

## ТЕРМОГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ПРИБОРАХ СНИЖЕНИЯ УРОВНЯ ЗВУКА ВЫСТРЕЛА СТРЕЛКОВОГО ОРУЖИЯ

В статье рассмотрены особенности термогазодинамических процессов в приборах снижения уровня звука выстрела (ПСУЗВ) стрелкового оружия.

Приведены результаты визуализации течения газа в прозрачных моделях ПСУЗВ и натуральных образцах, полученные авторами.

Материалы статьи позволят совершенствовать методики расчета и разрабатывать новые конструкции ПСУЗВ с улучшенными характеристиками.

В статті розглянуто особливості термогазодинамічних процесів в приладах зниження рівня звуку пострілу (ПЗРЗП) стрілецької зброї.

Приведено результати візуалізації течії газу в прозорих моделях ПЗРЗП та натурних зразках, отримані авторами.

Матеріали статті дозволять удосконалити методики розрахунку та розробляти нові конструкції ПЗРЗП з покращеними характеристиками.

The paper deals with the special features of the thermogasodynamical processes in sound suppressors (PSUZVs) for small arms.

The author's results of the gas flow visualization in the PSUZV transparent models and full-scale specimens are reported.

The presented data will allow improvements in the calculated techniques and development of new designs of PSUZVs with the enhanced characteristics.

Как показано в [1, 2], представления о термогазодинамических процессах в приборах снижения уровня звука выстрела (ПСУЗВ), используемые при разработке методик определения их характеристик, не учитывают ряд существенных особенностей этих процессов.

Для дальнейшего уточнения и развития методов определения характеристик ПСУЗВ необходимо проанализировать особенности термогазодинамических процессов в их полостях как проявление таких физических явлений:

- 1) околодульные струйные течения при выстреле (дульный выхлоп);
- 2) сверхзвуковые импульсные струйные течения;
- 3) течение и торможение высокотемпературных сверхзвуковых потоков в цилиндрических каналах, снабженных загромождающими поперечное сечение препятствиями;
- 4) распространение детонационных волн в газовзвесах по прямолинейным каналам, претерпевающим внезапное расширение, ограниченное боковыми стенками при наличии препятствий.

Цель настоящей работы – анализ особенностей этих физических явлений для подготовки базы данных и последующего уточнения представлений и параметров термогазодинамических процессов в ПСУЗВ.

Особенности «дульного выхлопа» как околодульного струйного течения при выстреле (п.1) и сверхзвукового импульсного струйного течения (п. 2), а также частично проблемы по п. 3 изложены в [2].

Проблема торможения вязкого сверхзвукового потока в каналах решается, в основном, в связи с важностью этой задачи для современных перспективных воздушно-реактивных двигателей и аэродинамических труб.

Некоторые аспекты этой проблемы важны для разработки математических моделей, установления картины течения и характера термогазодинамических процессов в полостях ПСУЗВ.

Вопросу торможения вязкого сверхзвукового потока в каналах посвящен ряд работ, например [3 – 12].

«Процессы торможения сверхзвуковых течений в каналах, несмотря на многолетние предшествующие исследования, все еще остаются во многих аспектах terra incognita газовой динамики» [3].

При входе в канал сверхзвукового потока на стенках образуются пограничные слои. Баланса между развитием пограничных слоев и невязкого сверхзвукового ядра нет. Режим реализующегося течения может быть критическим (сверхзвуковым в среднем), и может иметь место переход в дозвуковое течение под влиянием каких-либо причин на выходе (дросселирования, энергосвободения, вдува массы). Переход в дозвуковое течение, как показано в [3], происходит через сложную структуру скачков и областей отрывного пристеночного течения, которую называют псевдоскачком. Образование псевдоскачка связано с проявлением сил вязкости при одновременном проявлении газодинамических эффектов невязких течений.

Распределения чисел Маха в поперечных сечениях канала при различных отношениях длины к диаметру канала ( $\frac{X}{D}$ ) приведены на рис. 1 [3].

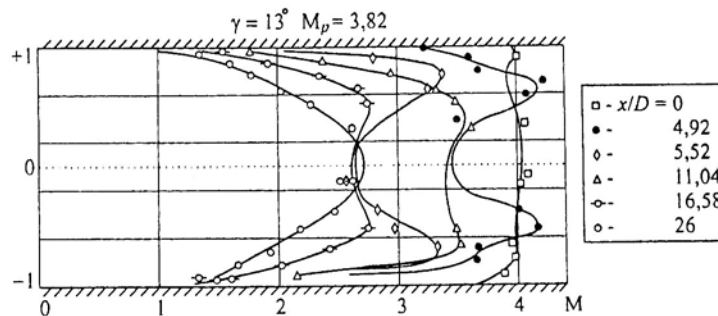


Рис. 1 – Распределения чисел  $M$  в поперечных сечениях канала

Из рис. 1 видно, что профили чисел  $M$  в поперечных сечениях канала при различных  $\frac{X}{D}$  имеют «провалы», которые связаны с наличием дисков Маха в ядре потока.

В отличие от прямого скачка в невязком потоке, в реальных течениях из-за наличия пограничного слоя область перехода сверхзвукового потока в дозвуковое течение, образуемая при взаимодействии турбулентного пограничного слоя и скачков уплотнения, занимает некоторую длину. При достаточно толстых пограничных слоях, например в длинных трубах, протяженность области перехода сверхзвукового потока в дозвуковое течение составляет  $\sim 5 - 10$  диаметров трубы.

На рис. 2 [3] приведены типичные снимки процесса торможения сверхзвукового потока в плоском канале.

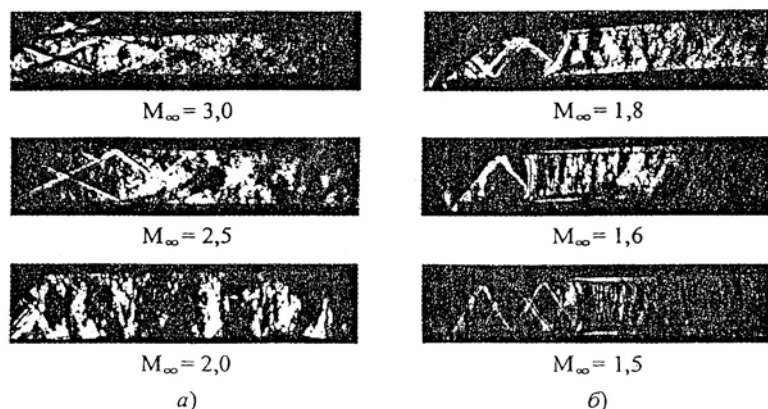


Рис. 2 – Фотоснимки процесса торможения в плоском канале

Поток, сверхзвуковой на входе, трансформируется в дозвуковой в системе скачков и волн разрежения, взаимодействующих с пограничным слоем. У стенки наблюдается изменение давления с определенной периодичностью.

При рассмотрении проблемы торможения сверхзвуковых высокотемпературных течений в каналах следует иметь в виду, что используемые расчетно-теоретические методы далеки от совершенства и иногда не подтверждаются экспериментальными результатами.

Это объясняется сложностью картины течения и многообразием структуры «псевдокачка», что существенно затрудняет построение обобщенной физической и математической модели развития картины течения в области вязкого сверхзвукового неравномерного потока газа в каналах.

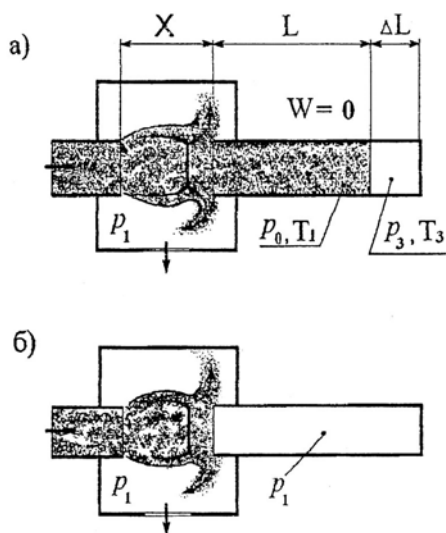


Рис. 3 – Схема газодинамического взаимодействия недорасширенной струи с цилиндрической полостью

может увеличиться намного выше температуры торможения струи. Дальнейшее перемещение полости приводит к замиранию колебаний и нагрева. Периодическим колебаниям давления соответствует наибольший нагрев.

Особенности втекания недорасширенной сверхзвуковой струи в полость (канал) рассмотрены также в [13]. Рассмотрено явление втекания струи и нагрев внутри глубокой полости.

Недорасширенная струя сверхзвукового потока газа втекает в полость, расположенную напротив и осесиметрично соплу (рис. 3 [13]).

Если перемещать полость вниз по потоку, то на некотором расстоянии от сопла, сразу за диском Маха, в полости возбуждаются устойчивые периодические колебания давления с частотой, близкой к основному тону.

При этом амплитуда колебаний может превышать давление подачи, а температура вблизи дна полости

Согласно ударно-волновой модели, периодическое повышение и понижение давления в полости вызывается тем, что струя сначала втекает в полость, а затем её покидает.

Втекание недорасширенной струи вызывает зарождение ударной волны, уходящей вперед по газу полости. За ударной волной давление и температура газа, находящегося в полости, скачком поднимаются от исходных значений давления  $p_1$  и температуры  $T_1$  до  $p_2$  и  $T_2$ .

Дойдя до дна полости, ударная волна отражается и движется теперь уже навстречу втекающему газу. Прохождение отраженной ударной волны переводит оба газа в неподвижное состояние, а в газовой полости вызывает ещё одно повышение давления и температуры до уровня  $p_3$  и  $T_3$ .

В результате после прохождения отраженной волны оказывается, что вблизи дна полости имеется участок длиной  $\Delta L$ , куда внешний газ не дошел. Этот участок заполнен неподвижным газом полости, нагретым до температуры  $T_3$  и сжатым до давления  $p_3$ , которое выше полного давления  $p_0$  струи.

Газ, нагретый сжатием на участке  $\Delta L$ , изотропно расширяется и вытесняет внешний газ из полости. Струя перед входом в трубу перестраивается и растекается в стороны, способствуя опорожнению полости и восстановлению исходных условий для повторного втекания. На рис. 3, б изображено состояние после завершения второго этапа единичной пульсации: полость на всем протяжении заполнена газом, расширившимся до исходного давления  $p_1$ .

Ускорить и усилить нагрев стенки можно повышением частоты колебаний давления, так как этим увеличивается тепловая мощность, которую втекающая струя оставляет в полости.

Глубина полости имеет некую оптимальную величину, при которой достигается наибольший, хотя и не самый быстрый разогрев газа. В такой цилиндрической полости с длиной, составляющей 20 – 30 диаметров, был впервые обнаружен аномальный газодинамический нагрев и получена температура на уровне 1000°C [13].

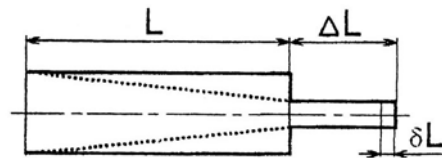


Рис. 4 К выбору оптимального контура резонансной трубы (резонатора)

В диффузоре с малым углом сужения сверхзвуковой поток последовательно теряет скорость в большом количестве косых скачков уплотнения, пока в каком-то сечении диффузора после замыкающего слабого прямого скачка не станет

дозвуковым. За замыкающим скачком дальнейшее течение в сужающемся канале диффузора идет с нарастанием скорости, и в цилиндрическую полость  $\Delta L$  газ втекает с критической скоростью, вызывая перед фронтом появление ударной волны. Таким образом, в резонансной трубе, снабженной сверхзвуковым диффузором, можно получить ударно-волновые колебания давления, сопровождаемые интенсивным разогревом.

В работе [6] приведены экспериментальные данные о нагреве газа, втекающего в цилиндрическую либо коническую полости, имеющие отверстия в дне. Измерения, проведенные авторами [6], показали, что в цилиндрической полости температура нагрева  $T_n$  получается несравненно ниже, чем в конической с углом конусности  $\theta = 3,5^\circ$ . Так, при относительном диаметре выпу-

сужения  $\delta = 0,5$  температура нагрева  $T_n$  в конической полости была в 1,5 раза выше, чем в цилиндрической. При этом в конической полости температура нагрева  $T_n$  была в 1,5 раза выше, чем в цилиндрической. При этом в конической полости температура нагрева  $T_n$  была в 1,5 раза выше, чем в цилиндрической.

ского отверстия  $d_c/d_j \approx 0,2$  максимальный прирост температуры ( $T_n - T_0$ ) в конической полости с  $\theta = 3,5^\circ$  был выше по сравнению с цилиндрической примерно в 2,5 раза. Этот эффект необходимо иметь в виду при проектировании ПСУЗВ, так как в коническом корпусе эффективность преобразования энергии втекающих в него пороховых газов должна быть более высокой, чем в цилиндрическом.

Выход сильной ударной волны из осесимметричного канала, а также детонационные волны в каналах переменного сечения рассмотрены в работах [4, 14 – 19].

Для рассматриваемой нами проблемы особый интерес представляет дифракция ударной волны при внезапном расширении канала. Такая конфигурация типична для соединения канала ствола оружия с наддульным устройством, например глушителем.

В течении за уступом со временем развиваются процессы взаимодействия ударной волны и вихря, ударной волны и сдвигового слоя, возникают различные типы отражения пристенной ударной волны, вторичная ударная волна и пары ударных волн, индуцированных вихрем [4].

В работе [4] на основе физико-математической модели движения двухфазной среды в рамках двухскоростной двухтемпературной механики гетерогенных сред и численного моделирования проанализированы волновые структуры, возникающие при дифракции ударных волн (УВ) умеренной интенсивности при внезапном изменении сечения плоского канала.



Рис. 5 – Схема течения при дифракции ударной волны на обратном уступе в газах

волной. На рис. 5 приведена схема течения, которое наблюдается в экспериментах и выявляется на шпирен-фотографиях [4]. При выходе УВ из узкой части канала в широкую на угле расширения возникают волны разрежения, которые приводят к искривлению фронта падающей УВ. Течение, схема которого приведена на рис. 5, является сверхзвуковым.

Сдвиговой слой, образовавшийся при отрыве потока от поверхности узкой части канала, сворачивается в вихрь. Вблизи вихря образуется вторичный скачок, который позволяет согласовать условия за искривленной УВ и расширяющимся течением. Кроме того, вторичный скачок, как и вихрь, позво-

В качестве основы взят численный метод для расчета двумерных нестационарных детонационных течений газозвесей реагирующих частиц в рамках двухскоростного, двухтемпературного приближения механики гетерогенных сред [4].

В [4] приведены характерные черты течения в газе при прохождении обратного уступа ударной

ляет согласовать условия, возникающие за проходящей и искривленной УВ. К точке пересечения падающего плоского скачка и крайней характеристики веера волн разрежения примыкает искривленная контактная поверхность, которая отделяет газ, прошедший через проходящую плоскую УВ, от газа за дифрагированной волной.

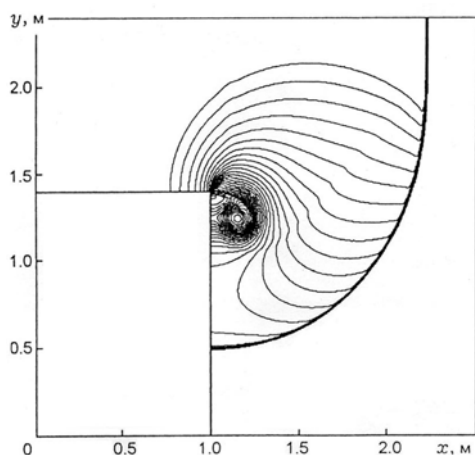


Рис. 6 – Расчетные картины дифракции ударной волны на обратном уступе в воздухе. Изолинии плотности газа,  $M = 1,5$

Перечисленные особенности (контактная поверхность и вторичный скачок) наиболее ярко выражены при достаточно больших значениях числа Маха ( $M > 1,5 - 2$ ).

Указанные особенности течения воспроизведены в численных расчетах, результаты которых приведены на рис. 6 [4].

В [17] рассмотрены особенности распространения детонационных волн в газовзвесах в каналах с

внезапным расширением. Описаны особенности взаимодействия вышедшей из узкой части канала УВ со стенками, ограничивающими широкую часть канала. Показано, что развитие детонационного процесса в канале с расширением во многом обусловлено протеканием начального этапа – дифракцией детонационной волны на обратном уступе.

После достижения фронтом ударной волны стенки широкой части канала и его отражения происходит формирование сильной поперечной волны. Типичная картина соответствующего течения показана на рис. 7 в виде численных шпирен-фотографий в последовательные моменты времени. Отраженная волна видна на рис. 7, а (обозначена символом *A*). Фронт отраженной волны искривляется при прохождении вихревой зоны (рис. 7, б, участок *B*) и смыкается с присущими этой зоне скачками (рис. 7, в, участок *C*).

Известен ряд работ, посвященных численному моделированию газодинамических процессов в приборах снижения уровня звука выстрела стрелкового оружия [20 – 23], в которых рассмотренные особенности термогазодинамических процессов в глушителях звука выстрела частично учтены.

Пакет прикладных программ Gas Dynamics Tool (GDT) [23, 24] предназначен для численного моделирования газодинамических процессов в широком диапазоне начальных и граничных условий струйных течений, задачах внутренней и внешней аэродинамики, баллистики, горения и детонации.

Моделирование осуществляется посредством решения нелинейных уравнений Эйлера или Навье–Стокса при наличии значительного количества подмодулей, описывающих такие физико-химические процессы, как теплопроводность, диффузия, многофазность течения, химические реакции в фазах и др.

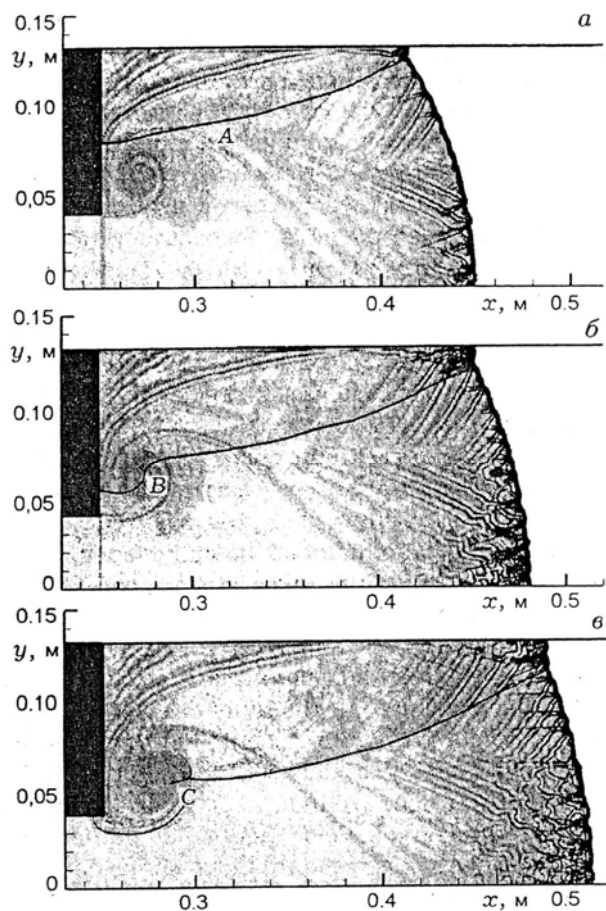


Рис. 7 – Развитие течения после отражения волны от стенки в закритическом режиме

На рис. 8 [22] представлено сопоставление теневой фотографии (сверху) и результатов численного моделирования для процесса прохождения ударной волновой системы препятствий (как это, например, имеет место в полости глушителя звука выстрела стрелкового оружия).

Основной трудностью при моделировании термогазодинамических процессов, происходящих в дульных насадках (дульный тормоз и дульный глушитель), является сложная геометрия этих задач.

Это трехмерные или двумерные задачи с геометрией, которую трудно или невозможно привести к комбинации стандартных геометрических примитивов, таких как сфера, параллелепипед, конус и т.п. Вследствие сложной геометрии течение имеет множество взаимодействующих разрывов, что на фоне нестационарности задачи накладывает весьма жесткие требования не только на качество расчетных схем, но и на вычислительные ресурсы, используемые при моделировании процесса.

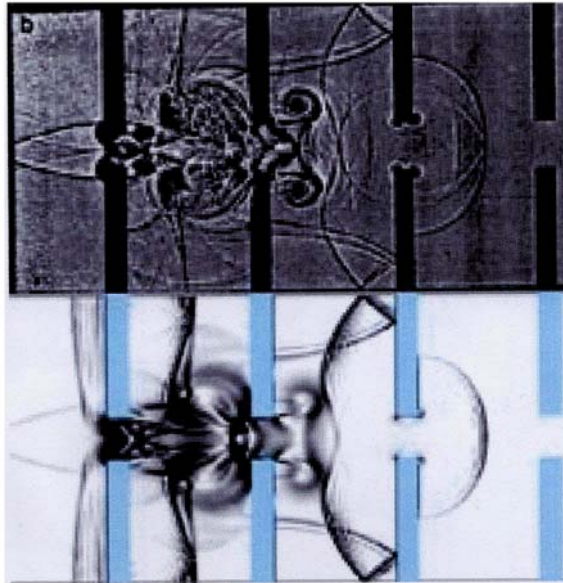


Рис. 8 – Распределение модуля первой производной плотности (снизу) и теневая фотография прохождения ударной волны через систему препятствий

Задача о движении пули в дульном глушителе, например, решена в [22], см. рис. 9, 10, на которых представлены распределение давления и положение ударных волн в форме распределения модуля градиента плотности в полости глушителя, полученные с помощью этой методики.

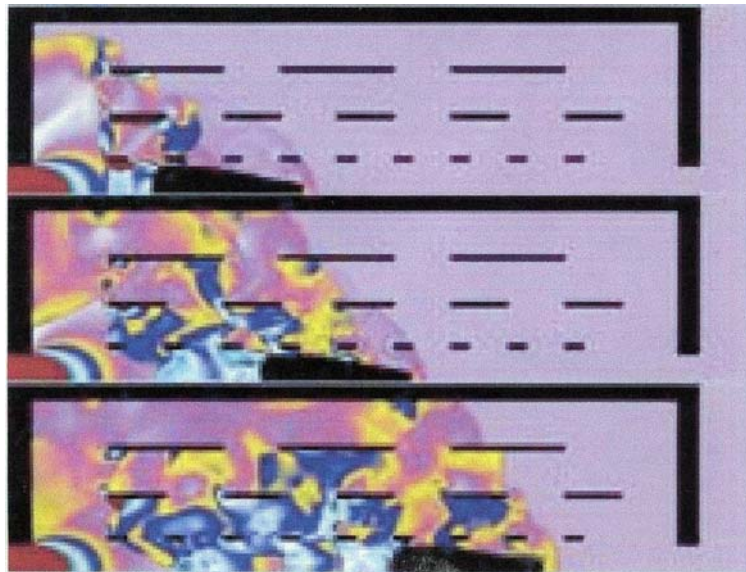


Рис. 9 – Распределение давления при прохождении пулей дульного глушителя



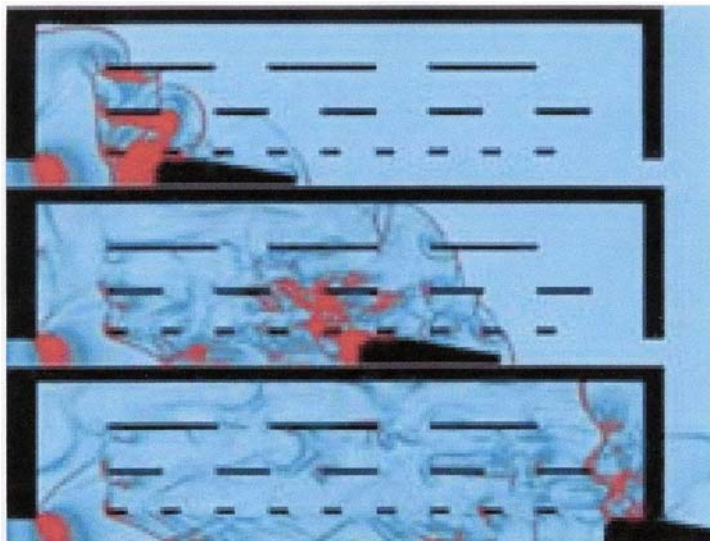
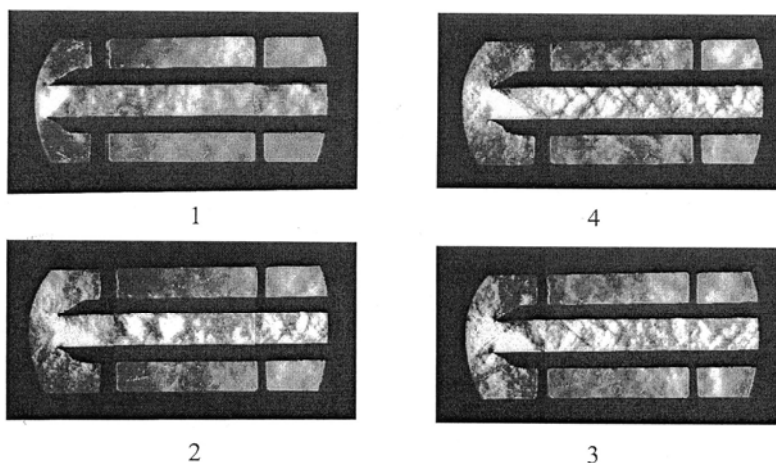


Рис. 10 – Расположение скачков уплотнителя в глушителе

Фирма ООО «Тесис», Москва, Россия, разработала систему моделирования движения жидкости и газа [24] Flow Vision версия 2.5.4, которая позволяет моделировать газодинамические процессы в ПСУЗВ.

Сложные и трудоемкие численные исследования процессов движения газа в полости ПСУЗВ привели авторов статьи к необходимости экспериментального подтверждения полученных в расчетах газодинамических характеристик газового потока.

Авторы провели экспериментальные исследования по визуализации картины течения газа в полости прибора снижения уровня звука выстрела, результаты которых частично изложены в [25].

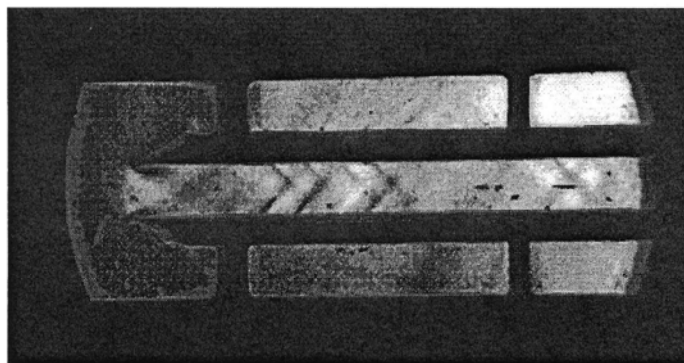


1 – ( $P_0 = 0,2$  МПа); 2 – ( $P_0 = 0,4$  МПа); 3 – ( $P_0 = 0,6$  МПа); 4 – ( $P_0 = 0,8$  МПа)

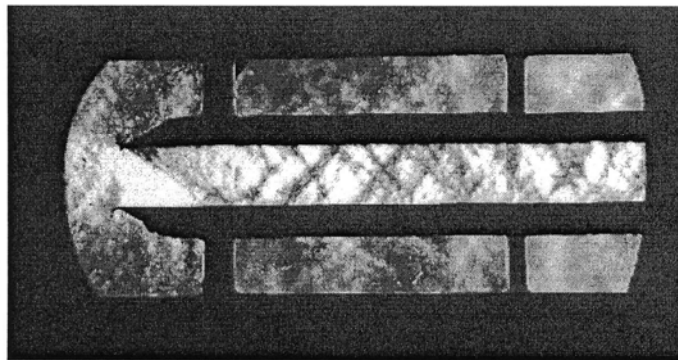
Рис. 11 – Теплеровские снимки последовательных стадий развития течения ( $M = 2$ ) в канале модели ПСУЗВ

На фотографиях (рис. 11 (поз. 1)) показана визуализационная картина течения в прозрачной модели ПСУЗВ, полученная с помощью поляризационного интерферометра при давлении на входе  $P_0 = 0,8$  МПа. Варианты последовательной цифровой обработки кадров показаны на том же рисунке (поз. 2, 3, 4).

На фотографиях (рис. 12) показаны визуализационные картины течения в модели ПСУЗВ, полученные с помощью поляризационного интерферометра (рис. 12 а) и методом Теплера (рис. 12 б).



а)



б)

а) поляризационный интерферометр;

б) метод Теплера (искровая экспозиция, длительность вспышки 10 мкс)

Рис. 12 – Визуализационные картины, полученные различными методами при  $P_0 = 0,8$  МПа

Полученная информация о течении в каналах ПСУЗВ (см. рис. 11) согласуется с полученными ранее результатами и дополняет их.

При этом, исследовано обтекание большого количества элементов внутренних каналов ПСУЗВ. Например, получены визуализационные картины в первой и второй камерах модели глушителя, течение в его канале исследовано на большую относительную длину (см. рис. 12).

Анализ рис. 11 – рис. 12 показывает корреляцию визуализационных картин, полученных на интерферометре и на приборе Теплера.

Анализируя рис. 13, можно подтвердить вывод о зависимости структурных и турбулентных возмущений в полостях модели ПСУЗВ от давления на входе.

Авторы провели также натурные испытания ПСУЗВ-122А с целью уточнения термогазодинамической картины течения в полости глушителя. После испытаний глушитель был разобран и выполнены оттиски следов пороховых газов на наружной поверхности втулок (рис. 13). В целом, термогазодинамическая картина течения подтверждает изложенную авторами в [26].

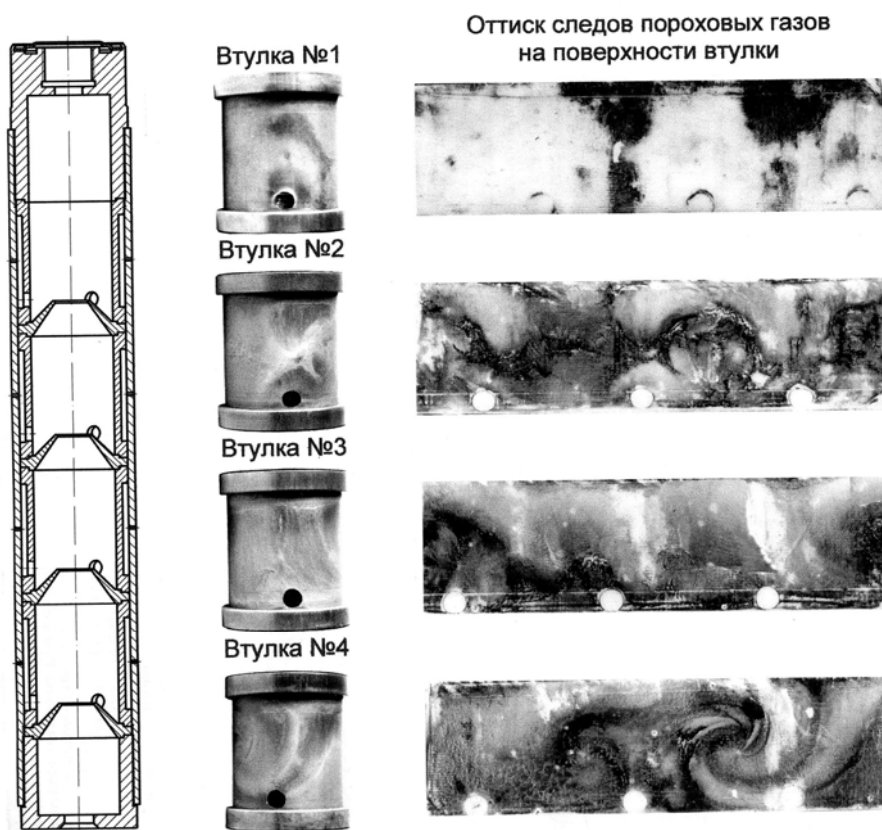
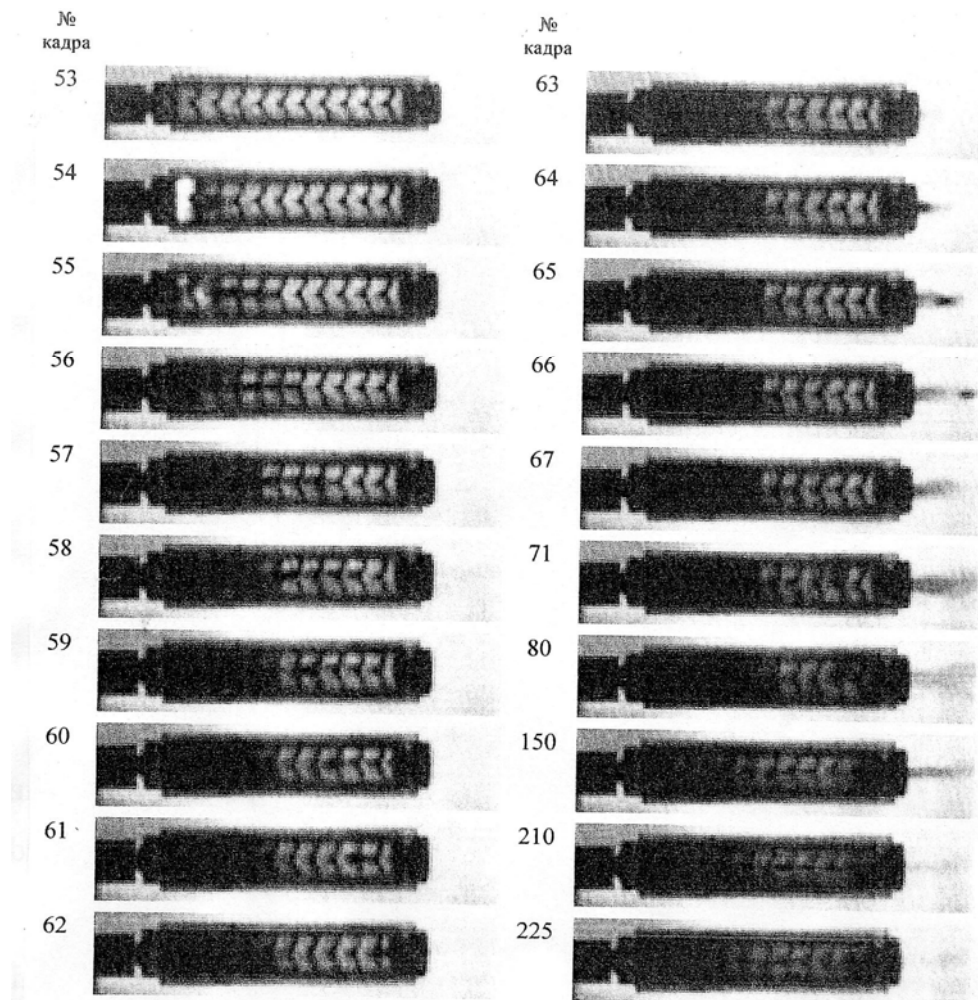


Рис. 13 – Следы пороховых газов на наружных поверхностях втулок ПСУЗВ-122А

В [20] приведена рентгенограмма скоростной съемки процессов, происходящих в корпусе глушителя звука выстрела стрелкового оружия (рис. 14), коррелирующая с картиной течения, полученной авторами статьи.



625 кадров/с, 1,6 мс между кадрами.

Рис. 14 – Скоростная рентгеновская съемка процессов, происходящих в корпусе глушителя звука выстрела стрелкового оружия при прохождении через него пули

Из приведенной картины следует, что в испытанном глушителе работает, в основном, первая половина полости с перегородками. Плотность газа, давление и скорости во второй половине корпуса существенно ниже. Давление частично восстанавливается у дна корпуса глушителя, где наблюдается также некоторое повышение температуры газа. В связи с изложенным представляется излишним наличие в этом глушителе десяти перегородок, т.к. перегородки, установленные во второй половине корпуса глушителя, нагружены незначительно.

Уточнение характера термогазодинамических процессов в корпусе ПСУЗВ и разрабатываемых методик их определения должно основываться на особенностях рассмотрения физических явлений, рассмотренных в настоящей работе. Существуют методики, в которых эти особенности частично учтены. Например, Gas Dynamics TOOL (GDT) [21, 22] или Flow Vision, версия 2.5.4.

Выполненные по различным методикам расчетные исследования течения пороховых газов в полости ПСУЗВ и результаты испытаний выявили ряд закономерностей, присущих термогазодинамическим процессам в ПСУЗВ [1, 27]:

– характеристики газового потока в полости ПСУЗВ определяются параметрами пороховых газов на дульном срезе ствола, геометрическими харак-

теристиками камер, конструктивными и кинематическими характеристиками снаряда, зазором между снарядом и диафрагмами, разделяющими камеры;

– влияние процесса установления течения на процесс формирования потока в каждой последующей камере существенно увеличивается при уменьшении размеров предыдущей камеры;

– наличие снаряда в потоке приводит к его торможению в центральной части и образованию отраженной от дна снаряда ударной волны, которая, действуя на диафрагмы камер, увеличивает тянущее усилие ПСУЗВ на оружие и тормозит поток в камерах;

– наибольшим тепловым нагрузкам у многокамерного ПСУЗВ подвергается первая камера;

– максимальные значения давления наблюдаются в первой камере на поверхности диафрагмы – в местах ее сочленения с оболочкой и вблизи снарядного входа в диафрагму;

– в камерах образуются вихри, массовая скорость потока в которых существенно меньше скорости на оси потока, что приводит к интенсификации процесса догорания пороховых газов в камерах и уменьшению поперечного сечения центральной части потока;

– процесс установления течения в объеме ПСУЗВ приводит к возникновению нестационарных ударных волн, давление на фронте которых соизмеримо с давлением в потоке, а также зон разрежения, давление в которых ниже атмосферного; эти ударные волны обуславливают пульсирующий характер изменения давления в камерах, причем наиболее существенные пульсации возникают в первой камере, где интенсивность потока максимальна;

– пульсации давления в полости ПСУЗВ могут создавать дополнительный шум пороховых газов;

– наличие снаряда в потоке пороховых газов приводит к увеличению максимальных значений давления в режиме установления течения и к большему динамическому воздействию на оружие со стороны ПСУЗВ;

– режим установления течения приводит к возникновению знакопеременного тянущего усилия, действующего со стороны ПСУЗВ на оружие в процессе движения снаряда в камерах, что влияет на динамику движения оружия малой массы и на точность стрельбы из такого оружия;

– количество перегородок в полости ПСУЗВ не должно превышать пяти, при этом отмечается наибольшая эффективность снижения уровня звука выстрела.

Таким образом, рассмотренные в настоящей работе физические явления и их особенности, приведенные результаты, описание особенностей физических явлений в полостях ПСУЗВ, в том числе полученных экспериментально, позволят уточнить методики определения значений параметров термогазодинамических процессов в глушителях звука выстрела стрелкового оружия с целью их эффективного проектирования.

1. Коновалов Н. А. О термогазодинамических процессах в приборах снижения уровня звука выстрела стрелкового оружия / Н. А. Коновалов, О. В. Пилипенко, Ю. А. Кваша, Г. А. Поляков, А. Д. Скорик, В. И. Коваленко // *Техническая механика*. – 2011. – № 2. – С. 73 – 85.
2. Коновалов Н. А. Характеристики термогазодинамического процесса на выходе из прибора снижения уровня звука выстрела стрелкового оружия / Н. А. Коновалов, О. В. Пилипенко, Г. А. Поляков, А. Д. Скорик, Г. А. Стрельников // *Техническая механика*. – 2012. – № 3. – С. 64 – 78.
3. Процессы торможения сверхзвуковых течений в каналах / О. В. Гуськов, В. И. Копченов, Н. И. Липатов, В. Н. Острась, В. П. Старухин. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 168 с.

4. Федоров А. В. Численное исследование дифракции ударных волн в каналах переменного сечения в газозвесах / А. В. Федоров, Ю. В. Кратова, Т. А. Хмель // Физика горения и взрыва. – 2008. – Т. 44, № 1. – С. 85–95.
5. [Электронный ресурс] / Режим доступа [http://gpa.ugatu.su/index science.shtml?www/science/issl sverchhzhv tech/gaz din dla ily/gaz din dla i eu](http://gpa.ugatu.su/index%20science.shtml?www/science/issl%20sverchhzhv%20tech/gaz%20din%20dla%20ily/gaz%20din%20dla%20eu).
6. Куццов В. М. Пульсация давления и нагрева газа при втекании сверхзвуковой струи в коническую полость / В. М. Куццов, К. Н. Филиппов // Известия АН СССР : Механика жидкости и газа. – 1981. – № 3 – С. 167 – 170.
7. Тимошенко В. И. Численное моделирование струйных течений / В. И. Тимошенко, И. С. Белоцерковец // Техническая механика. – 2008. – № 2. – С. 107 – 122.
8. Набоко И. М. Параметры потока за ударными волнами в CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> и смесях CO<sub>2</sub>, + N<sub>2</sub> / И. М. Набоко, Т. В. Баженова. – Издания АН СССР. Теплофизика высоких температур. – 1971. – Т. 9, № 3. – С. 550 – 556.
9. Гавриленко И. П. Особенности массообмена в канале при взаимодействии с высокотемпературным потоком / И. П. Гавриленко, В. А. Золотов // Известия высших учебных заведений : Машиностроение. – 1984. – № 1. – С. 42 – 46.
10. SUGIUAMA Hiromu Location and Oscillation Phenomena of Pseudo-Shock Waves in a Straight Rectangular Duct / Hiromu SUGIUAMA, Hideki TAKEDA, Jianping ZHANG, Kuokai OKUDA and Hideaki YAMAGISHI // JSME International Journal, Series II. – 1988. – Vol. 31, № 1. – P. 9 – 15.
11. Райхенбах Г. Ударные волны в газах : Физика быстропотекающих процессов / Г. Райхенбах. – М. : «Мир», 1971. – С. 56 – 102.
12. Фрайвальд Г. Быстрые химические реакции, горение и детонация в газах : Физика быстропотекающих процессов / Г. Фрайвальд. – М. : «Мир», 1971. – С. 209 – 242.
13. Кесаев Х. В. Термодинамика резонансной трубы / Х. В. Кесаев // Вестник Московского авиационного института. – 2008. – Т. 15, № 3. – С. 15 – 24.
14. Васильев Е. И. Расчет нестационарных течений сжимаемого газа с внутренними ударными волнами : дис. канд. физ.-мат. наук. : утв. 1984 / Е. И. Васильев. – М., 1984. – 133 с. – 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы».
15. Журавская Т. А. Распространение волн детонации в плоских каналах с препятствиями / Т. А. Журавская // Механика жидкости и газа. – 2007. – № 6. – С. 135 – 143.
16. Кратова Ю. В. Дифракция плоской детонационной волны на обратном уступе в газозвеси / Ю. В. Кратова, А. В. Федоров, Т. А. Хмель // Физика горения и взрыва. – 2009. – Т. 45, № 5. – С. 95 – 107.
17. Кратова Ю. В. Распространение детонационных волн в газозвесах в каналах с внезапным расширением / Ю. В. Кратова, А. В. Федоров, Т. А. Хмель // Физика горения и взрыва. – 2011. – Т. 47, № 1. – С. 80 – 91.
18. Кратова Ю. В. Распространение ударных и детонационных волн в каналах различной геометрии в газозвесах / Ю. В. Кратова, А. В. Федоров, Т. А. Хмель, В. М. Фомин // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. – 2008. – Т. 7. – Электронный журнал. – Режим доступа к журн. <http://www.chemphys.edu.ru/media/files/2008-09-01-006.pdf>.
19. Кратова Ю. В. Численное моделирование ударно-волновых и детонационных течений газозвесей в каналах : дис. канд. физ.-мат. наук. : утв. 2009 / Ю. В. Кратова. Новосибирск, Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христановича Сибирского отделения РАН, 2009. – 154 с.
20. [Электронный ресурс] / Режим доступа [www.silensertests.com/flash.html](http://www.silensertests.com/flash.html).
21. [Электронный ресурс] / Режим доступа [http://cfd.ru/russian/products/GDT/gdt\\_app.htm.art](http://cfd.ru/russian/products/GDT/gdt_app.htm.art).
22. [Электронный ресурс] / Режим доступа <http://www.sapr.ru/article.aspx?id=7982&iid=322>.
23. [Электронный ресурс] / Режим доступа [www.silensertalk.com/forum/viewtopic.php?t=497738.start=O&postdays=O&postdader=ase&highlight](http://www.silensertalk.com/forum/viewtopic.php?t=497738.start=O&postdays=O&postdader=ase&highlight).
24. Flow Vision, версия 2.5.4. Система моделирования движения жидкости и газа. Руководство пользователя. – Россия, Москва : ООО «ТЕСИС», 2008. – 285 с.
25. Коновалов Н. А. Ударная газодинамическая установка и ее использование при визуализации течения газа в приборах снижения уровня звука выстрела / Н. А. Коновалов, О. В. Пилипенко, А. Д. Скорик, Г. А. Поляков, Г. А. Стрельников, Д. В. Семенчук, А. Д. Чаплиц, А. И. Астапов // Оптические методы исследования потоков : Одиннадцатая международная научно-техническая конференция : сб. докладов. – М. : МЭИ, 2011. – [Электронный ресурс]: труды конференции. – Электрон. дан. – М. : МЭИ (ТУ), 2011. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Доклад №65, 9 с. – ISBN 978-5-9902974-1-8 – № гос. регистрации 0321101669.
26. Пат. на винахід № 95693 Україна, МПК (2011.01), F41A 21/30 (2006.01), F41A 17/00. Глушник звуку пострілу стрілецької зброї / Коновалов М. А., Пилипенко О. В., Пугач Є. О., Скорік О. Д., Стрельников Г. О., Авдєєв А. М.; заявник і патентовласник Інститут технічної механіки НАН України і НКА України. – a2009 13359: заявл. 22.12.09; опубл. 25.08.2011, Бюл.№ 16. – 12 с.
27. Поляков Г. А. Определение характеристик приборов снижения уровня звука выстрела стрелкового оружия / Г. А. Поляков // Техническая механика. – 2010. №4. – С. 57 – 74.

Институт технической механики  
НАН Украины и НКА Украины,  
Днепропетровск

Получено 23.05.12,  
в окончательном варианте 23.05.12