

УДК 533.6.07

**Н.А. КОНОВАЛОВ¹, О.В. ПИЛИПЕНКО¹, Г.А. СТРЕЛЬНИКОВ¹,
Г.А. ПОЛЯКОВ², А.Д. СКОРИК¹, А.Д. ЧАПЛИЦ¹, А.И. АСТАПОВ¹**¹ *Институт технической механики НАН Украины и НКА Украины,
Днепропетровск, Украина*² *Конструкторское бюро «Южное» НКА Украины, Днепропетровск, Украина***РАЗРАБОТКА СРЕДСТВ И МЕТОДОВ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ТЕЧЕНИЯ ГАЗА
В ПРИБОРАХ СНИЖЕНИЯ ЗВУКА ВЫСТРЕЛА СТРЕЛКОВОГО ОРУЖИЯ**

Создана установка и предложена методика экспериментального исследования течения газа в приборах снижения уровня звука выстрела стрелкового оружия (ПСУЗВ). Работоспособность установки подтверждена тестовыми повышенными нагрузками, обоснована ее эксплуатационная технологичность. Видеосъемка возмущений в канале плоской модели ПСУЗВ зафиксировала особенности течения, в частности, его пульсирующий характер. Результаты выполненных исследований можно использовать при проектировании и отработке шумоглушающих устройств с внутренним расширением газа в машиностроении, энергетической, оборонной промышленности и др.

Ключевые слова: прибор снижения уровня звука выстрела, аэродинамический эксперимент, ударная волна, визуализация, сверхзвуковое течение, теневая установка, видеосъемка.

Введение

При создании сложных и высокотехнологичных изделий военного и гражданского назначения, обтекаемых газами в различных условиях, все чаще обращаются к смежным областям знаний: газодинамике сопел и турбин, аэродинамике самолета, детально отработанным авиационно-космическим экспериментальным технологиям и др., что в свою очередь приводит к обновлению и расширению знаний по данным дисциплинам. Причина такого подхода заключается в том, что многие процессы обтекания имеют отрывной характер и труднодоступны для теоретического исследования. Для понимания особенностей газодинамических явлений используются методы визуализации, являющиеся одной из технологических операций аэродинамического эксперимента.

При проектировании и отработке современных приборов снижения уровня звука выстрела стрелкового оружия (ПСУЗВ) необходимо иметь информацию о течении газов в его внутренних каналах [1 – 3].

Принцип действия ПСУЗВ основан на процессах преобразования и потери энергии пороховых газов, уменьшающих уровень звука выстрела. При прохождении пули по стволу оружия со сверхзвуковой скоростью впереди нее образуется ударная волна, а за пулей движется высокотемпературный газ (продукты сгорания порохового заряда).

При развитии течения в ПСУЗВ происходит расширение центрального потока газа в периферий-

ных 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 на дульном срезе ствола, геометрией полости глушителя, конструктивными и кинематическими характеристиками пули и др.

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 стенками камер, потоком и между собой, вызывают пульсации давления в полости глушителя.

В работе [1] приводятся результаты численного исследования нестационарного течения в многокамерном ПСУЗВ, показывающие, что в камерах 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.

Постановка задачи исследования

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 связи с вызывающим резонансные акустические колебания [4] импульсным воздействием на ограничительные поверхности ударных волн представляется важным вопрос о генерации пиковых шумовых излучений отдельными элементами ПСУЗВ (как в частотном, так и в энергетическом выражении).

Не менее значительным и малоисследованным является вопрос локального участия элементов ПСУЗВ в преобразовании потенциальной и кинетической энергии пороховых газов в тепловую.

Существует ряд экспериментальных способов наблюдения течения газа через оружие и ПСУЗВ. Большинство из них предполагает наблюдение процессов непосредственно за срезом исследуемых устройств [5 – 9].

Эксперименты по исследованию воздействия ударных волн (генерируемых ударными аэродинамическими установками) с шумоглушащими элементами ПСУЗВ в доступной литературе не описаны.

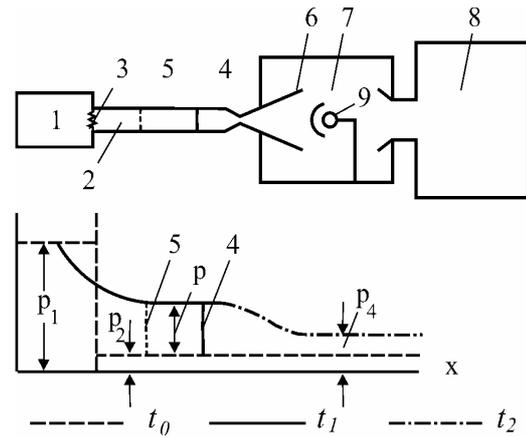
Экспериментальные исследования течения в полости глушителя проводятся в ИТМ НАН и НКА Украины [2, 3].

В [2, 3] приведено описание экспериментальной аэродинамической установки. Она оснащена теневым Шлирен-прибором и имеет стыковочный узел для установки моделей исследуемых устройств с внутренними каналами.

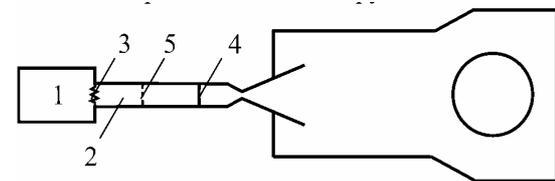
На рис. 1 сравниваются схемы классической [4, 10, 11] ударной трубы (а) и экспериментальной установки ИТМ для исследования шумоглушащих устройств (б).

Классическая ударная труба (рис. 1, а) представляет собой ступенчатую цилиндрическую трубу, состоящую из двух секций – высокого 1 и низкого 2 давления, разделённых мембраной 3. В секции 1 содержится «толкающий» газ, сжатый до давления p_1 . Секция низкого давления заполняется рабочим газом (воздухом) при низком давлении p_2 .

Это состояние, предшествующее запуску, соответствует времени t_0 . После разрыва мембраны 3 по рабочему газу начинает перемещаться ударная волна 4, которая сжимает его до давления p и повышает температуру. За ударной волной с меньшей скоростью движется контактная поверхность 5, разделяющая толкающий и рабочий газы (момент времени t_1).



а – классическая схема ударной аэродинамической трубы



б – схема экспериментальной установки ИТМ

Рис. 1. Схемы ударных установок

Давление и температура рабочего газа в объёме между ударной волной и контактной поверхностью постоянны. В дальнейшем ударная волна 4 пройдёт через сопло 6 и рабочую часть 7 в ёмкость 8, и в рабочей части установится сверхзвуковое течение с давлением p_4 (момент времени t_2). Исследование обтекания газом модели 9 начинается в тот момент, когда ударная волна 4 пройдёт сечение, в котором расположена модель, и заканчивается, когда в это сечение придёт контактная поверхность.

В ударной установке ИТМ (рис. 1, б) исследуемой моделью служит внутренняя поверхность канала, например ПСУЗВ. Течение развивается гораздо сложнее случая внешнего обтекания (необходимо учитывать трехмерное взаимодействие падающего скачка уплотнения с пограничным слоем).

Иллюстрацией к образованию ударной волны и взаимодействию ее с поверхностью может служить фотография из работы [12] (рис. 2).

Для ударных волн достаточно большой интенсивности структура должна последовательно учитывать стадии установления термодинамического равновесия поступательных, вращательных, для молекулярных газов и колебательных степеней свободы, в определенных условиях — диссоциацию и рекомбинацию молекул, химические реакции, процессы с участием электронов (ионизацию, электронное возбуждение) [11, 12]. В ударной трубе можно получить газ, нагретый до температур, реально существующих при выстреле.

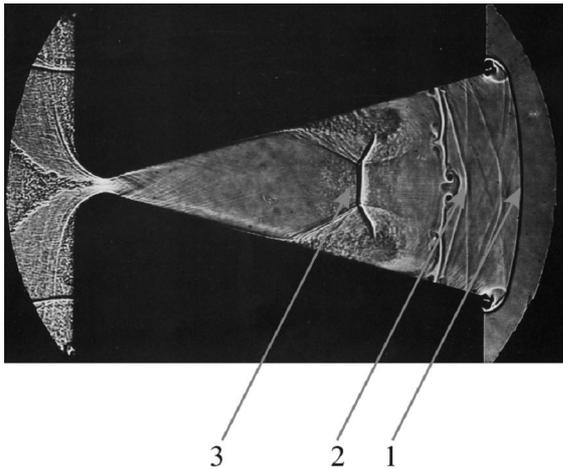


Рис. 2. Схема образования ударной волны в сопле:
1 – падающая ударная волна; 2 – контактные поверхности; 3 – вторичная ударная волна

Такие возможности широко используются при изучении многих химических реакций, различных физических процессов.

Быстротечность газодинамических процессов в установке, затрудняющая их наблюдение и выполнение измерений, приводит к необходимости использования малоинерционных датчиков, бесконтактных средств измерения с применением оптических приборов (теневого, интерференционного), использованием АЦП и обработки экспериментальных данных на ПЭВМ.

Результаты исследований

Первый этап настоящей работы был развитием исследований [2, 3].

Исследовалось течение газа в полости многокамерного глушителя расширительного типа (модель ПБС-ИТМ-5 [13]) с относительно большой первой камерой (рис. 3).

Особенности глушителя и его характеристики подробно описаны в работах [1, 2].

Конструкция экспериментальной плоской модели глушителя ПБС-ИТМ-5 подробно описана в работах [2, 3].

Все детали модели выполнены толщиной 25 мм в двух экземплярах и симметрично закреплены на боковых крышках.

Продольные и поперечные размеры боковых камер, входной и выходной части плоской модели соответствуют размерам сечения глушителя ПБС-ИТМ-5 (рис. 3) плоскостью YZ.

На фотографии (рис. 4) показаны базовые детали модели перед окончательной сборкой (визуализационные блоки и верхняя крышка сняты).

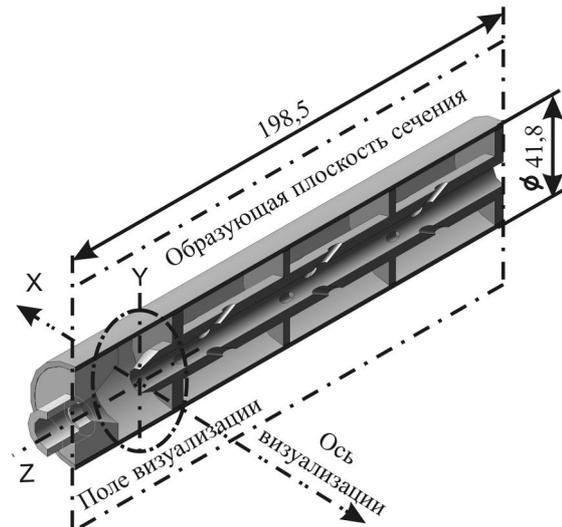


Рис. 3. Схема глушителя ПБС-ИТМ-5

Обозначения на рис. 4: 1 – ресивер; 2 – сменное сверхзвуковое сопло; 3 – исследуемая область (поле визуализации); 4 – профиль модели; 5 – уплотнения

Детали 2 являются сменными. Путем их замены можно регулировать скорость потока на входе в модель. В проведенных испытаниях сопло разгоняло поток примерно до $M = 2$ (расчетное давление около 0,8 МПа). Модель способна выдерживать внутреннее давление до 20 МПа.

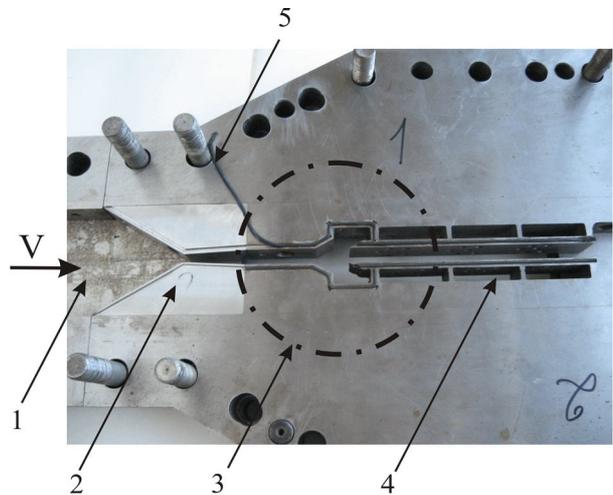


Рис. 4. Плоская модель глушителя ПБС-ИТМ-5

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 [14], оборудованная цифровой видеокамерой DCR – SR 100 E с разрешающей способностью 3 мегапикселей [15].

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.

Учитывая нестационарный, циклический характер течения в ПСУЗВ и его малоизученность,

особый интерес уделялся непрерывной видеосъемке течения во внутреннем канале от подачи давления в канал до его полной остановки.

Система подачи воздуха высокого давления и измерений подробно описана в [2, 3, 14]. При экспериментах использовался очищенный и осушенный воздух высокого давления с точкой росы, не превышающей $T_p = -55^\circ\text{C}$. Схема экспериментальной установки показана на рис. 5.

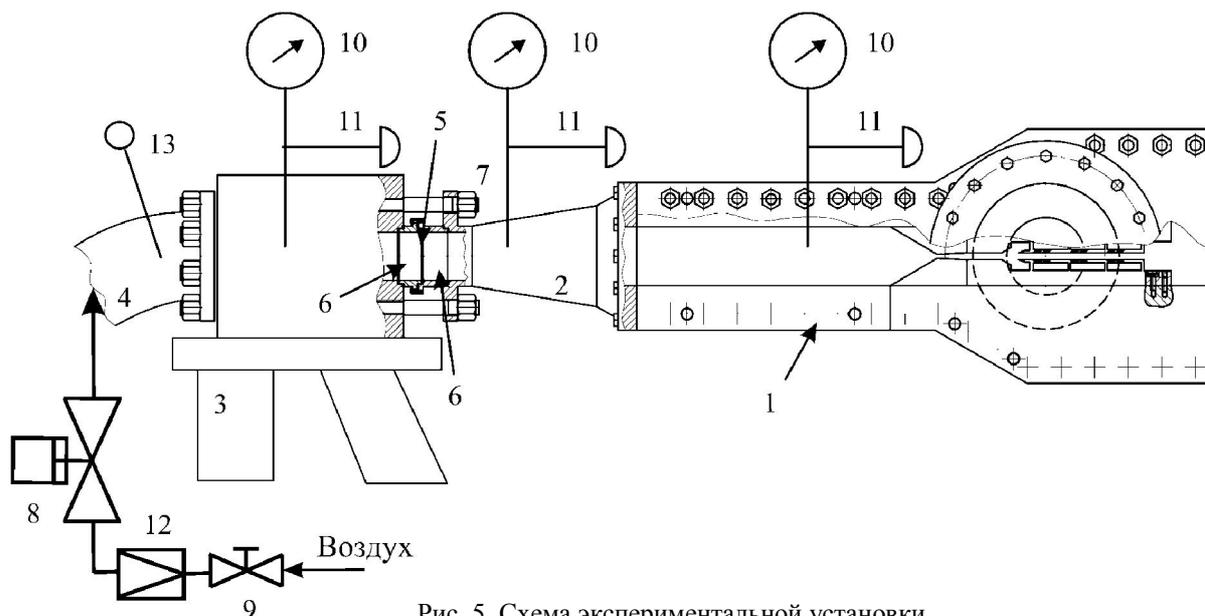


Рис. 5. Схема экспериментальной установки

Обозначения на рис. 5: 1 – модель ПСУЗВ; 2 – переходник; 3 – кронштейн; 4 – магистраль высокого давления; 5 – зажимной паз установки разрывной диафрагмы; 6 – узел разрывной диафрагмы; 7 – крепление мембранного узла; 8 – отсечной клапан; 9 – вентиль высокого давления; 10 – манометры; 11 – датчики давления; 12 – редуктор давления; 13 – термомпара.

Одновременно с созданием аэродинамической ударной трубы совершенствовалась техника эксперимента применительно к воздействию ударной волны на элементы конструкций внутренних каналов, в частности, на элементы каналов ПСУЗВ. Эта задача, связанная с проблемой увеличения эффективности различных шумоглушающих устройств в условиях газодинамических ударных нагрузок, является весьма актуальной.

Такие исследования можно вести на ударной трубе, оснащенной современной теневой и регистрирующей аппаратурой. Необходимо получать серии теневых снимков, дополненных измерением газодинамических параметров при фиксированной скорости ударной волны, позволяющие исследовать нестационарный процесс взаимодействия ударной волны с моделью. Расшифровка теневых картин и

результатов измерений может дать распределение плотности на поверхности тела.

Пересчитывая тем или иным способом распределение давления, можно прогнозировать суммарную силу воздействия потока на тело как функцию времени. Прогнозирование пиковых ударных нагрузок с конкретными элементами конструкций позволит прогнозировать и снижать пиковые шумовые излучения.

«Генератор» ударной волны представляет разрывной мембранный элемент, разрушающийся при критических значениях давления, элементы которого могут попадать в поток и повреждать модель. Для исключения подобных явлений были предложены конструкции разрывных диафрагм с ослабленным сечением 1 (рис. 6).

В зависимости от конкретных материала и технологий изготовления диафрагмы 2 имели различное конструктивное исполнение (варианты А и В). Размеры ослабленного сечения приведены в табл. 1.

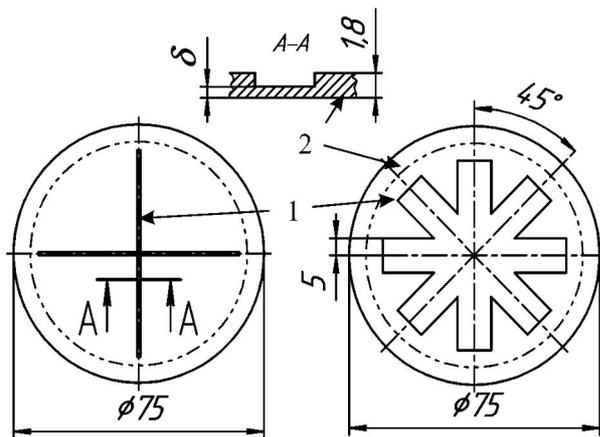
Разработанные диафрагмы «раскрываются» вдоль ослабленных сечений без разрушения и отделения фрагментов. Штрих-пунктирными линиями обозначена область обжима изделий матрицами 6 (рис. 5).

Давление разрушения диафрагмы зависит от ее толщины (табл. 1), а, следовательно, от технологических допусков на изготовление и свойств поставляемого материала. Получение серий теневого снимков при постоянной скорости ударной волны в традиционной технике эксперимента с применением диафрагм неизбежно будет затруднительным из-за разброса давлений разрыва диафрагм.

Таблица 1

Толщина ослабленного сечения диафрагм

δ , мм	Расчетное давление разрыва диафрагмы P , (МПа)	Примечание: вариант В
0,81	5	Материал; лист Д16.А.Т. s1,8 ГОСТ 21631-76
1,14	10	
1,41	15	
1,62	20	



Вариант В

Вариант В

Рис. 6. Особенности конструктивного исполнения разрывных диафрагм

В работе [16] описан быстродействующий клапан, позволяющий при строго фиксированном отношении высокого давления в камере к низкому давлению в канале ударной трубы достаточно быстро, за время, сравнимое с временем раскрытия диафрагмы, соединить камеру с каналом. Клапан, (рис. 7) позволил существенно расширить возможности ударных труб в исследовании различного рода нестационарных процессов, в частности, процессов взаимодействия ударных волн с телами. При широ-

ком диапазоне регулировок время срабатывания клапана не превышает 0,001 с [16].

Кроме узлов, задающих импульсный характер течения, при подготовке экспериментальной установки было разработано техническое новшество, связанное с методикой визуализации сильных ударных волн в канале со значительным абсолютным значением давления торможения.

Специальные условия к установке оптических систем на ударной установке вызваны, с одной стороны, требованиями к качеству стекол и соблюдением параллельности их установки [17, 18], с другой стороны – необходимостью выдерживать большие пульсирующие давления газа и контакт с жесткой механической системой, включающей уплотнение резиновым жгутом при обязательном соблюдении минимальных монтажных зазоров.

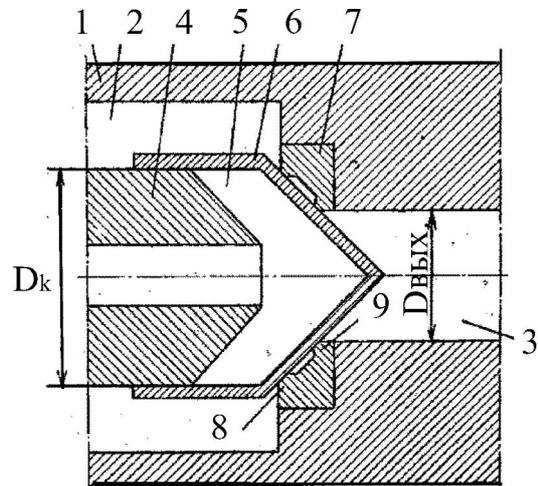


Рис. 7. Быстродействующий клапан:
1 – корпус; 2 – 3 трубы высокого и низкого давлений ($D_{\text{вых}}$); 4 – обтекатель ($D_{\text{н}}$); 5 – рабочая полость (связана с источником управляющего давления); 6 – запорный конус; 7, 8, 9 – седло и уплотнения

Конструкция визуализационной системы плоской модели подробно описана в [14, 19].

Она включает (рис. 8): 1 – образующие рабочего участка; 2 – боковые крышки; 3 – визуализационные стекла; 4 – обечайка из оргстекла; 5 – эластичный материал (герметик); 6 – бурт; 7 – накладной фланец; 8 – крепежные болты; 9 – резиновое уплотнение; 10 – рабочий участок модели; 11 – ось теневого прибора, 12 – калибрующая проставка.

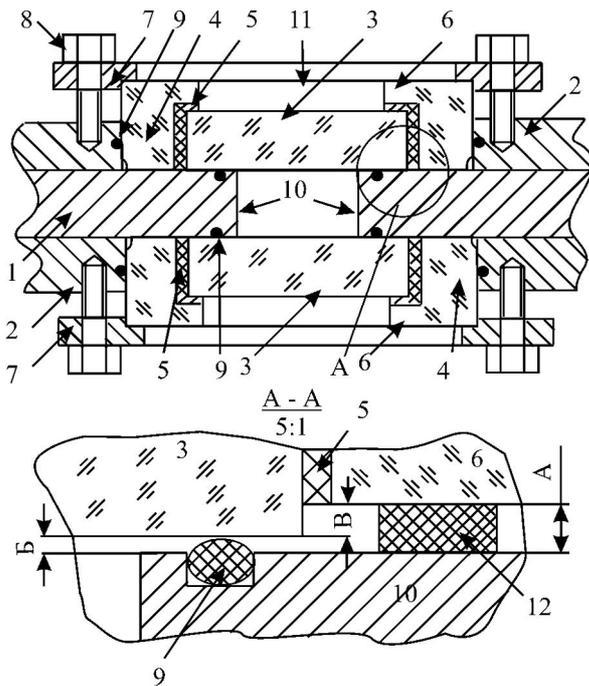


Рис. 8. Особенности сборки и монтажа оптических визуализационных систем

Экспериментальным путем выбиралась размерная цепь ($A = B + B$, табл. 2) регулировки системы.

Момент затяжки болтов 8 находился в пределах 0,5 – 1Нм, что обеспечивало надежное уплотнение рабочих поверхностей в канале 10 при отсутствии разрушающих нагрузок на оптических системах.

Таблица 2

Установочные размеры для стекол

Наименование	Обозначение	Значение зазора, мм
Размер установочного калибра	A	0,4 – 0,5
Зазор стекла над уплотняемой поверхностью	B	0,1 – 0,2
Выступание стекла над обечайкой из оргстекла [17]	B	0,3

При соблюдении установочных размеров (табл. 2) визуализационные стекла 3 будут установлены в соответствии с техническими условиями визуализационного прибора, не будут контактировать с металлическими концентраторами напряжений 1 (только с уплотнениями 9) и надежно прижаты фланцами 7.

Еще одним специальным, газодинамическим узлом является разработанное для настоящих испы-

таний сменное сверхзвуковое сопло 2 (рис. 5).

Общими требованиями к нему являются: малогабаритность [20], максимальная идентичность противоположных деталей; взаимозаменяемость узла, соответствие чертежу (допуска, отклонения и др.), технологичность, эксплуатационная технологичность.

Сложность соблюдения указанных требований видна из чертежа (рис. 9).

Это: наличие фиксирующих штифтовых отверстий 1 и 2, требования к отклонениям размеров (например от базы A до угловой точки 3) и формы, и к конструктивным элементам, определяемые газодинамическими требованиями к узлу.

После сборки в составе плоской модели (рис. 5) открытые полости отверстий 1 и 4 заполнялись эпоксидной смолой и обрабатывались до указанной чистоты обтекаемой газом поверхности.

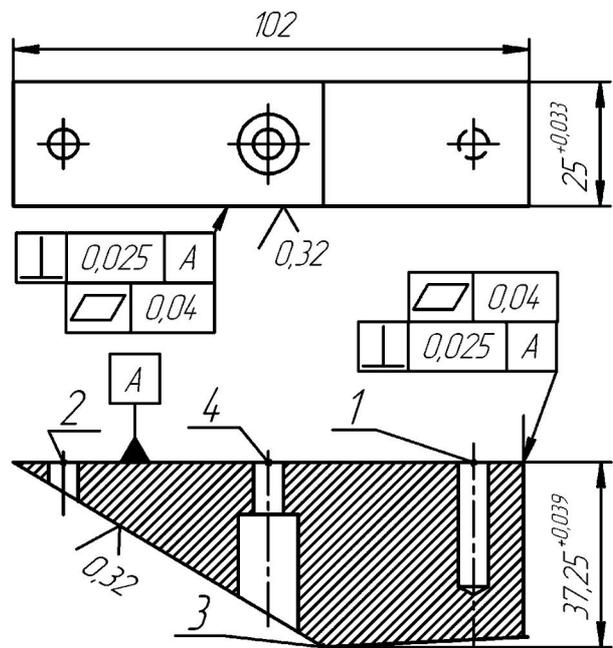


Рис. 9. Конструктивные особенности плоского сверхзвукового сопла

После изготовления отдельных узлов и деталей модель была собрана согласно технической документации и установлена на испытательный стенд (рис. 10), состав и устройство которого подробно описаны в [2, 3, 14].

Перед испытанием в приемной части теневого прибора устанавливается цифровая видеокамера DCR – SR 100 E. Обозначения на рис. 10: 1 – исследуемая модель в сборе; 2 – исследуемый рабочий участок; 3 – оптическая визуализационная система в сборе; 4 – теневой прибор; 5 – фланец; 6 – установочные калибры оптической системы.

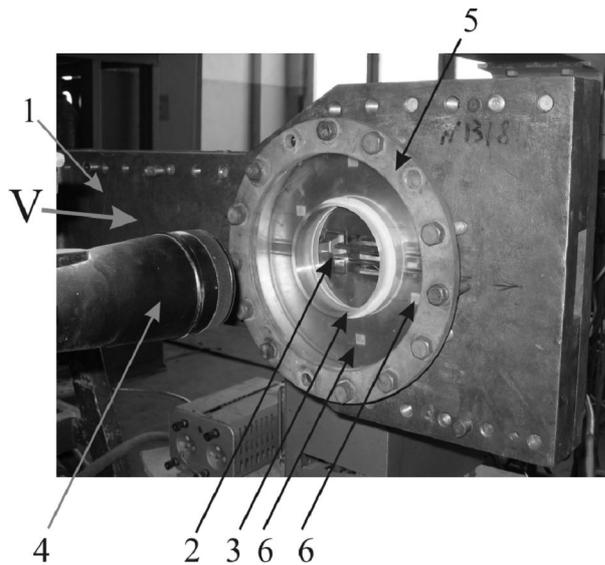


Рис. 10. Модель на испытательном стенде

Работоспособность установки была проверена путем продувок «холодным воздухом» плоской модели ПСУЗВ, подсоединенной к источнику высокого давления по схеме, показанной на рис. 6.

Методика определения параметров и визуализационной картины течения газа описана в [2, 3, 14].

Испытания проводились в следующем порядке.

1. Включалось электропитание элементов автоматики и регулирования.

2. Включалось электропитание теневого прибора.

3. Открывался вентиль 9 и продувочный газ под рабочим давлением подавался из баллонов высокого давления через редуктор 12 на вход в отсечной клапан 8.

4. Включалась видеокамера.

5. Производилась скоростная видеосъемка цифровой видеокамерой визуализационной картины течения всего цикла работы ПСУЗВ (п. 6 – п. 8).

6. Дистанционно открывался отсечной клапан 9, нагружался редуктор 12 и его газ рабочим давлением подавался через трубопровод 4 на вход в модель 1 (см. рис. 6).

7. Значение входного давления регистрировалось на 10 и 11.

8. Разгружался редуктор 12.

9. Дистанционно закрывался отсечной клапан 8 (см. рис. 6).

10. Выключалась видеокамера.

11. Отключалось электропитание элементов автоматики и регулирования.

12. Отключалось электропитание теневого прибора.

13. Закрывался вентиль 9 (см. рис. 6).

14. Производился сброс давления из систем стенда.

Сведения о проведенных испытаниях были получены в цифровом формате в виде видеofilмов (табл. 3).

Результаты испытаний анализировались при просмотре в реальном времени (в звуковом сопровождении) фильмов с помощью программы Windows Movie Maker.

Программа позволяла выделять необходимые фрагменты фильма, неоднократно их просматривать, выделять нужные кадры и т. д.

С помощью просмотров зафиксирован пульсирующий характер течения при исследуемых режимах, последовательность возникновения и эволюции газодинамических возмущений в канале ПСУЗВ, особенности течений и т. д.

Таблица 3

Результаты испытаний

Давление газа p_0 в ресивере модели максимальное, МПа	Индекс фильма	Размер фильма на магнитном диске, МБ	Длительность фильма, с	Количество кадров фильма	Температура торможения продувочного газа T_0 , К	Размер установки ножа теневого прибора, мм	Примечание (регистрация теневой картины)
0,08	M2U0 0886	26,5	43	1075	283	0,05	+
0,08	M2U0 0887	22,3	36	900	280	0,05	-
0,16	M2U0 0888	23,9	39	975	285	0,05	+
0,3	M2U0 0889	29,8	48	1200	290	0,05	+
0,5	M2U0 0890	21,8	35	840	290	0,05	+
0,5	M2U0 0891	42,2	68	1700	285	0,05	+
0,5	M2U0 0892	19,7	32	800	290	0,01	+

Отдельные кадры, соответствующие характерным газодинамическим возмущениям были выделены и исследованы.

На фотографии (рис. 11) показана визуализационная картина течения в модели ПСУЗВ, зафиксированная при максимальном давлении испытаний (фильм M2U00892).

Обозначения на рисунке: а – визуализационная картина в модели ПСУЗВ при $p_0=0,5$ МПа; $M=2$; б – схема течения при тех же режимах.

Остальные характерные кадры развития течения представлены на том же рисунке в меньшем масштабе. По ним, наблюдая динамику течения на видеосъемке и фотографиях, можно сделать некоторые выводы об изменении структуры течения в зависимости от давления в тракте модели.

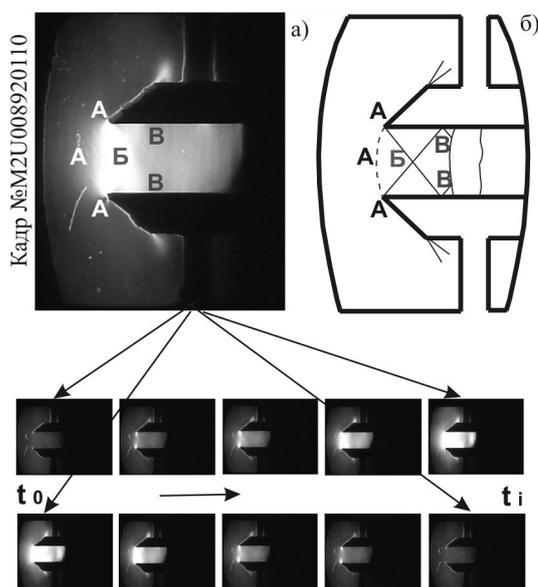


Рис. 11. Особенности визуализационной картины течения в модели ПСУЗВ

При сверхзвуковых режимах течение в первой камере ПСУЗВ подобно течению в сверхзвуковом диффузоре с внутренним сжатием [21].

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 возвращаются 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 которой поток становится дозвуковым.

Следует также учитывать нарастание пограничного слоя по длине проточной части, эффективно «сужающего» канал.

Дальнейшее течение в сужающем 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 повышении давления на входе в канал ПСУЗВ [21], возможно частичное изэнтропическое торможение.

Анализируя видеоматериал, можно сделать вывод, что при течения в плоской модели ПСУЗВ присутствует пульсирующая составляющая с определенной частотой колебаний.

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 [21, 22].

При анализе визуализационных картин 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» авторами 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.

Заключение

Показана работоспособность установки, прошедшей тестовые испытания и повышенные нагрузки, ее эксплуатационная технологичность. Произведена скоростная съемка возмущений, вносимых в газовый поток отдельными элементами модели ПСУЗВ.

Обнаружены динамические особенности течения газа в канале ПСУЗВ.

Получены визуализационные картины возмущений, вносимых в газовый поток отдельными элементами модели.

Установлены особенности течения газа в канале ПСУЗВ. Показан пульсирующий характер течения. Сделан вывод о необходимости проведения исследований с использованием разрывных диафрагм.

Результаты настоящих исследований предполагается использовать при проектировании и изготовлении шумоглушащих устройств с внутренним расширением в машиностроении, энергетической, оборонной промышленности и др.

Литература

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: 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 / Н.А. Коновалов, А.И. Астапов, О.В. Пилипенко, Г.А. Поляков, А.Д. Скорик, С.В. Тынына, А.Д. Чаплиц // Техническая механика. – Днепропетровск: ИТМ. – 2007. – №2. – С. 137-146.
3. Исследование динамики течения газа в приборе снижения звука выстрела стрелкового оружия методом визуализации / Н.А. Коновалов, О.В. Пилипенко, Г.А. Поляков, А.Д. Скорик, Г.А. Стрельников, А.Д. Чаплиц, А.И. Астапов // Техническая механика. – Днепропетровск: ИТМ. – 2009. – №1. – С. 88-95.
4. Зельдович Я.Б. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений / Я.Б. Зельдович, Ю.П. Райзер. – М.: Наука, 1966. – 320 с.
5. Комиссарук В.А. Применение дифракционного интерферометра в баллистическом эксперименте / В.А. Комиссарук, В.П. Мартынов, Н.П. Менде // ПТЭ. – 1979. – №1. – С. 207-210.
6. Менде Н.П. Наблюдение околосдульных процессов / Н.П. Менде // Физико-газодинамические баллистические исследования. – Л.: Наука, 1980. – С. 225-231.
7. 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.
8. 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.
9. Beric W. Visualization of complex shock wave phenomena / W. Beric // 12th international symposium of flow visualization. – German Aerospace Center (DLR), Gottingen, Germany, 10-14 September 2006. – 10 p.
10. Современная техника аэродинамических исследований при гиперзвуковых скоростях: пер. с англ. / Под ред. А.М. Крилла. – М.: Наука, 1965. – 240 с.
11. Исследование гиперзвуковых течений: пер. с англ. / Под ред. Ф.Р. Риддела. – М.: Наука, 1965. – 340 с.
12. Альбом течений жидкости и газа: пер. с англ. / Сост. М. Ван-Дайк. – М.: Мир, 1986. – 184 с.
13. Пат. на полезную модель 28410 Украина, МПК⁷ F41A 21/30. Устройство снижения уровня звука выстрела стрелкового оружия / Коновалов Н.А., Астапов А.И., Скорик А.Д., Пилипенко О.В., Поляков Г.А., Чаплиц А.Д.; Заявитель и патентообладатель Институт технической механики НАН Украины и НКА Украины, г. Днепропетровск. – №200708125; заявл. 17.07.07; опубл. 04.03.08, Бюл. № 7. – 5 с: ил.
14. Чаплиц А.Д. Визуализация газовых потоков во внутренних каналах / А. Д. Чаплиц, А.И. Астапов. – Днепропетровск: НАН Украины и НКА Украины, Институт технической механики, 2007. – 209 с.
15. 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.
16. Исаков Ю.И. Распространение ударных волн в трубопроводе с быстродействующим клапаном / Ю.И. Исаков, Р.Л. Петров // Труды ЛПИ. – 1970. – №113. – С. 126-129.
17. Скотников М.М. Теневые количественные методы в газовой динамике / М.М. Скотников. – М.: Наука, 1976. – 160 с.
18. Васильев Л. А. Теневые методы / Л.А. Васильев. – М.: Наука, 1968. – 400 с.
19. А.с. 1821665 СССР, МКИ G 01 M 9/06. Устройство для аэродинамических исследований / А.Д. Чаплиц (СССР). – №4862942/23; Заявл. 17.08.93; опубл. 30.10.94, Бюл. №22. – 3 с.: ил.
20. Стрельников Г.А. Регулируемые сверхзвуковые сопла малой длины / Г.А. Стрельников. – Днепропетровск: Изд-во ДГУ, 1993. – 192 с.
21. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика / Г.Н. Абрамович. – М.: Наука, 1969. – 824 с.
22. Боровой В.Я. Течение газа и теплообмен в зонах взаимодействия ударных волн с пограничным слоем / В.Я. Боровой. – М.: Машиностроение, 1983. – 144 с.

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Энергетика» А.И. Сичевой, Днепропетровский национальный университет, Днепропетровск.

**РОЗРОБКА ЗАСОБІВ І МЕТОДІВ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ ПРОТІКАННЯ ГАЗУ
У ПРИЛАДАХ ЗНИЖЕННЯ ЗВУКУ ПОСТРІЛУ СТРЕЛЬЦЬКОЇ ЗБРОЇ**

*М.А. Коновалов, О.В. Пилипенко, Г.О. Стрельников, Г.А. Поляков,
О.Д. Скорик, О.Д. Чаплиць, А.І. Астапов*

Створена установка і запропонована методика експериментального дослідження протікання газу в приладах зниження рівня звуку пострілу стрілецької зброї (ПЗРЗП). Роботоздатність установки підтверджена тестовими підвищеними навантаженнями, обґрунтована її експлуатаційна технологічність. Відеозйомка збурень в каналі плоскої моделі ПЗРЗП зафіксувала особливості течії, зокрема, її пульсуючий характер. Результати виконаних досліджень можна використовувати при проектуванні і відпрацюванні шумозаглушуючих пристроїв з внутрішнім розширенням газу в машинобудуванні, енергетичній, оборонній промисловості і ін.

Ключові слова: прилад зниження рівня звуку пострілу, аеродинамічний експеримент, ударна хвиля, візуалізація, надзвукова течія, тіньова установка, відеозйомка.

**DEVELOPMENT OF MEANS AND METHODS FOR GAS FLOW VISUALIZATION
IN DEVICES OF FIRE-ARM FIRING SOUND REDUCTION**

*N.A. Konovalov, O.V. Plipenko, G.A. Strelnikov, G.A. Polyakov,
A.D. Skorik, A.D. Chaplits, A.I. Astapov*

A unit is created and an experimental research approach of gas flow in devices of fire-arm firing sound reduction (DFSR) is offered. The unit efficiency is confirmed by test increased loadings, its operational manufacturability is proved. The image acquisition of disturbances in a DFSR two-dimensional model channel fixed flow features, in particular, its pulsatory character. The research results can be used at design and elaboration of sound-suppressing devices with internal gas expansion in mechanical engineering, power and defense industry etc.

Key words: device of firing sound reduction, aerodynamic experiment, blast wave, visualization, supersonic flow, shadow unit, image acquisition.

Коновалов Николай Анатольевич – канд техн. наук, ведущий научный сотрудник Института технической механики НАН Украины и НКА Украины, Днепропетровск, Украина, e-mail: imkask@email.dp.ua.

Пилипенко Олег Викторович – д-р техн. наук, чл.-корр. НАН Украины, директор Института технической механики НАН Украины и НКА Украины, Днепропетровск, Украина.

Стрельников Геннадий Афанасьевич – д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник Института технической механики НАН Украины и НКА Украины, Днепропетровск, Украина.

Поляков Геннадий Анатольевич – заместитель Генерального конструктора ГП «КБ Южное», аспирант Института технической механики НАН Украины и НКА Украины, Днепропетровск, Украина.

Скорик Александр Дмитриевич – научный сотрудник Института технической механики НАН Украины и НКА Украины, Днепропетровск, Украина.

Чаплиц Александр Донатович – канд техн. наук, научный сотрудник Института технической механики НАН Украины и НКА Украины, Днепропетровск, Украина, e-mail: a-chaplits@mail.ru.

Астапов Анатолий Иванович – научный сотрудник Института технической механики НАН Украины и НКА Украины, Днепропетровск, Украина.