

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ГАЗА В ПРИБОРЕ СНИЖЕНИЯ УРОВНЯ
ЗВУКА ВЫСТРЕЛА СТРЕЛКОВОГО ОРУЖИЯ МЕТОДОМ
ВИЗУАЛИЗАЦИИ**

Приведены результаты исследований течения газа в модели прибора снижения уровня звука выстрела стрелкового оружия методом визуализации. Результаты эксперимента протестированы на данных расчетов в сверхзвуковом диффузоре с внутренним сжатием и на визуализационной картине сверхзвуковой струи.

Приведено результати досліджень течії газу в моделі приладу зниження рівня звуку пострілу стрілецької зброї методом візуалізації.

Результати експерименту протестовано на результатах розрахунків в надзвуковому дифузорі з внутрішнім стисненням та на візуалізаційній картині надзвукового струменя.

The results of visualization studies of the gas flow in the model of the small arms sound suppressor are presented.

The experimental results are tested using the calculated data for a supersonic internal-compression diffuser and the pattern of a supersonic jet.

При создании и совершенствовании современных приборов снижения уровня звука выстрела стрелкового оружия (ПСУЗВ) возникает необходимость получения информации о газовых потоках и процессах в его внутренних каналах [1, 2].

Исследования течений во внутренних каналах теоретическими методами предполагают, как правило, использование существенных упрощений и гипотез, необходимых для получения решений. Недостатком существующих методов является их интегральный характер, который не позволяет при проектировании ПСУЗВ учитывать нестационарный характер истечения струи пороховых газов из дульного среза оружия. Применение вычислительных методов для решения указанной задачи затруднено в связи с отсутствием в настоящее время достаточно точных моделей турбулентности, необходимых для расчета характеристик трансзвукового потока газа внутри отверстий, соединяющих камеры [1].

Остается невыясненным вопрос о генерации шумовых излучений отдельными элементами ПСУЗВ (как в частотном, так и в энергетическом выражении). Не менее важным и малоисследованным является вопрос локального участия элементов глушителя в преобразовании потенциальной и кинетической энергии пороховых газов в тепловую.

В полости ПСУЗВ любой конструкции происходят различные газотермодинамические процессы, вызывающие потери энергии пороховых газов и уменьшающие уровень звука выстрела. В частности, происходит: расширение центрального потока газа в периферийных камерах; образование развитых вихревых потоков; дросселирование потоков на перепускных отверстиях в диафрагмах, разделяющих камеры; взаимодействие встречных потоков, волн сжатия и расширения и др. Динамика потока и его структура определяются газодинамическими параметрами пороховых газов в дульном срезе ствола, геометрией полости глушителя, конструктивными и кинематическими характеристиками снаряда, относительным диаметром снарядного канала и др.

В работе [1] приводятся результаты численного исследования нестационарного течения в многокамерной полости ПСУЗВ. На рис. 1 [1] приведена

одна из стадий течения газа в многокамерной полости, полученная численным моделированием.

Волновая структура потока свидетельствует о сверхзвуковом поперечном течении в камерах и отрывах потока на кромках диафрагм. При прохождении потока 1 по центральному каналу 2 в камерах 3 волновая картина 4 изменяется как в продольном, так и поперечном направлениях.

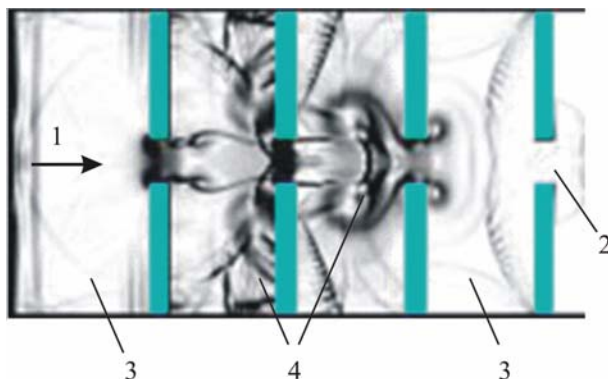


Рис. 1

Расчеты показывают, что в камерах ПСУЗВ образуются торообразные вихри с массовой скоростью, существенно меньшей массовой скорости на оси потока, которые, воздействуя на центральную часть потока, сжимают его. При этом в каждой последующей камере процесс образования вихрей повторяется, но с меньшей интенсивностью, что приводит к меньшему сжатию

центрального потока вниз по течению. В процессе установления течения в полости ПСУЗВ в потоке возникают нестационарные 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 стенками камер, потоком и между собой, вызывают пульсации давления в полости глушителя. На рис. 2 приведены результаты расчетов давления в струе пороховых газов в камерах глушителя по оси симметрии для различных моментов времени после выстрела [1].

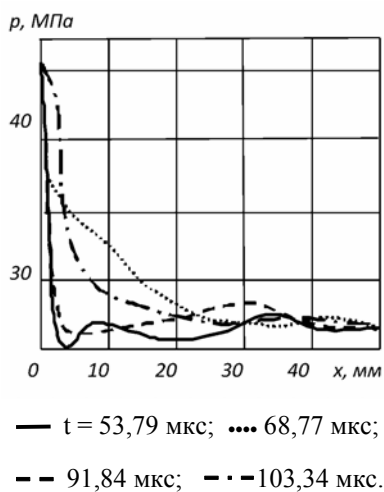


Рис. 2

Сложный характер течения в полости глушителя требует разработки корректных методов его расчета, что возможно при наличии надежных экспериментальных данных о характеристиках течения в полости.

В настоящее время существуют надежные методы экспериментального определения эффективности глушителя, довольно подробно исследована картина течения газа на выходе из ствола оружия и глушителя [1]. Картина течения газа в полости глушителя экспериментальным путем практически не исследована.

Существует ряд экспериментальных способов наблюдения и оценки течения газа через оружие и ПСУЗВ. Большин-

ство из них предполагает наблюдение процессов непосредственно за срезом исследуемых устройств [3 – 7]. При этом визуализация течения внутри ПСУЗВ ведется косвенными и малоэффективными методами.

В работе [2] предложен новый подход к выявлению особенностей течения в полости глушителя, описана экспериментальная установка и приведены предварительные результаты экспериментов.

В последнее время новые возможности при визуализации открываются путем использования цифровых технологий: применением видеокамер с высокой разрешающей способностью, новых методов обработки изображений и др., а также специализированных (кумулятивных, импульсных лазерных, искровых и др.) источников освещения [8 – 13].

В этом ряду одним из наиболее перспективных направлений следует считать цветной теневой метод, являющийся развитием теневого метода [8, 14 – 18]. Отмечена тенденция его использования в качестве количественного метода исследования прозрачных неоднородностей [13, 14]. Цветные изображения дают экспериментатору больше сведений о поле течения, чем черно-белые, поскольку на них вместо одной плотности почернения изменяются сразу три компонента: цвет, насыщенность цвета и яркость изображения [14 – 17]. В работах [14, 15] делается попытка корректного использования указанных составляющих.

Настоящая работа является развитием проведенных в Институте технической механики НАНУ и НКАУ исследований [2] и выполнена с более совершенным приборным оснащением и доработанной экспериментальной установкой и моделью, обеспечивающей сверхзвуковые режимы течения газа.

Исследовалось течение газа в полости распространенной в настоящее время схемы многокамерного глушителя расширительного типа (модель ПБС-ИТМ-5 [2, 19]) с относительно большой первой камерой (рис. 3). На рисунке: 1 – проекционная плоскость моделирования канала, 2, 3 – плоскость и ось визуализации при проведении исследований.

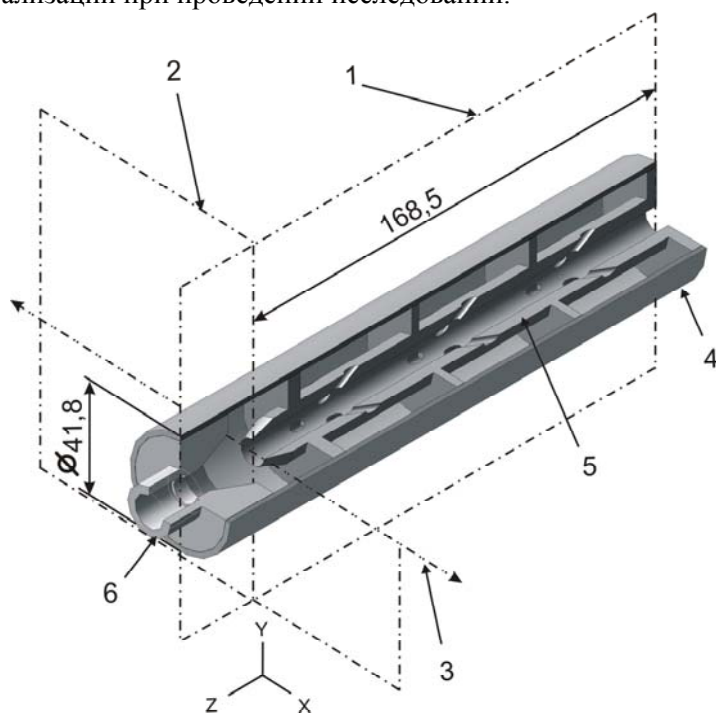


Рис. 3

Для создания сверхзвуковых режимов течения газа на входе модели был установлен аэродинамический узел со сменными сверхзвуковыми соплами, показанный на рис. 4.

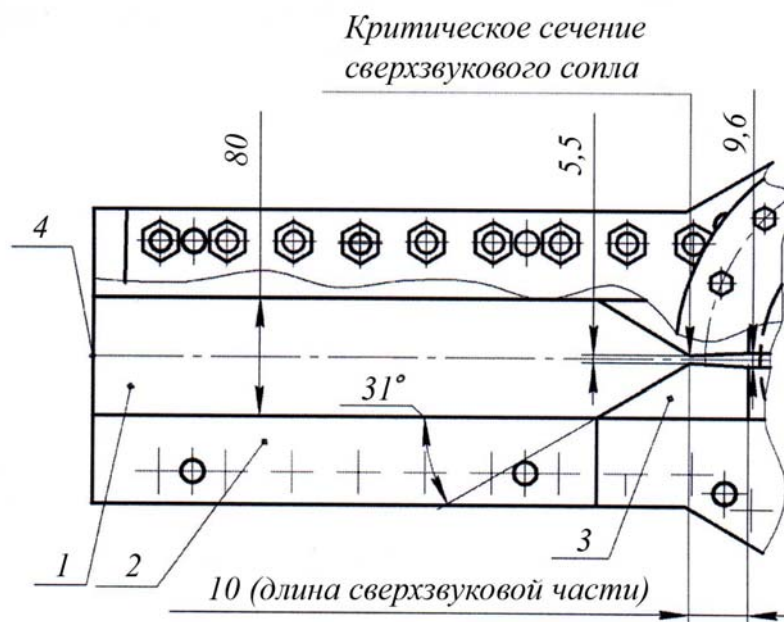


Рис. 4

Узел содержит ресивер 1, ограниченный проставками 2 и сменными сверхзвуковыми соплами 3. Детали 2 и 3 (см. рис. 4), выполнены толщиной 25 мм и симметрично закреплены на боковых крышках [2]. Наблюдение за внутренним течением производилось через оптические стекла, вмонтированные в визуализационные блоки, устройство которых подробно описано в [2, 14, 20]. Плоская модель способна выдерживать внутреннее давление до 20 МПа.

Сечение плоской модели в плане [2] соответствует сечению глушителя ПБС-ИТМ-5 плоскостью YZ (см. рис. 3).

Фотография модели перед окончательной сборкой показана на рис. 5 (визуализационные блоки и верхняя крышка сняты). Обозначения на рисунке: 1 – плоское сверхзвуковое сопло; 2 – ресивер; 3 – исследуемая область; 4 – шпильки крепления; 5 – уплотнения; 6 – фиксирующие штифты. Детали 1 являются сменными. Путем их замены можно регулировать скорость потока на входе в модель. Принципиальной особенностью «сверхзвуковой» плоской модели (рис. 5), отличающей ее от модели, описанной в [2], является наличие сверхзвукового сопла 1 (рис. 5), разгоняющего поток примерно до числа Маха $M = 2$ (расчетное давление около 0,8 МПа) и ресивера 2 высотой $h = 80$ мм [14, 21].

Подготовка модели к испытаниям велась с учетом особенностей визуализации газовых потоков в зависимости от их режимных параметров.

Для визуализации оптических неоднородностей в каналах ПСУЗВ использовалась теневая установка с рабочим полем визуализации $D = 70$ мм, подробно описанная в [2, 14], оборудованная цифровой видеокамерой DCR – SR 100 E с форматом 3 мегапикселей [9]. В качестве источника постоянного

освещения использовалась лампа накаливания КГМ мощностью 200 Вт. Теневой Шлирен-прибор был отрегулирован по следующим параметрам: ширина щели – 0,2 мм; установка ножа от оптической оси прибора – 0,05 мм; расположение щели и ножа – вертикальное.

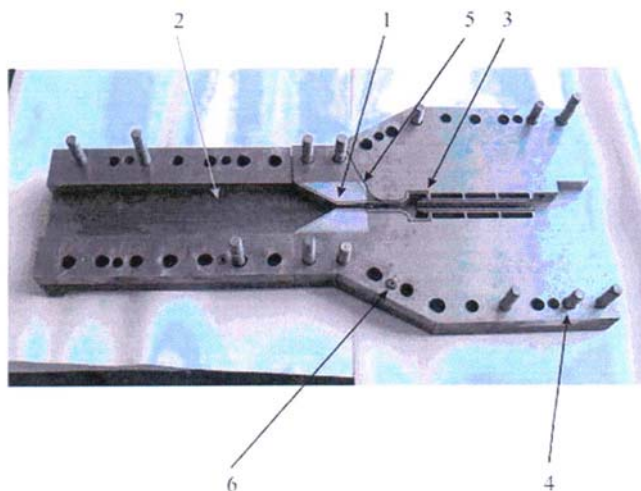


Рис. 5.

Учитывая нестационарный, циклический характер течения в ПСУЗВ и его малоизученность, особый интерес представляет непрерывная съемка течения газа во внутреннем канале от подачи давления в канал до его полной остановки.

Система измерений и подачи воздуха высокого давления подробно описана в [2]. При экспериментах использовался очищенный и осушенный воздух высокого давления с точкой росы, не превышающей $T_p = -55^\circ\text{C}$.

На плоской модели ПСУЗВ, подсоединенной к источнику высокого давления по схеме, показанной на рис. 6, были проведены продувки «холодным» воздухом.

Схема экспериментальной установки показана на рис. 6. Обозначения на рисунке: 1 – модель ПСУЗВ; 2 – трубопровод; 3 – манометр контроля давления; 4 – термопара; 5 – расходомерный участок; 6 и 7 – датчики давления и перепада давления; 8 – редуктор давления; 9 – вентиль высокого давления.

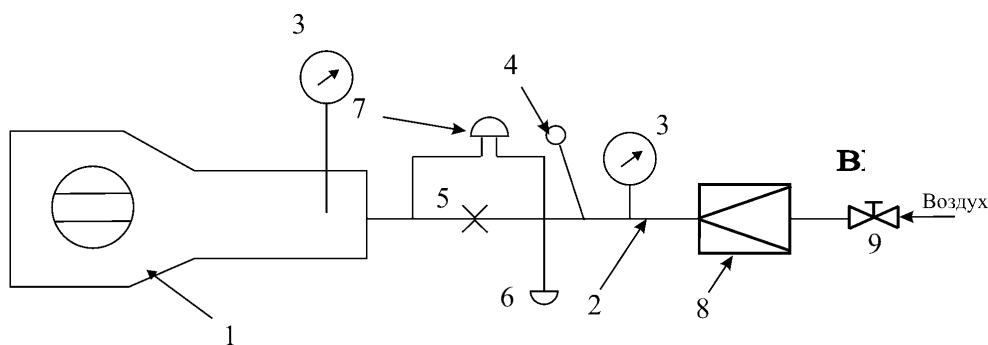


Рис. 6

После изготовления модель была собрана согласно технической документации и установлена на испытательный стенд, состав и устройство которого подробно описаны в [2, 14].

В настоящих испытаниях в приемной части теневого прибора была установлена цифровая видеокамера DCR – SR 100 E, показанная на рис. 7. Обозначения на рисунке: 1 – цифровая видеокамера DCR – SR 100 E; 2 – рычаг управления видеокамерой; 3 – штатив; 4 – контрольный экран с изображением наблюдаемого объекта; 5 – видеоискатель; 6 – приемная часть теневого прибора; 7 – кронштейн теневого прибора; 8 – визуализируемый объект; 9 – автоматика теневого прибора.

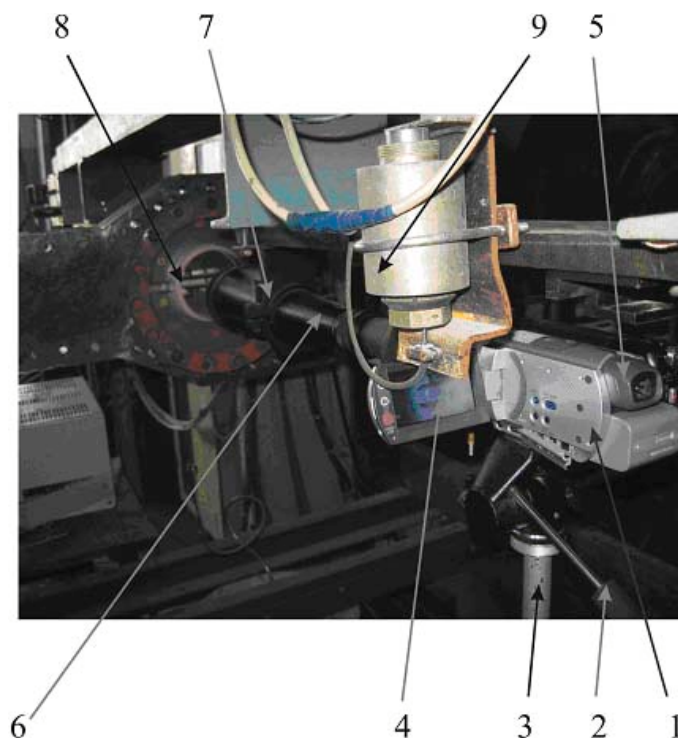


Рис. 7.

Методика определения параметров и визуализационной картины течения газа описана в [2, 11].

Испытания проводились в следующем порядке.

Шаг 1. Дистанционно включалась цифровая камера.

Шаг 2. Производилась видеосъемка цифровой видеокамерой визуализационной картины течения всего цикла работы ПСУЗВ (Шаг 3 – Шаг 6).

Шаг 3. Продувочный газ под рабочим давлением подавался из баллонов высокого давления через вентиль 9 на вход в редуктор 8 (см. рис. 6).

Шаг 4. Значение входного давления регистрировалось на манометре 3.

Шаг 5. Регистрировались параметры испытаний (p_0 – давление на входе в ПСУЗВ, p_1 – давление в канале ПСУЗВ).

Шаг 6. Отключалась подача продувочного газа редуктором 8 (см. рис. 6).

Шаг 7. Выключалась видеокамера.

Шаг 8. Отключалось электропитание элементов автоматики и регулирования.

Шаг 9. Отключалось электропитание теневого прибора.

Шаг 10. Закрывался вентиль 9 ВН 1 (см. рис. 6).

Таблица 1

Результаты измерения параметров газа при визуализации картины течения

Номер испытаний	Номер пуска видеокамеры	Длительность съемки, с	Давление газа p_0 в ресивере модели максимальное, МПа	Температура торможения продувочного газа T_0 , К	Размер установки ножа теневого прибора, мм	Примечание (регистрация теневой картины)
1	M2U00886	43	0,08	283	0,05	+
2	M2U00887	36	0,08	280	0,05	-
3	M2U00888	39	0,16	285	0,05	+
4	M2U00889	48	0,3	290	0,05	+
5	M2U00890	35	0,5	290	0,05	+
6	M2U00891	68	0,5	285	0,05	+
7	M2U00892	32	0,5	290	0,01	+

На фотографии (рис. 8) показана визуализационная картина течения газа в модели ПСУЗВ, зафиксированная при максимальном давлении (испытание №7). Обозначения на рисунке: а) визуализационная картина в модели ПСУЗВ при $p_0=0,5$ МПа; $M=2$; б) схема течения при тех же режимах: 1 – контуры модели; 2, 3 – поле визуализации; 4 – волновая структура потока при обтекании внешнего тупого угла; 5 – область дозвукового течения.

Покадровый анализ визуализационных картин позволяет сделать некоторые выводы об изменении структуры течения с изменением давления в тракте модели (рис. 8).

Анализируя фотографию, можно сделать следующие выводы. При сверхзвуковых режимах течение в первой камере ПСУЗВ аналогично течению в сверхзвуковом диффузоре с внутренним сжатием [22, 23]. В таком диффузоре косой скачок отходит от кромки обечайки А и пересекается в точке Б на оси диффузора со скачком, идущим от противоположной кромки.

Поток газа в скачке АБ отклоняется от первоначального направления в сторону наклона скачка. В точке Б линии тока вынуждены возвратиться к первоначальному направлению, в связи с чем возникает отраженный скачок БВ. По наблюдению динамики последовательных кадров видеосъемки за указанными скачками (в направлении течения газа) можно предположить поперечный скачок (или систему поперечных скачков) уплотнения, за которым поток становится дозвуковым. Следует также учитывать нарастание пограничного слоя по длине проточной части, эффективно «сужающего» канал. Дальнейшее течение в сужающемся канале идет с увеличением скорости, причем в узком сечении скорость должна быть ниже или равна критической. В этом случае за узким сечением может возникнуть дополнительная сверхзвуковая зона, завершаемая поперечным скачком уплотнения.

При дальнейших повышениях давления на входе в канал ПСУЗВ [22, 23], возможно частичное изоэнтропическое торможение.

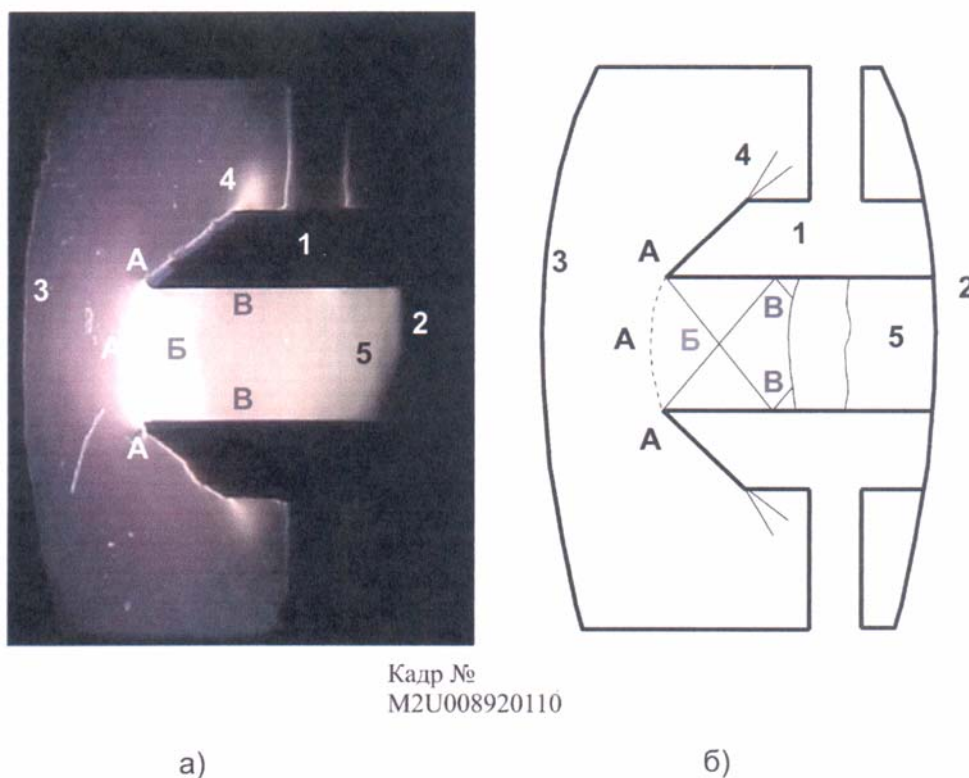


Рис. 8

Возмущения 4 (см. рис. 8) в структуре течения, зафиксированной в настоящих экспериментах, можно объяснить как возникающие при обтекании внешнего тупого угла [22, 23].

Зафиксированным в настоящих исследованиях является отклонение светового потока участком визуализационной картины (А – А – А – Б). Возмущения происходят от торможения потока за косым скачком, который отходит от кромки обечайки А и пересекается в точке Б на оси канала со скачком, идущим от противоположной кромки. Возмущения активны на визуализационных стеклах и распространяются по пограничному слою вверх по потоку до фронта А – А – А.

Полученная газодинамическая картина течения и результаты измерений согласуются с результатами определения особенностей течения газа во внутреннем тракте [23].

При анализе визуализационных картин (см. табл. 1) и сравнении их с ранее опубликованными следует учитывать следующее.

Картина визуализации должна быть соотнесена с режимами эксперимента и экспозицией. Зависимость «режим фотосъемки – структура картины визуализации» не исследована.

Выдержки фотографирования 10^{-5} с и более показывают, как правило, осредненную по времени и площади картину течения, характеризующую его динамику.

Малые выдержки фотографирования (10^{-5} с и менее) характеризуют локальную структуру течения.

Изложенное выше подтверждается данными, приведенными в [23] (рис. 67 и рис. 276). На них показаны фотографии сверхзвуковой струи, сделанные с малой и большой выдержкой и отличающиеся элементами визуализационных картин.

1. Ручное огнестрельное оружие бесшумного боя. Приборы снижения уровня звука выстрела для автоматов. Проектирование и экспериментальная отработка / Коновалов Н. А., Пилипенко О. В., Скорик А. Д., Кваша Ю. А., Коваленко В. И. – Днепропетровск : НАН Украины и НКА Украины, Институт технической механики, 2008. – 303 с.
2. Исследование течения в плоской модели глушителя звука выстрела стрелкового оружия с применением методов визуализации / Коновалов Н. А., Астанов А. И., Пилипенко О. В., Поляков Г. А., Скорик А. Д., Тынына С. В., Чаплиц А. Д. // Техническая механика. – Днепропетровск : ИТМ. – 2007. – №2. – С.137 – 146.
3. Комиссарук В. А. Применение дифракционного интерферометра в баллистическом эксперименте / В. А. Комиссарук, В. П. Мартынов, Н. П. Менде // ПТЭ. – 1979. – №1. – С. 207 – 210.
4. Менде Н. П. Наблюдение околодульных процессов / Н. П. Менде // Физико-газодинамические баллистические исследования. – Л. : Наука. – 1980. – С. 225 – 231.
5. Герасимов С. И. Аэробаллистический тир ВНИИЭФ. Методика проведения экспериментов, результаты испытаний / С. И. Герасимов, В. Е. Лысенков, И. Ю. Смирнов // Труды IX Междунар. конф. «Оптические методы исследования потоков» (ОМИП 2007). – М. : Издательский дом МЭИ, 2007. – С. 386 – 389.
6. Settles G. S. The penn state full-scale schlieren system / G. S. Settles // 11th international symposium of flow visualization. – Notre Dame, Indiana (United States), 09 - 12 August 2004. – 12 p.
7. Beric W. Visualization of complex shock wave phenomena / W. Beric // 12th international symposium of flow visualization. – German Aerospace Center (DLR), Göttingen, Germany, 10 - 14 September 2006. – 10 p.
7. Сокольский М. Н. Допуски и качество оптического изображения / М. Н. Сокольский. – Л. : Машиностроение, 1989. – 222 с.
8. Бевистер С. Цифровая фотография. Базовый курс. / С. Бевистер, под ред. А. И. Лагина : Пер. с англ. Н. Энгельмана. – М. : Экспо, 2008. – 152 с. : ил. 8.
9. Белоконь К. Г. Визуализация структуры течения во впускных и выпускных каналах ДВС с использованием теневого прибора ИАБ – 458 [Электронный ресурс] / К. Г. Белоконь. – Режим доступа // <http://www.kampt.ru/scitech/base/nomer10/belokon/belokon.htm>.
10. Морозов А. Н. Стабилизация изображений регистрируемой сцены при наличии возмущений / А. Н. Морозов // Труды VIII Междунар. конф. «Оптические методы исследования потоков» (ОМИП 2007). – М. : Издательский дом МЭИ, 2005. – С. 324 – 327.
11. Герасимов Н. И. Кумулятивные источники света / Н. И. Герасимов, Ю. И. Файков, С. А. Холин. – Саров : ВНИИЭФ, 2002. – 160 с.
12. Волокитин Н. И. Методы исследования пульсирующих режимов течения в канале со сверхзвуковой скоростью потока на входе / Н. И. Волокитин, А. М. Демьяненко, А. А. Смоголев // Труды IX Междунар. конф. «Оптические методы исследования потоков» (ОМИП 2007). – М. : Издательский дом МЭИ, 2007. – С. 532 - 535.
13. Чаплиц А. Д. Визуализация газовых потоков во внутренних каналах / А. Д. Чаплиц, А. И. Астанов. – Днепропетровск : НАН Украины и НКА Украины, Институт технической механики, 2007. – 209 с.
14. Гвоздев С. М. Расчет пороговых характеристик восприятия при визуализации цветных изображений наблюдаемых объектов / С. М. Гвоздев, Н. Д. Садовникова // Труды IX Междунар. конф. «Оптические методы исследования потоков» (ОМИП 2007). – М. : Издательский дом МЭИ, 2007. – С. 264 – 267.
15. Чжен П. Управление отрывом потока / П. Чжен : Пер. с англ. – М. : Мир, 1979. – 552 с.
16. Васильев Л. А. Теневые методы / Л. А. Васильев. – М. : Наука, 1968. – 400 с.
17. Скотников М. М. Теневые количественные методы в газовой динамике / М. М. Скотников. – М. : Наука. – 1976. – 160 с.
18. Патент Украины на полезную модель №28410, МПК⁷ F41A 21/30. Устройство снижения уровня звука выстрела стрелкового оружия / Коновалов Н. А., Астанов А. И., Скорик А. Д., Пилипенко О. В., Поляков Г. А., Чаплиц А. Д. по заявке №200708125; от 17.07.07.
19. А.с. 1821665 СССР, МКИ⁵ G 01 M 9/06. Устройство для аэродинамических исследований / А. Д. Чаплиц. – №4862942/23; заявлено 17.08.93; опубл. 30.10.94, Бюл. № 22. – 3 с.
20. Стрельников Г. А. Регулируемые сверхзвуковые сопла малой длины / Г. А. Стрельников. – Днепропетровск : Изд-во ДГУ, 1993. – 192 с.
21. Алемасов В. Е. Термоанемометрические методы исследования отрывных течений / В. Е. Алемасов, Г. А. Глебов, А. П. Козлов. – Казань : Казанский филиал АН СССР, 1989. – 178 с.
22. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика / Г. Н. Абрамович. – М. : Наука. – 1969. – 824 с.
23. Альбом течений жидкости и газа: Пер. англ. / Сост. М. Ван-Дайк. – М. : Мир, 1986. – 184 с.

КБЮ,
Днепропетровск