – качественные и количественные методы, позволяющие получить зрительное представление о процессах, происходящих в выбранном сечении или во всем объеме потока.

Методы определения концентрации и размеров частиц в газах, жидкостях и плазме, основанные на закономерностях рассеяния оптического и лазерного излучения на частицах.

Применение лазерных методов диагностики потоков (ламинарных и турбулентных, однофазных и многофазных, стационарных и нестационарных, мелкомасштабных и крупномасштабных, вихревых и др.).

Интерференционные и рефракционные методы (голографические и спектр-интерференционные, теневые, теневой и фоновый со структурированными экранами, лазерной рефрактографии) – совокупность оптических и лазерных интегральных методов определения неоднородности поля температуры, скорости, концентрации, давления и других параметров потоков.

Лазерная анемометрия (доплеровская, фазово-доплеровская, трековая, времяпролетная, анемометрия по изображениям частиц) – совокупность лазерных методов измерения скорости (вектора локальной скорости, векторного поля скоростей в заданном сечении) различных потоков, основанных на измерении характеристик лазерного излучения, рассеянного малыми частицами).

Компьютерные методы моделирования и обработки сигналов и изображений в лазерных измерительных системах – современные цифровые методы обработки временных сигналов и оптических изображений, учитывающие их особенности и использующие как традиционные алгоритмы, так и новые, основанные на быстром преобразовании Фурье, преобразовании Гильберта, вейльвет анализе.

Методы термо- и барокрасок, основанные на изменении цвета вводимых в поток специальных красок, вызываемого воздействием температуры и давления. Методы используются в аэродинамических исследованиях.

Лазерные методы диагностики микро- и нанопотоков – (микро-PIV, микро-ТФМ, микро-ЛДА) исследования течений с пространственным разрешением в диапазоне микрометров и нанометров.

Таким образом, используемые представления о термогазодинамических процессах в ПСУЗВ при разработке методик определения их характеристик не учитывают ряд существенных особенностей этих процессов.

Необходимо дальнейшее уточнение и развитие методов определения характеристик ПСУЗВ путем рассмотрения особенностей термогазодинамических процессов в их полостях как проявления таких физических явлений:

- 1. Околосдульные струйные течения при выстреле (дульный выхлоп).**
- 2. Сверхзвуковые импульсные струйные течения.**
- 3. Течение и торможение высокотемпературного и сверхзвукового потока в цилиндрических каналах, снабженных загромождающими поперечное сечение препятствиями.**
- 4. Распространение детонационных волн в газозвесах по прямолинейным каналам, претерпевающим внезапное расширение, ограниченное боковыми стенками при наличии препятствий.**
- 5. Экспериментальное определение термогазодинамических характеристик пороховых газов в полостях ПСУЗВ различных конструкций на моделях и натуральных образцах.**

1. Ручное огнестрельное оружие бесшумного боя. Приборы снижения уровня звука выстрела для автоматов. Проектирование и экспериментальная отработка / *Н. А. Коновалов, О. В. Пилипенко, А. Д. Скорик, Ю. А. Кваша, В. И. Коваленко*. – Днепропетровск : Институт технической механики НАН Украины и НКА Украины, 2008. – 303 с.
2. *Коновалов Н. А.* Глушитель звука выстрела стрелкового оружия с коническими перегородочными элементами / *Н. А. Коновалов, О. В. Пилипенко, Г. А. Поляков, Г. А. Стрельников, А. Д. Скорик, А. Н. Авдеев* // *Техническая механика*. – 2011. – № 1. – С. 86 – 98.
3. *Макаров И. Ю.* Экспертная характеристика судебно-медицинских баллистических исследований огнестрельных повреждений, причиненных оружием специального назначения (экспериментальное исследование) : дис. на соискание ученой степени доктора медицинских наук : Министерство обороны Российской Федерации, 111 Главный государственный центр судебно-медицинских и криминалистических экспертиз / *Макаров Игорь Юрьевич*. – М., 2007. – 343 с. – 0520.0 703069.
4. *Walsh Don.* Doc Dater on the Larand Suppressors / *Don Walsh* // *The Small Arms Review*. – 2008. – Vol. 11, N 10, July. – P. 88.
5. Пат. 3478841, США, F01n 1/06. Silencer for Firearms Discharging GAJYes at Supersonic Velocity / *Siegfried Hubner*, Stuttgart-Henmaden, Germany. – 651958 ; заявл. July, 7, 1967, опубл. Nov., 18, 1969.
6. *Paulson Alan C.* Silencer. History and Performance, Volume 1, Sporting and tactical Silencer / *Alan C. Paulson* // USA, Boulder, Colorado : Paladin Press, 1996. – 354 p.
7. Патент 6575266, США, МПК⁷F41A21/00. Tube Barrel Weapon / *Hartmut Gehse, Gerhard Wedekind*. – 09/704214 ; заявл. Jul, 14, 2000, опубл. Jul, 10, 2003.
8. Пат. на винахід 84118 Україна, МПК (2006) F41A 21/30 (2008.01), F41A 17/00. Глушник звуку пострілу стрілецької зброї / *Коновалов М. А., Пилипенко О. В., Скорик О. Д., Пугач С. О., Пугач О. М.* ; заявник і патентовласник ТОВ НВФ «ІМКАС». – a200805748 ; заявл. 05.05.2008 ; опубл. 10.09.2008, Бюл. № 17. – 4 с.
9. Заявка на винахід а 2010 04889 Україна, МПК (2010) F41A 21/30, F41A 21/34. Глушник звуку пострілу стрілецької зброї / *Коновалов М. А., Пилипенко О. В., Авдеев А. М., Пугач С. О., Скорик О. Д.* ; заявник і патентовласник Інститут технічної механіки НАН України і НКА України. – Заявл. 23.04.10.
10. Безшумна автоматична вогнестрільна зброя : Підручник / *М. А. Коновалов, Ю. О. Кваша, О. В. Пилипенко, О. В. Січевий, О. Д. Скорик, Г. О. Стрельников*. – Дніпропетровськ : АРТ-ПРЕС, 2011. – 345 с.
11. *Huebner Siegfried F.* Silenser for Hand Firearms / *Siegfried F. Huebner*. – USA : Paladin Press, 1976. – 97 p.
12. *Кваша Ю. А.* Математическая модель и методика расчета процесса заполнения газом камер приборов снижения уровня звука выстрела с учетом наполнителей / *Ю. А. Кваша, Н. А. Коновалов, О. В. Пилипенко, А. Д. Скорик* // *Техническая механика*. – 2005. – № 2. – С. 137 – 146.
13. *Коновалов Н. А.* Математическая модель быстротекающих газодинамических процессов в приборах снижения уровня звука выстрела с учетом двумерности течения в канале прибора / *Н. А. Коновалов, В. И. Коваленко, Н. И. Лахно, О. В. Пилипенко, А. Д. Скорик* // *Техническая механика*. – 2005. – № 1. – С. 77 – 88.
14. *Коновалов Н. А.* Математическое моделирование газодинамического процесса работы прибора снижения уровня звука выстрела / *Н. А. Коновалов, Ю. А. Кваша, А. Д. Кулик, В. И. Коваленко, Н. И. Лахно, А. Д. Скорик* // *Техническая механика*. – 1999. – № 1. – С. 13 – 17.
15. *Бучарский В. Л.* Проектирование прибора малошумной стрельбы методами численного моделирования / *В. Л. Бучарский, К. Ю. Добринская, В. В. Сербин, А. В. Сичевой* // *Артиллерийское и стрелковое вооружение*. – 2009. – №2. – С. 3 – 7.
16. *Поляков Г. А.* Определение характеристик приборов снижения уровня звука выстрела стрелкового оружия / *Г. А. Поляков* // *Техническая механика*. – 2010. – № 4. – С. 57 – 74.
17. *Тимошенко В. И.* Численное моделирование струйных течений / *В. И. Тимошенко, И. С. Белоцерковец* // *Техническая механика*. – 2008. – № 2. – С. 107 – 122.
18. Процессы торможения сверхзвуковых течений в каналах / *О. В. Гуськов, В. И. Копченков, Н. И. Липатов, В. Н. Острась, В. П. Старухин*. – М. : ФИЗМАТЛИТ. – 2008. – 168 с.
19. *Эрдос* Расчет околосудного волнового течения / *Эрдос, Гудис* // *Ракетная техника и космонавтика*. – 1975. – Т. 13, № 8. – С. 103 – 113.
20. *Тейлор Т. Д.* Численный метод расчета течения со взрывной волной, инициируемого в стволе оружия / *Т. Д. Тейлор, Т. К. Линь* // *Ракетная техника и космонавтика*. – 1981. – Т. 19, № 4. – С. 88 – 92.
21. *Шмидт Э. М.* Поле течения при вылете снаряда из ствола / *Э. М. Шмидт, Р. Э. Гарднер, К. С. Фанслер* // *Аэрокосмическая техника*. – 1985. – № 4. – С. 126 – 128.
22. *Васильев Е. И.* Нестационарное истечение струи в затопленном пространстве / *Е. И. Васильев* // *Известия АН СССР. Механика жидкости и газа*. – 1984. – № 1. – С. 42 – 46.
23. *Менде Н. П.* Наблюдение околосудных процессов / *Н. П. Менде* // *Физико-газодинамические баллистические исследования*. – Л. : Наука, 1980. – С. 225 – 231.
24. Проектирование ракетных и ствольных систем / под ред. *Б. В. Орлова* – М. : Машиностроение, 1974. – 827 с.
25. *Кратова Ю. В.* Численное моделирование ударно-волновых и детонационных течений газозвесей в каналах : дис. на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / *Кратова Юлия Владимировна*. – Новосибирск, 2009. – Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича. – 154 с. – 04201052174.

26. Федоров А. В. Численное исследование дифракции ударных волн в каналах переменного сечения в газовзвесьях / А. В. Федоров, Ю. В. Кратова, Т. А. Хмель / Физика горения и взрыва. – 2008. – Т. 44, № 1. – С. 85 – 95.
27. Таскин А. А. Явления в канале огнестрельного оружия при выстреле // А. А. Таскин. – М. : НКАП СССР, Госиздат оборонной промышленности, 1940. – 199 с.
28. Мамонтов М. А. Некоторые случаи течения газа по трубам, насадкам и проточным сосудам / М. А. Мамонтов. – М. : Государственное издательство оборонной промышленности, 1951. – 491 с.
29. Наставления по стрелковому делу. Основы стрельбы из стрелкового оружия. 7.62 мм. Модернизированный автомат Калашникова (АКМ и АКМС), 7.62 мм ручной пулемет Калашникова (РПК и РПКС) 7.62 мм пулемет Калашникова (ПК, ПКС, ПКБ и ПКТ), 9 мм пистолет Макарова. Ручные гранаты. – М. : Военное издательство МО СССР, 1973. – 671 с.
30. Ляхов В. Н. Воздействие ударных волн и струй на элементы конструкций. Математическое моделирование в нестационарной газодинамике / В. Н. Ляхов, В. В. Подлубный, В. В. Титаренко. – М. : Машиностроение, 1985. – 390 с.
31. Ринкевичус Б. С. Оптические методы исследования потоков / Б. С. Ринкевичус. // Лазер-Информ. Информационный бюллетень Лазерной ассоциации. – 2009. – январь, Выпуск 2 (401). – С. 1 – 6.

Институт технической механики
НАН Украины и НКА Украины,
Днепропетровск

Получено 12.04.11,
в окончательном варианте 12.04.11