

УДАРНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПРИБОРАХ СНИЖЕНИЯ УРОВНЯ ЗВУКА ВЫСТРЕЛА

Представлены результаты работ по совершенствованию установки Института технической механики НАН Украины и НКА Украины для исследования нестационарных процессов течения газа в полостях приборов снижения уровня звука выстрела (ПСУЗВ) и определения их эффективности. Рассматриваются конструктивные доработки установки, методика проведения эксперимента и результаты испытаний моделей ПСУЗВ ПБС-ИТМ-5.

Представлені результати робіт по вдосконаленню установки Інституту технічної механіки НАН України і НКА України для дослідження нестационарних процесів течії газу в порожнинах приладів зниження рівня звуку пострілу (ПСУЗВ) і визначення їх ефективності. Розглядаються конструктивні доработки установки, методика проведення експерименту і результати випробувань моделей ПСУЗВ ПБС-ИТМ-5.

The results of research on improving the installation of the Institute of Technical Mechanics, NASU&NSAU for studying the nonstationary processes of the gas flow in cavities of sound suppressors (PSUZV) and determining their effectiveness are presented. The design modifications in the installation, the experiment technique and the test results of PSUZV PBS-ITM-5 models are examined.

В последнее время уделяется внимание исследованию процессов в полостях приборов снижения уровня звука выстрела (ПСУЗВ) оружия [1 – 9]. Несмотря на многообразие конструктивных схем ПСУЗВ, аэродинамика потоков в их расширительных камерах и полостях подобна и может изучаться на моделях в условиях нестационарных неизоэнтропических процессов.

Процессы в струе газов, истекающих из ствола оружия, изучены достаточно подробно [1 – 7, 10 – 12]. Течение газа во внутренних полостях ПСУЗВ практически не изучено. В то же время характер потока газа во внутренних полостях существенно сложнее свободного потока после выхода его из ствола оружия. Сложные и трудоемкие численные исследования процессов в расширительных камерах ПСУЗВ [1, 7 – 8] привели к необходимости экспериментального подтверждения полученных в расчетах газодинамических характеристик газового потока.

В Институте технической механики НАН Украины и НКА Украины (ИТМ НАНУ и НКАУ) создана экспериментальная установка для изучения процессов в расширительных камерах и определения эффективности снижения уровня звука выстрела ПСУЗВ различных конструкций [2 – 6]. Продувки на «холодном воздухе» плоской модели ПСУЗВ ПБС-ИТМ-5 с визуализацией течения в первых двух расширительных камерах показали необходимость проведения дальнейших работ по совершенствованию экспериментальной установки.

Особый интерес представляет взаимодействие скачков уплотнения с резонирующими поверхностями в шумоглушащих устройствах, поскольку при сверхзвуковых скоростях акустические возмущения могут взаимно усиливаться в результате резонанса, имеющего место на фронте ударной волны, а сила звука за ней может значительно превышать шум, издаваемый источником в невозмущенном потоке. В результате резонансного наложения акустических волн за фронтом ударной волны за короткое время воспроизводится весь суммарный шум, изданный источником за конечный промежуток времени [13 – 14].

© Н.А. Коновалов, О.В. Пилипенко, А.Д. Скорик, Г.А. Стрельников, А.Д. Чаплиц, Д.В. Семенчук, А.И. Астапов, 2010

Техн. механика. – 2010. – № 3.

паратурой. Обоснование методики использования ударной установки для исследования моделей ПСУЗВ и выбор ее компоновки описаны в работе [4]. При обосновании учитывалось, что в лабораторных условиях ценными являются такие качества ударной трубы, как малое потребление энергии, простота эксплуатации, невысокая стоимость, и др. Быстротечность газодинамических процессов в установке, затрудняющая наблюдение процессов и выполнение измерений, приводит к необходимости применения бесконтактных средств измерения – оптических приборов (теневых, интерференционных), малоинерционных датчиков и использования радиотехнических средств регистрации и обработки экспериментальных данных [12, 15 – 18].

Как указано в работах [19 – 22], гидродинамические нестационарные отрывные процессы – чрезвычайно сложны. Их исследование требует одновременного учета многих факторов. Именно поэтому актуальными являются исследования модельных течений, в которых влияние одного или нескольких параметров отделено от влияния остальных. Изучение таких течений на основе экспериментальных (в том числе визуализационных) методов позволяет выделить характерные стороны явления выстрела и способствовать пониманию закономерностей реальных многопараметрических процессов.

Начиная с 50-х годов XX века до настоящего времени с помощью ударных установок исследовались, в основном, проблемы внешнего обтекания и баллистики [15 – 19]. Примеры их использования при исследовании внутреннего течения в шумоглушащих устройствах (в частности в ПСУЗВ) авторам неизвестны.

Ударная установка для исследования течения в ПСУЗВ имеет ряд особенностей. Это гораздо меньшее «рабочее сечение», обусловленное калибром оружия, специфические условия подстыковки к моделям, условия наблюдения за процессом и др. [4].

Одновременно с созданием стендового оборудования авторами совершенствовалась техника эксперимента применительно к воздействию ударной волны на элементы конструкций внутренних каналов, в частности на элементы каналов ПСУЗВ. Были созданы плоские и осесимметричные прозрачные модели ПСУЗВ [3 – 8], использование которых совместно с ударными установками, позволяет получать дополнительные достоверные данные об особенностях импульсных внутренних течений.

Быстрое развитие средств программного обеспечения (автоматический анализ движения в 2D, 3D и 6D координатных системах; табличное представление результата; построение графиков скорости, ускорения, перемещения; управление камерами разных производителей) и скоростной видеосъемки делает возможным наблюдение процесса взаимодействия ударной волны с моделью, дополняемое измерением газодинамических параметров при фиксировании скорости ударной волны [23 – 31]. Дешифрирование теневых картин и результатов измерений может дать распределение плотности на поверхности тела. Определяя 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 позволяет прогнозировать и снижать пиковые шумовые излучения.

При подготовке ударной установки в испытаниях особое внимание уделялось диапазону регулирования давления создаваемого импульса и надеж-

ности результатов при физическом моделировании процессов течения в ПСУЗВ.

Метод создания импульса в ударной трубе с использованием разрывной диафрагмы выбран на основании патентного и информационного поиска как альтернатива более сложным и дорогостоящим способам: электрическим, детонационным и др. [15 – 18, 32].

Еще одной причиной применения ударных установок при исследовании и проектировании ПСУЗВ [33] явилась возможность их использования при оценке эффективности приборов на стадии проектирования и разработки без применения огнестрельного оружия и боеприпасов. В ИТМ НАНУ и НККАУ предложено [34 – 35] использовать установки для моделирования условий выстрела, применяя их в качестве генераторов звуковых импульсов и источников высокого давления в каналах ПСУЗВ. Известные способы оценки эффективности ПСУЗВ или недостаточно точны [36], или предполагают использование сложного и дорогостоящего оборудования, включающего, прежде всего, оружие и боеприпасы, а также обязательные условия их использования (тиры, полигоны, обученный и аттестованный персонал и др.), что приводит к существенному повышению сложности организации и стоимости испытаний [37].

Наиболее приемлемым является способ, описанный в «Методике проведения исследований эффективности снижения звука выстрела экспериментальных образцов приборов ПСУЗВ в стрелковом автоматическом оружии» [1]. В этом способе эффективность прибора снижения уровня звука выстрела оценивается с помощью натурального использования стрелкового оружия и боеприпасов.

Результаты, приведенные в настоящей работе, являются развитием исследований, выполненных в ИТМ НАНУ и НККАУ с применением усовершенствованной и доработанной ударной экспериментальной установки и модели ПСУЗВ [4]. Установка обеспечивает инициирование ударных волн в каналах ПСУЗВ при возможности проведения сравнительных экспериментов по оценке его эффективности.

При подготовке экспериментов особое внимание уделялось разработке и применению методов экспериментальных исследований внутренних течений, с учетом особенностей распространения ударных волн во внутренних каналах при различных режимных параметрах газовых потоков [38 – 41].

Система подачи воздуха высокого давления и измерений установки описана в [2 – 6]. При проведении экспериментов использовался «холодный» очищенный и осушенный воздух высокого давления с точкой росы, не превышающей $T_r = -55^\circ\text{C}$.

Схема доработанной ударной установки и ее фотография показана на рис. 1. На рисунке обозначены: 1 – модель ПСУЗВ; 2 – узел стыковки; 3 – подводящий патрубок; 4 – разрывная диафрагма и узел ее крепления; 5 – подводящий трубопровод; 6 – баллоны высокого давления; 7 – быстродействующий отсечной клапан; 8 – редуктор давления; 9 – запорный вентиль; 10 – микрофоны; 11 – теневой прибор Теплера; 12 – манометры; 13 – датчики давления.

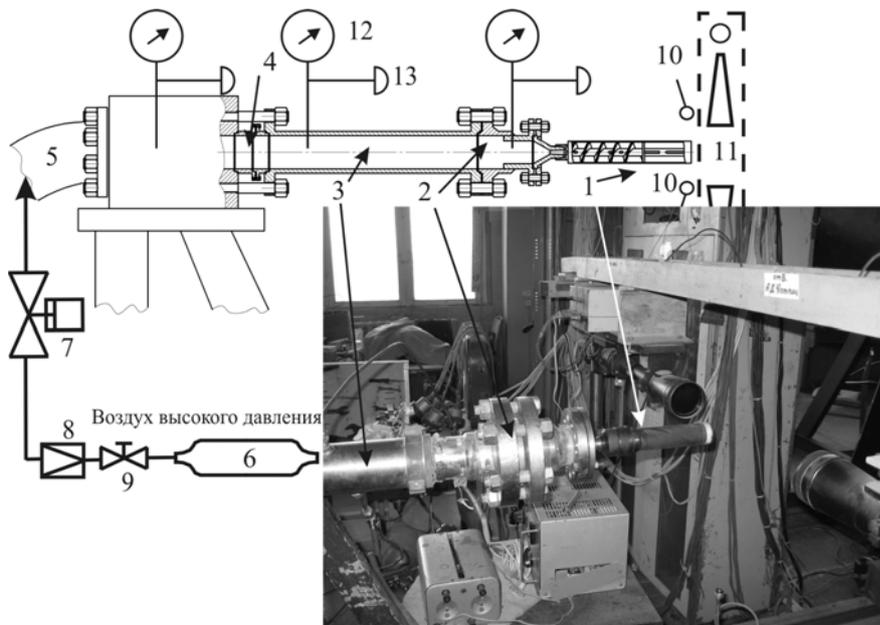


Рис. 1

Отличием от установки, описанной в работе [4], являются: новая конструкция разрывных диафрагм 4; систем записи звука 10, визуализации 11, видеорегистрации, регулирования и раздачи воздуха высокого давления (6 – 9). При этом были спроектированы и изготовлены мембранный разрушаемый узел и базовые детали стыковки и крепления экспериментальных моделей.

Течение газа исследовалось на моделях многокамерного глушителя расширительного типа (ПБС-ИТМ-5), одна из которых описана в работе [1], другая – показана на рис. 2. Обозначения на рисунке: (а) – модель в сборе, (б) – в разобранном состоянии, 1 – расщекатель, 2 – прозрачный корпус из оргстекла, 3, 4 – фланцы, 5 – муфта, 6 – вкладыш.

После изготовления ударная установка была собрана согласно конструкторской документации и опробована в сборе с ПСУЗВ ПБС ИТМ в тестовом режиме с целью оценки срабатывания функциональных узлов и их надежности.

На установке (рис. 1), подготовленной для проведения эксперимента, проведены продувки «холодным воздухом в ударном режиме» ПСУЗВ ПБС ИТМ и его моделей с целью определения характеристик шумоглушения и визуализации течений в элементах его внутренних каналов.

Воздух при рабочем давлении P подавался из баллонов высокого давления 6 в подводный трубопровод 5, снабженный манометром 12 с датчиками 13. Давление регулировалось редуктором 8, находящемся за вентилем 9. Параметры подачи контролировались с пульта управления по манометрам 10 и датчикам давления (см. рис. 1), установленным на магистрали за отсечным клапаном 7.

Установка работает следующим образом. Для исследования или оценки эффективности ПСУЗВ 1 на его вход 2 подаются импульсные порции воздуха. Для этого открывают вентиль 9 и клапан 7, редуктором давления 8 задают требуемое значение давления в трубопроводе-емкости 5. Далее с помощью редуктора 8, повышая давление в патрубке, добиваются импульсной подачи

давления [4]. Это происходит вследствие разрушения диафрагмы 4, когда напряжения в ее материале превысят предел его прочности.

При наличии соответствующего перепада давления на диафрагме 4, после ее разрушения поток газа будет распространяться по патрубку 3 на вход в ПСУЗВ, процессы в котором будут служить источниками звука, регистрируемыми микрофонами 10. Визуализация течения на выходе обеспечивается прибором 11.

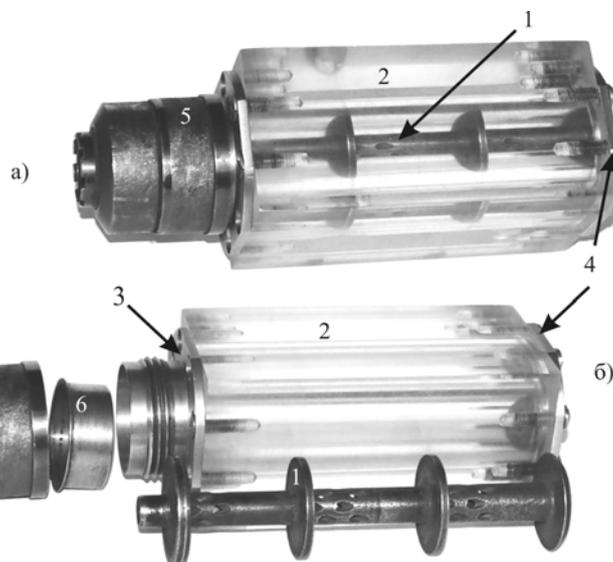


Рис. 2

Методика определения параметров газа в полости ПСУЗВ и визуализации картины течения включала:

- Монтаж и наладку газодинамического стенда.
- Монтаж и наладку элементов автоматики и регулирования.
- Наладку и юстировку регистрирующей аппаратуры (манометров, видеокамеры со звукозаписывающей аппаратурой, систем визуализации и др.).
- Определение рабочих режимов испытания диапазона модели (выбор диафрагмы, настройка редуктора, выбор датчиков и др.).
- Визуализацию картины течения газа в модели.
- Регистрацию давлений по тракту.
- Измерение уровня звука в процессе испытаний.

– Расчетным и экспериментальным путем были определены материал и конструкция разрывных диафрагм для конкретных условий испытания. Типы используемых диафрагм и характер их разрушения показаны на рис. 3. В таблице 2 приведены результаты испытаний разрывных диафрагм.

Испытания моделей проводились в следующем порядке.

Продувочный газ под рабочим давлением подавался из баллонов высокого давления 6 через вентиль 9 на вход в редуктор 8.

Значение входного давления регистрировалось манометрами и датчиками давления.

Дистанционно включалась видеокамера теневого прибора 11.

Повышалось давление в патрубке 5 до срабатывания диафрагмы 4.

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

Регистрировалась визуализационная картина течения.

Регистрировался уровень звука.

Отключалась подача продувочного газа редуктором 8 (см. рис. 1).

Отключалось электропитание элементов автоматики и регулирования.

Отключалось электропитание теневого прибора.

Выключалась видеокамера.

Закрывался вентиль 9.

По сравнению с экспериментами [2 – 6] визуализация проводилась на поверхности рассекателя (рис. 2) и наружного цилиндрического корпуса ПСУЗВ ПБС-ИТМ-5. Методика проведения таких экспериментов описана в [42].

Результаты испытаний разрывных диафрагм (рис. 2)

Таблица 1

Номер по порядку	δ , мм	Давление разрыва диафрагмы Р, (МПа)	Материал	Позиция на рис. 2
1	0,1	1,1 – 1,5	20Х13	4
2	0,2	1,9 – 2,2	Жесть	–
3	0,2	1,9 – 2,2	ГОСТ 13345-85 Жесть гофрированная	5
4	0,3	3,0 – 3,5	ГОСТ 13345-85 12Х18Н10Т	–
5	2,0	0,9 – 1,0	ПХВ	3
6	2,0	0,5 – 0,6	Паронит	2
7	0,4	0,2 – 0,5	Картон	–
8	0,8 – 1,6 (размер для канавок)	3,0 – 15	Д 16	1

Для получения визуализационной картины перед испытанием в подводящем патрубке (рис. 1) размещался мелкодисперсный порошок красителя, а внутренняя поверхность модели глушителя покрывалась тонким слоем масла минерального (ГОСТ 20799-88). Концентрация и свойства красителя были примерно те же, что и у продуктов сгорания заряда выстрела.

Геометрическое подобие потоков достигалось изготовлением моделей ПСУЗВ в масштабе 1:1 [1, 43 – 46].

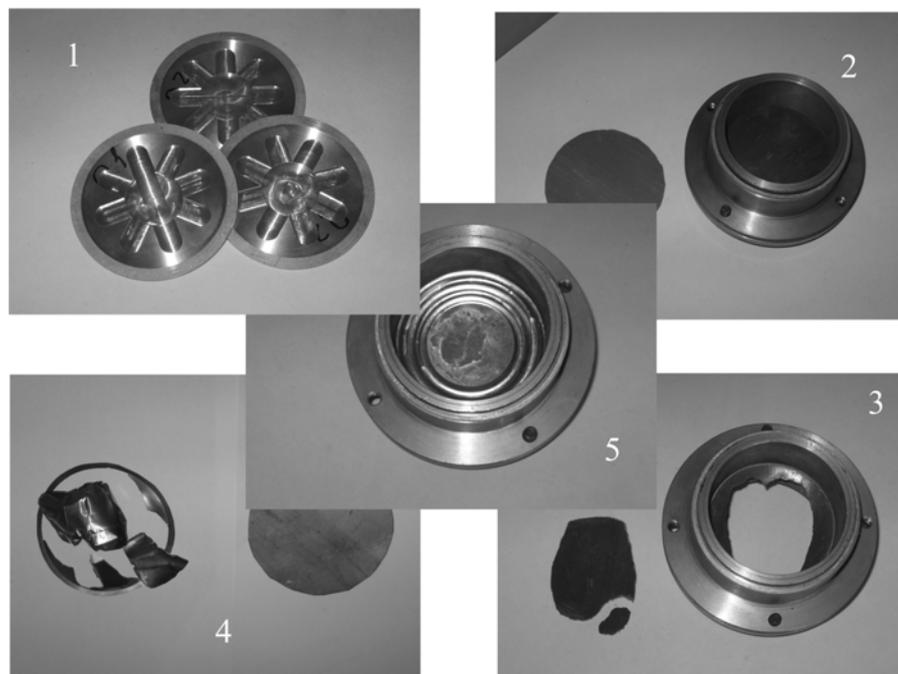


Рис. 3

В таблице 2 приведены результаты испытаний моделей на ударной установке.

Сравнение результатов визуализационных испытаний на модели и на натурном ПСУЗВ представлены на рис. 4: а) – визуализационная картина, полученная на стенде (рис. 1) (давление разрыва диафрагмы $p = 1,1$ МПа); б) – визуализационная картина, полученная при использовании боеприпасов и стрелкового оружия в условиях стрельбы на полигоне.

Исследование и сопоставление картин обтекания, полученных на экспериментальной базе ИТМ (рис. 3а) и в натуральных условиях (рис. 3б), показало наличие в них сходство формы и соизмеримых геометрических соотношений (например, отношения длины к ширине, площади и др.). Это наглядно видно при сравнении выделенных элементов визуализационных картин: 1 и 1-1; 2 и 2-2 (рис. 3). Указанные свойства картин обтекания могут служить доказательством корректности постановки экспериментов на ударной установке ИТМ с использованием моделей ПСУЗВ [42 – 46].

На фотографии (см. рис. 5) показана визуализационная картина течения на внутренней поверхности модели ПСУЗВ, зафиксированная на ударной установке ИТМ при давлении разрыва диафрагмы $p = 1,1$ МПа. Обозначения на рисунке: 1 – корпус ПСУЗВ; 2 – визуализационная картина.

Визуализационная картина свидетельствует о сложном взаимодействии потока с внутренней поверхностью корпуса.

Результаты измерений

Таблица 2

Но- мер испы- тания	Ин- декс видео- мате- риала	Длитель- ность съемки, с	Давление газа p_0 в момент разрыва диафрагмы, МПа	Вид диафрагмы (пункт табл. 1.3)	Наличие ПСУЗВ ПБС ИТМ	Температура торможения продувочного газа T °К	Примечание (регистрация процесса)
1	-	-	0,2	7	-	285	-
2	-	-	2,2	2	-	283	-
3	-	-	3,2	4	-	285	-
4	MVI 2080	35	0,7	5	-	283	Видеосъемка
5	MVI 2081	31	1,5	1	-	280	Видеосъемка
6	-	-	0,4	6	-	285	-
7	MVI 2083	16	1,2	1	+	285	Видеосъемка
8	MVI 2084	24	1,1	1	+	290	Видеосъемка, визуализация
9	-	-	2,2	3	-	290	-
6	-	-	2,6	2	-	285	-
7	-	-	2,8	2	-	290	-

С помощью ударной установки была проведена оценка эффективности глушителя ПБС ИТМ на стадии проектирования и разработки без применения огнестрельного оружия и боеприпасов. Генератором звукового импульса являлся доработанный ударный стенд (рис. 1), подробно описанный в работе [4].

Доработка состояла в том, что трубопровод (внутренний диаметр 50 мм) высокого давления 5 (рис. 1) служил вспомогательной «буферной» емкостью для накопления газа, для разрыва диафрагмы и имитации выстрела. На магистрали, соединяющей его с баллонами высокого давления, была установлена запорно-регулирующая арматура 7 – 9 (рис. 1).

Установка позволила создавать импульсные порции воздуха, по энергетическим и звуковым характеристикам имитирующие выстрел, и проводить испытания без применения дорогостоящих оружия, оружейных зарядов и сгораемых порохов. При реализации способа появляется возможность (с целью определения экстремальных значений эффективности) производить исследования при условиях, граничных с рабочими режимами. Кроме того, при продувках ПСУЗВ на чистом и осушенном воздухе исключается влияние на измерения и визуализацию течения включений иной фазы, состав которой может отличаться для отдельных испытаний (при использовании боевых зарядов). Именно указанная последовательность и расположение конструктивных элементов позволяют достичь требуемого качества и универсальности испытаний ПСУЗВ. Порция газа может задаваться как по величине давления, так и по продолжительности импульса.

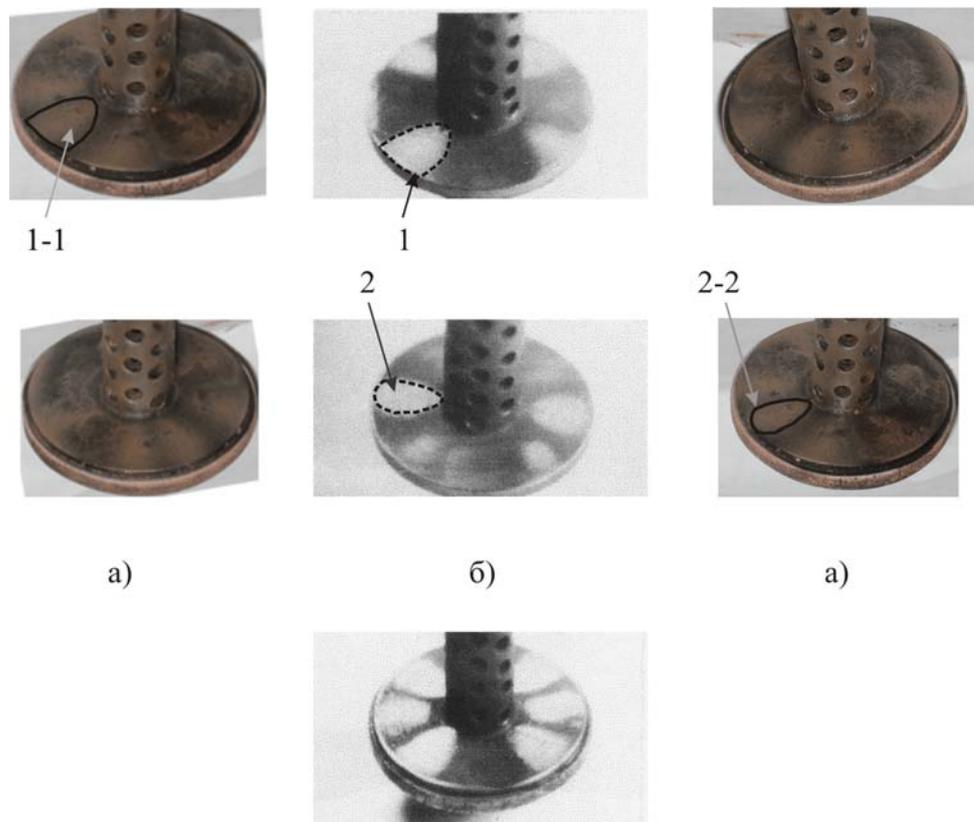


Рис. 4

При использовании в качестве продувочного газа воздуха (или иного, например инертного газа) возможно с максимальной эффективностью и минимальными затратами оценить эффективность прибора снижения уровня звука выстрела. При этом обеспечивается возможность задавать шумовые импульсы требуемой интенсивности, что обеспечивает получение достоверных экспериментальных режимов.

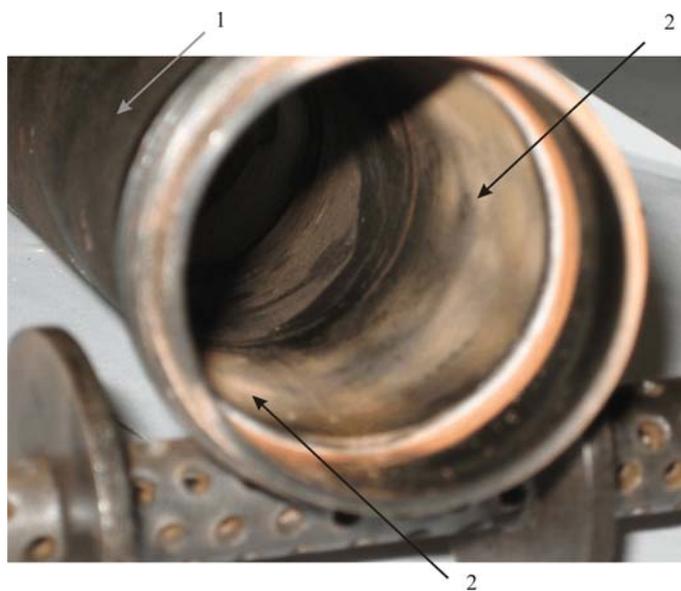


Рис. 5

На фотографии (рис. 6) показана граница струи за срезом ПСУЗВ при имитации выстрела, зафиксированная на ударной установке ИТМ при давлении разрыва диафрагмы $p = 1,1$ МПа.

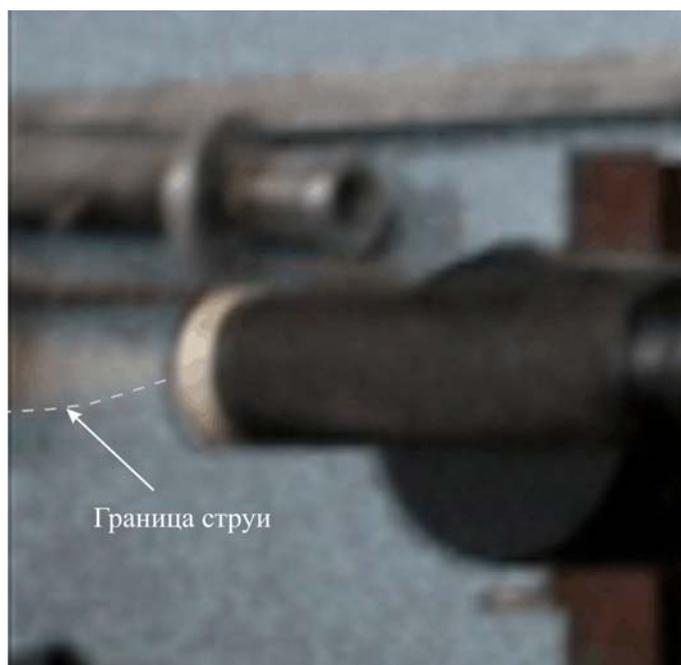


Рис. 6

Видимость струи обеспечена введением в поток 0,2 г сурика свинцового. Форма зафиксированной на фотографии струи может быть использована при сравнении результатов испытаний различных конструкций ПСУЗВ.

Конструкция узла крепления диафрагмы позволяет максимально упростить реализацию описанного способа и сделать его более универсальным. Используя разрывные диафрагмы разной толщины и из различного материала, можно обеспечить требуемые изменения условия проведения испытаний.

Стенд позволял создавать импульсы звукового сигнала путем подачи на вход модели ПСУЗВ импульсных порций воздуха в режиме сверхзвукового течения, последовательно монотонно изменяя значения давления в порции, и для каждой порции позволял регистрировать параметры, характеризующие эффективность прибора.

Эффективность снижения уровня звука прибора в натуральных условиях предложено определять по формуле

$$\Delta L_{\text{ПСУЗВ}} = k \Delta L_{\text{им}} \text{ дБ},$$

где $\Delta L_{\text{ПСУЗВ}}$ – эффективность прибора снижения уровня звука; $\Delta L_{\text{им}}$ – эффективность прибора снижения уровня звука при испытаниях на воздухе; $k = L_{\text{ПСУЗВ нат}} / L_{\text{ПСУЗВ им}}$; $L_{\text{ПСУЗВ нат}}$ – уровень звука выстрела, измеренный в натуральных условиях; $L_{\text{ПСУЗВ им}}$ – уровень звука выстрела, измеренный при испытаниях на воздухе.

Результаты продувок стенда и моделей в «ударном режиме» в виде обработанных материалов цифровой видеосъемки процесса испытаний приведены

на рис. 6. При этом последовательно фиксировались: покадровое изображение процесса испытаний (в том числе давление перед диафрагмой на манометре, рис. 1); уровень звука и текущее время, привязанное к кадрам видеосъемки.

На звуковой дорожке при просмотре видеоматериала выделялись и сравнивались участки, соответствующие имитации звука выстрела. Технологические звуки образуются, в основном, от срабатывания запорно-регулирующей пневмоаппаратуры, перетекания воздуха высокого давления и др. Участок, соответствующий испытанию без глушителя, показан слева (рис. 7). Справа показана запись уровня звука испытания с ПСУЗВ.

Из сравнения рабочих участков звуковой дорожки (рис. 7) видно, что абсолютный уровень звука имитации выстрела при наличии на стенде глушителя ПСУЗВ значительно снижается.

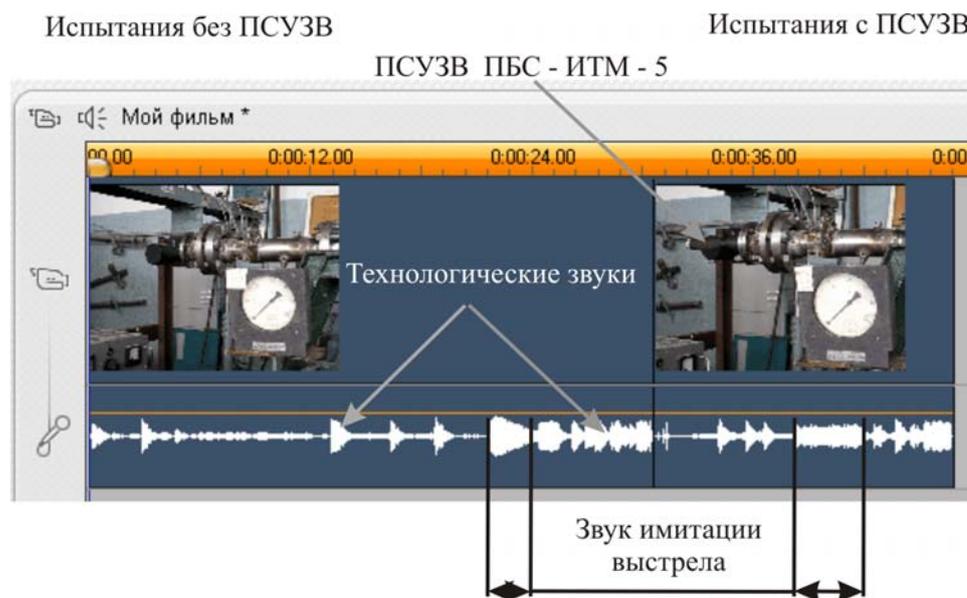


Рис. 7

На доработанной ударной газодинамической установке проведены исследования нестационарных течений в каналах ПСУЗВ, в частности визуализация картины обтекания рабочей поверхности расширительных камер при взаимодействии с импульсным газовым потоком, и оценка эффективности ПСУЗВ ПБС - ИТМ без использования оружия и боеприпасов.

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., Кваца Ю. А., Коваленко В. И. – Днепропетровск : Институт технической механики НАН Украины и НКА Украины, 2008. – 303 с.
2. Коновалов Н. А. Исследование течения в плоской модели глушителя звука выстрела стрелкового оружия с применением методов визуализации / Коновалов Н. А., Астапов А. И., Пилипенко О. В., Поляков Г. А., Скорик А. Д., Тынына С. В., Чаплиц А. Д. // Техническая механика. – 2007. – №2. – С. 137 – 146.
3. Коновалов Н. А. Исследование течения газа в приборе снижения звука выстрела стрелкового оружия методом визуализации / Коновалов Н. А., Пилипенко О. В., Поляков Г. А., Скорик А. Д., Стрельников Г. А., Чаплиц А. Д., Астапов А. И. // Техническая механика. – 2009. – №1. – С. 71 – 79.
4. Коновалов Н. А. Разработка средств и методов визуализации течения газа в приборах снижения звука выстрела стрелкового оружия / Н. А. Коновалов, О. В. Пилипенко, Г. А. Стрельников, Г. А. Поляков, А. Д. Скорик, А. Д. Чаплиц, А. И. Астапов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. – №2/59. – С. 53 – 61.

5. Коновалов Н. А. Исследование течения газа в приборах 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 // Труды X Междунар. конф. «Оптические методы исследования потоков» (ОМИП 2009). – М. : Издательский дом МЭИ, 2009. – С. 474 – 477.
6. Коновалов Н. А. Установка для визуализации течения газа в приборах снижения звука выстрела стрелкового оружия / Н. А. Коновалов, О. В. Пилипенко, Г. А. Поляков, А. Д. Скорик, Г. А. Стрельников, А. Д. Чаплиц, А. И. Астапов // Труды X Междунар. конф. «Оптические методы исследования потоков» (ОМИП 2009). – М. : Издательский дом МЭИ, 2009. – С. 470 – 473.
7. Математические модели и методика расчета процесса наполнения 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.
8. Математическое моделирование газодинамических процессов 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 – 16.
9. Пат. Украины на изобретение № 89310, МПК(2010) F41A 21/30, F41A 17/00. Устройство снижения звука выстрела стрелкового оружия / Коновалов Н. А., Пилипенко О. В., Поляков Г. А., Скорик А. Д., Стрельников Г. А., Чаплиц А. Д., №200808435 ; заявл. 24.06.08 ; опубл. 11.01.10, Бюл. № 1, 2010.
10. Комиссарук В. А. Применение дифракционного интерферометра в баллистическом эксперименте / В. А. Комиссарук, В. П. Мартынов, Н. П. Менде // ПТЭ. – 1979. – №1. – С. 207 – 210.
11. Менде Н. П. Наблюдение околодульных процессов / Н. П. Менде // Физико-газодинамические баллистические исследования. – Л. : Наука. – 1980. – С. 225 – 231.
12. 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.
13. Скучик Е. В. Основы акустики: В 2 т. //Е. В. Скучик. – М. : Мир, 1976. – Т. 1 – 2.
14. Вахитов Ш.Я. Акустика / Ш. Я. Вахитов, Ю. А. Ковалгин, А. А. Фадеев // М. : Горячая Линия-Телеком, 2009. – 660 с.
15. Бошнятов Б. В. Импульсные трубы в аэродинамических исследованиях / Б. В. Бошнятов, А. С. Королев, И. Г. Друкер. – М. : Наука, 1978. – 247 с.
16. Современная техника аэродинамических исследований при гиперзвуковых скоростях : пер. англ. / под ред. А. М. Крилла. – М. : Наука, 1965. – 240 с.
17. Зельдович Я. Б. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений / Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер. – М. : Наука, 1966. – 320 с.
18. Исследование гиперзвуковых течений: пер. англ. / под ред. Ф. Р. Риддела. – М. : Наука, 1965. – 340 с.
19. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике / Л. И. Седов. – М. : Наука, 1978. – 428 с.
20. Лятхер В. М. Гидравлическое моделирование / В. М. Лятхер, А. М. Прудовский. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 392 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.
23. Еришов И. В. Цифровые методы цветной теневой визуализации газодинамических процессов / И. В. Еришов, В. Н. Отменников, А. П. Федотов // Космонавтика и ракетостроение. – 2009. – №3 (56). – С. 37 – 46.
24. Приходько А. А. Современное состояние математического моделирования в аэрогидродинамике и теплообмене / А. А. Приходько // Техническая механика. – 2009. – №1. – С. 29 – 43.
25. Шалаев В. И. Нестационарные трехмерные пограничные слои с малыми поперечными течениями / В. И. Шалаев // Модели и методы аэродинамики. Материалы Шестой и Седьмой Международных школ-семинаров. – М. : МЦНМО, 2007. – С. 108 – 109.
26. Морозов Г. В. Физическое моделирование газов, жидкостей и твердых тел методом частиц / Г. В. Морозов, Спижевой А. С., Сидоров С. В. // Университетский вестник. – Нижний Новгород : Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2008. – №2. – С. 43 – 48.
27. Смирнов В. И. Информационные пределы погрешности измерения параметров оптических полей / В. И. Смирнов // Труды X Междунар. конф. «Оптические методы исследования потоков» (ОМИП 2009). – М. : Издательский дом МЭИ, 2009. – С. 284 – 288.
28. Поройков А. Ю. Обработка картин теневого фонового метода on-line / А. Ю. Поройков // Труды X Междунар. конф. «Оптические методы исследования потоков» (ОМИП 2009). – М. : Издательский дом МЭИ, 2009. – С. 288 – 292.
29. Зубин М. А. О новых свойствах отрыва турбулентного пограничного слоя в сверхзвуковых конических течениях на подстилающих поверхностях с изломом / М. А. Зубин, Н. А. Астапенко, А. А. Чулков // Материалы XXXIV академических чтений по космонавтике «Королевские чтения». – М. : Научное издательство «Акт». – 2010. – С. 184 – 185.
30. Еришов И. В. Получение и обработка теневых изображений газодинамических процессов с помощью автоматизированных цифровых систем / И. В. Еришов, В. Е. Алехин, А. П. Овечкин, А. П. Федотов // Труды X Междунар. конф. «Оптические методы исследования потоков» (ОМИП 2009). – М. : Издательский дом МЭИ, 2009. – С. 202 – 205.
31. Галактионов А. Ю. Зависимость аэродинамических нагрузок на поворотное сопло ракеты-носителя от числа Рейнольдса / А. Ю. Галактионов, И. Н. Каракотин // Космонавтика и ракетостроение. – 2009. – №3. (56). – С. 30 – 36.
32. Великович А. Л. Физика ударных волн в газах и плазме / А. Л. Великович, М. А. Либерман. – М. :

Наука, 1987. – 298 с.

33. Заявка №200912204 на выдачу патента Украины на изобретение, МПК (2009) F41A 17/00. Установка для определения эффективности прибора снижения уровня звука выстрела стрелкового оружия / Коновалов Н. А., Пилипенко О. В., Скорик А. Д., Чаплиц А. Д., Астапов А. И. – Заявл. 27.11.2009.
34. Заявка №200912205 на выдачу патента Украины на изобретение, МПК (2009) F41A 17/00. Способ определения эффективности прибора снижения звука выстрела стрелкового оружия / Коновалов Н. А., Пилипенко О. В., Скорик А. Д., Чаплиц А. Д., Астапов А. И. – Заявл. 27.11.2009.
35. Пат. Украины на изобретение № 89310, МПК(2010) F41A 21/30, F41A 17/00. Устройство снижения звука выстрела стрелкового оружия / Коновалов Н. А., Пилипенко О. В., Поляков Г. А., Скорик А. Д., Стрельников Г. А., Чаплиц А. Д.; №200808435; заявл. 24.06.08; опубл. 11.01.10, Бюл. № 1, 2010.
36. Тест глушителя ПЗРЗП, [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.youtube.com>.
37. Стандарт Армии США MIL-STD-1474D («Предельно допустимые уровни шума для материально-технического обеспечения Армии»), Минобороны, Вашингтон, Округ Колумбия, 293001).
38. Чаплиц А. Д. Визуализация газовых потоков во внутренних каналах / А. Д. Чаплиц, А. И. Астапов. – Днепропетровск: Институт технической механики НАН Украины и НКА Украины, 2007. – 209 с.
39. Зубков А. И. Аэродинамические установки Института механики Московского университета / А. И. Зубков, А. Ф. Гаранин, В. Ф. Сафронов. – М.: Изд-во МГУ, 1985. – 44 с.
40. Сиявин А. А. Экспериментальное исследование дозвукового обтекания тандема пронцаемого и сплошного дисков / А. А. Сиявин // Вестник московского университета. – 2009. – №2. – С. 49 – 52.
41. Клинько К. А. Экспериментальные исследования аэродинамических характеристик при динамических выходах на сверхбольшие углы атаки / К. А. Клинько, А. Н. Храбров // Уч. зап. ЦАГИ. – 2004. – Т.35, №3-4. – С. 13 – 19.
42. Трифонов А. К. Исследование псевдоскачка в различных каналах / А. К. Трифонов, Н. В. Гурьева, В. П. Старухин // Модели и методы аэродинамики. Материалы Шестой и Седьмой Международных школ-семинаров. – М.: МЦНМО, 2007. – С. 216 – 217.
43. Фотохронографическая методика измерения скорости ударной волны в экспериментах по изучению уравнения состояния веществ на лазерной установке "Искра-5" / С. А. Бельков, А. Г. Кравченко, А. В. Кунин, Д. Н. Литвин, В. М. Муругов, А. В. Сенник // Приборы и техника эксперимента. – 2006. – №2. – С. 150 – 153.
44. Бойко В. М. Методы оптической диагностики в аэрофизическом эксперименте / В. М. Бойко, А. М. Оришч, А. А. Павлов, В. В. Пикалов. – Новосибирск: Ред. изд. центр НГУ, 2008 – 412 с.
45. Письменный Е. М. Теплообмен и аэродинамика пакетов поперечно – оребренных труб / Е. М. Письменный. – К.: Альтпрес, 2004. – 244 с.
46. Евтихеева О. А. Лазерная рефрактография / О. А. Евтихеева, И. Л. Расковская, Б. С. Ринкевичюс. – М.: Физматлит, 2008. – 176 с.

Институт технической механики
НАН Украины и НКА Украины,
Днепропетровск

Получено 22.03.10,
в окончательном варианте 22.03.10.