

**Одиннадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 27 – 30 июня 2011 г.**

УДК 533.6.07

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

*Институт технической механики, Днепропетровск, Украина
49600, ГСП, Днепропетровск -5, ул. Лешко-Попеля, 15, E-mail: itm@pvv.dp.ua*

**УДАРНАЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА И ЕЕ
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ТЕЧЕНИЯ ГАЗА В
ПРИБОРАХ СНИЖЕНИЯ УРОВНЯ ЗВУКА ВЫСТРЕЛА**

Представлены результаты работ по совершенствованию ударной установки для визуального исследования нестационарного течения газа в полости прибора снижения уровня звука выстрела (ПСУЗВ) и определения его эффективности. Рассматривается методика постановки и проведения эксперимента на плоской и осесимметричной модели. Показана работоспособность установки, выдержавшей тестовые повышенные нагрузки, ее эксплуатационная технологичность. Проведена верификация результатов, полученных на ударной установке, сравнением их с результатами, полученными при дефектации ПСУЗВ, испытанного на полигоне в стрелковом оружии.

**УДАРНАЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА, РАЗРЫВНАЯ ДИАФРАГМА,
ВНУТРЕННИЙ ГАЗОВЫЙ ПОТОК, ПРИБОР СНИЖЕНИЯ УРОВНЯ ЗВУКА ВЫСТРЕЛА**

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, внешней и внутренней баллистике и др., что в свою очередь приводит к обновлению и расширению знаний по данным дисциплинам [1 – 7]. Причина такого подхода к проблемам заключается в том, что многие практические процессы обтекания и с одной стороны труднодоступны для теоретического исследования, а с другой стороны требуют экспериментального подтверждения.

Картина течения газа, истекающего из ствола оружия, изучена достаточно подробно, например [8]. 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 привели к необходимости экспериментального подтверждения полученных в расчетах газодинамических характеристик газового потока.

В Институте технической механики НАН и НКА Украины разработаны методы и средства визуализации течения газа в ПСУЗВ [9 – 13], создана ударная установка для визуального исследования нестационарного течения газа в полости ПСУЗВ [14 – 16], проведены ее тестовые испытания [17].

При обосновании метода исследований учитывался характер течения пороховых газов в полости ПСУЗВ. Быстротечность газодинамических процессов в полости ПСУЗВ требуют применения бесконтактных средств измерения – оптических приборов (теневых, интерференционных), малоинерционных датчиков, радиотехнических средств регистрации и компьютерной обработки экспериментальных данных. С учетом этого и результатов тестовых испытаний были проведены дальнейшие работы по совершенствованию экспериментальной ударной установки.

Одновременно с созданием стендового оборудования авторами совершенствовалась техника эксперимента, были созданы плоские и осесимметричные прозрачные модели ПСУЗВ, проведены их тестовые испытания и верификация полученных результатов.

Эксперименты на прозрачных моделях по исследованию воздействия ударных волн (генерируемых ударными аэродинамическими установками) с шумоглушащими элементами ПСУЗВ в доступной литературе не описаны. В работах [9 – 11], проведенных в ИТМ НАНУ и НКАУ впервые показана возможность визуализировать и наблюдать течение в плоской модели канала оружейного глушителя прямым теневым методом (и методом Тейлера). В работах [11 – 12] приведены теневые фотографии процессов внутри глушителя на установившихся дозвуковых режимах.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

При подготовке экспериментов использовался опыт авторов по разработке и применению методов экспериментальных исследований внутренних течений, с учетом особенностей распространения ударных волн во внутренних каналах при различных режимных параметрах газовых потоков [14].

Схема подачи воздуха высокого давления и измерений установки приведена на рис. 1. При проведении экспериментов использовался «холодный» очищенный и осушенный воздух высокого давления с точкой росы, не превышающей $T_p = -55^\circ\text{C}$.

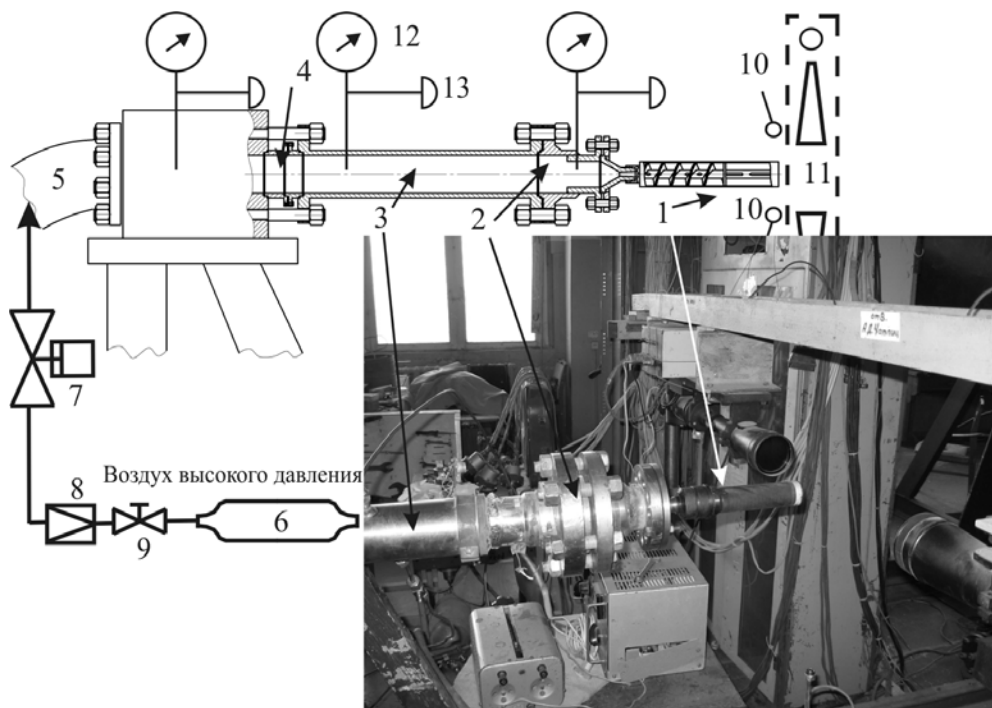


Рис. 1. Ударная установка: 1 – осесимметричная модель ПСУЗВ типа (ПБС-ИТМ-5); 2 – узел стыковки; 3 – подводящий патрубкок; 4 – разрывная диафрагма и узел ее крепления; 5 – подводящий трубопровод; 6 – баллоны высокого давления; 7 – быстродействующий отсечной клапан; 8 – редуктор давления; 9 – запорный вентиль; 10 – микрофоны; 11 – прибор Тейлера (рабочее поле – 70 мм); 12 – манометры; 13 – датчики давления

Течение газа исследовалось на осесимметричной (рис. 1) и плоской (рис. 2) моделях многокамерного глушителя расширительного типа (ПБС-ИТМ-5), описанных в работах [9, 11].

Установки для испытаний моделей были оснащены линзовым теневым прибором с рабочим полем диаметром – 70 мм (рис. 1) и теневым прибором ИАБ-451 (рис. 2) с рабочим полем – 230 мм.

На установках (рис. 1 – рис. 2) 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.

Геометрическое подобие потоков в осесимметричной ударной установке достигалось изготовлением модели в масштабе 1:1 к натурному ПСУЗВ.

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

Установка работает следующим образом. Для исследования или оценки эффективности ПСУЗВ 1 на его вход 2 подают импульсные порции воздуха.

Для этого открывают вентиль 9 и клапан 7, редуктором давления 8 задают требуемые значения давления в трубопроводе - емкости 5. Далее с помощью редуктора 8, повышая давление в патрубке, добиваются импульсной подачи давления. 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

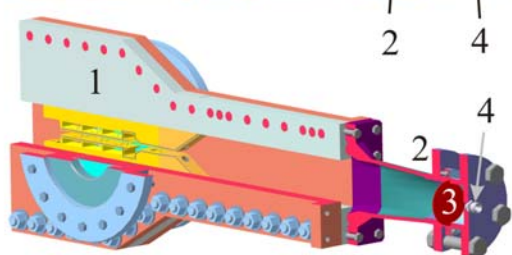
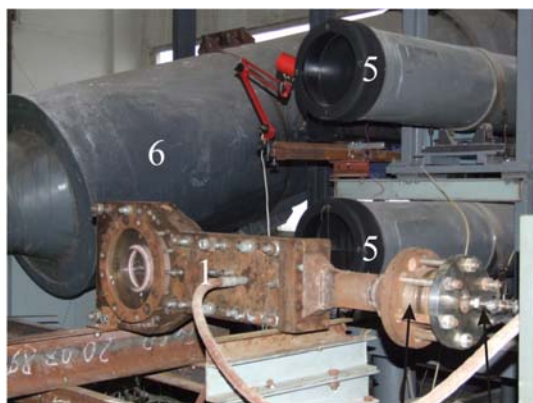


Рис. 2. Ударная установка: 1 – плоская модель; 2 – узел разрывной диафрагмы; 3 – разрывная диафрагма; 4 – подводящий штуцер; 5 – осветитель и коллиматор теневого прибора ИАБ-451 (рабочее поле – 230 мм); 6 – глушитель уровня звука выхлопа в атмосферу

котором будут служить источниками звука, регистрируемыми микрофонами 10. Визуализация течения на выходе обеспечивается прибором Теплера 11.

Методика определения параметров течения 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 при истечении газа из модели в процессе испытаний.

Расчетным и экспериментальным путем были определены материал и конструкция разрывных диафрагм для конкретных условий

испытания.

Испытания моделей проводились в следующем порядке.

1. Продувочный газ под рабочим давлением подавался из баллонов высокого давления 6 через вентиль 9 на вход в редуктор 8.
2. Значение входного давления регистрировалось манометрами 12 и датчиками давления 13.
3. Дистанционно включалась видео камера теневого прибора 11.
4. Повышалось давление в патрубке 5 до срабатывания диафрагмы 4.
5. Регистрировались параметры испытаний (p_0 – давление на входе в ПСУЗВ, p_1 – давление в канале ПСУЗВ).
6. Регистрировалась визуализационная картина течения.
7. Регистрировался уровень звука.
8. Отключалась подача продувочного газа редуктором 8 (рис. 1).
9. Отключалось электропитание элементов автоматики и регулирования.
10. Отключалось электропитание теневого прибора.
11. Выключалась видеокамера.
12. Закрывался вентиль 9.

В табл. 1 приведены результаты испытаний моделей ПСУЗВ ПБС-ИТМ-5 на ударной установке (рис. 1).

Табл. 1. Результаты испытаний

Номер испытания	Индекс видеоматериала	Длительность съемки, с	Давление газа p_0 в момент разрыва диафрагмы, МПа	Наличие ПСУЗВ ПБС ИТМ	Температура торможения продувочного газа T_0 , К	Примечание (регистрация процесса)
1	-	-	0,2	-	285	-
2	-	-	2,2	-	283	-
3	-	-	3,2	-	285	-
4	MVI 2080	35	0,7	-	283	Видеосъемка
5	MVI 2081	31	1,5	-	280	Видеосъемка
6	-	-	0,4	-	285	-
7	MVI 2083	16	1,2	+	285	Видеосъемка
8	MVI 2084	24	1,1	+	290	Видеосъемка, визуализация
9	-	-	2,2	-	290	-
6	-	-	2,6	-	285	-
7	-	-	2,8	-	290	-

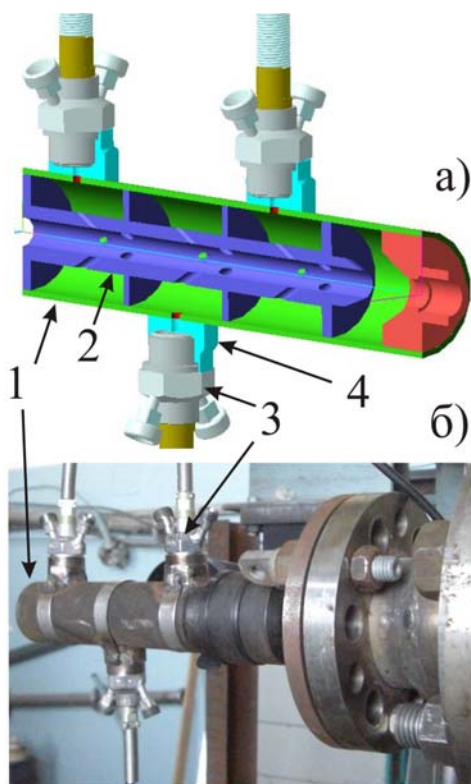


Рис. 3. Модель ПБС ИТМ-5:
а) продольный разрез модели; б) модель на испытательном стенде;
1 – корпус модели; 2 – рассекатель;
3 – датчик пульсаций давления ДДИ-21; 4 – штуцер

При разработке и изготовлении модели ставилось целью максимально приблизить датчик ДДИ-21 к расширительной камере.

Пульсаций давления в камерах ПСУЗВ измерялись датчиками ДДИ-21.

Для измерения давления использовались технические манометры МТП – 160 с погрешностью 0,6 %.

Индуктивные датчики полного давления типа ДДИ-21 дают возможность измерять значение давления до 120,0 МПа в импульсе, частоту до 20000 Гц. Гистерезис – не более 2 %, нелинейность тарировочной характеристики в диапазоне от 0 до P_{\max} не более 5 %.

Датчик включается в одно плечо высокочастотного индуктивного моста, который находится в преобразователе ИВП-2, являющимся вторичным преобразователем в системе измерения быстроизменяемых давлений.

Визуализация проводилась на поверхности рассекателя (рис. 3) и наружного цилиндрического корпуса ПСУЗВ. Методика проведения визуализации описана в [13].

Для получения визуализационной картины перед испытанием в подводящем патрубке или на разрывной диафрагме (рис. 2) размещался мелкодисперсный порошок красителя, а внутренняя поверхность модели глушителя покрывалась тонким слоем масла минерального (ГОСТ 20799-88). Свойства красителя примерно соответствовали свойствам продуктов сгорания заряда выстрела.

Сравнение результатов визуализационных испытаний на модели и на натурном ПСУЗВ представлены на рис. 5, где а) – визуализационная картина, полученная на осесимметричной модели 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.

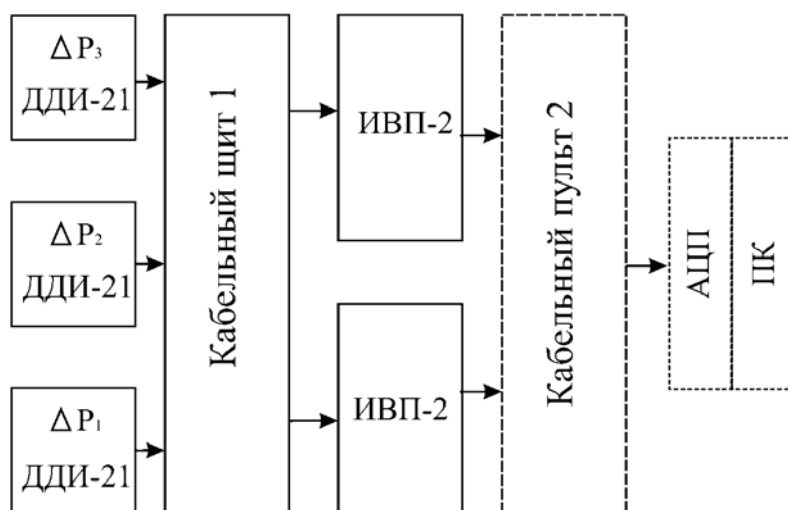


Рис. 4. Структурная схема системы измерений пульсаций давления: $\Delta P_1 - \Delta P_3$ – диапазон измерения давлений в первой, второй и третьей расширительных камерах модели соответственно

Модель ПСУЗВ типа ПБС-ИТМ – 5 и структурная схема измерений представлены на рис. 3 и рис. 4.

На рис. 3а показан продольный разрез модели. На рис. 3б показана модель на испытательном стенде. При сборке модели в корпус 1 устанавливался рассекатель 2. Датчики 3 измерения пульсирующего давления ДДИ-21 устанавливались в гнезда 4. После сборки модель устанавливалась на испытательный стенд (рис. 3б) и крепилась к фланцам.

Сопоставление картин обтекания, полученных в экспериментальных (рис. 5а) и в натуральных (рис. 5б) условиях показало их качественное и количественное сходство формы (сравнение 1 и 1-1; 2 и 2-2) (в частности, отношение длины к ширине, площадей и др.).

Полученные результаты могут служить в качестве достаточной верификации получаемых на ударных установках визуализационных картин потока газа в полости ПСУЗВ.

С помощью ударной установки была проведена оценка эффективности ПСУЗВ типа ПБС ИТМ - 5 на стадии проектирования и разработки без применения огнестрельного оружия и боеприпасов. Генератором звукового импульса являлся доработанный ударный стенд (рис. 1). Доработка состояла в том, что в установку был введен подводящий трубопровод (внутренний диаметр – 50 мм) 5 который служил в качестве вспомогательной (буферной) емкости, для накопления газа перед диафрагмой и имитации выстрела. На магистрали, соединяющей его с баллонами высокого давления, была установлена запорно-регулирующая арматура 7 – 9. Это позволило создавать импульсную подачу воздуха в модель, имитирующую выстрел и при определении экстремальных значений эффективности снижения уровня звука выстрела изменять характеристики потока в полости ПСУЗВ. Порция газа может задаваться как по величине давления, так и по продолжительности импульса. 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).

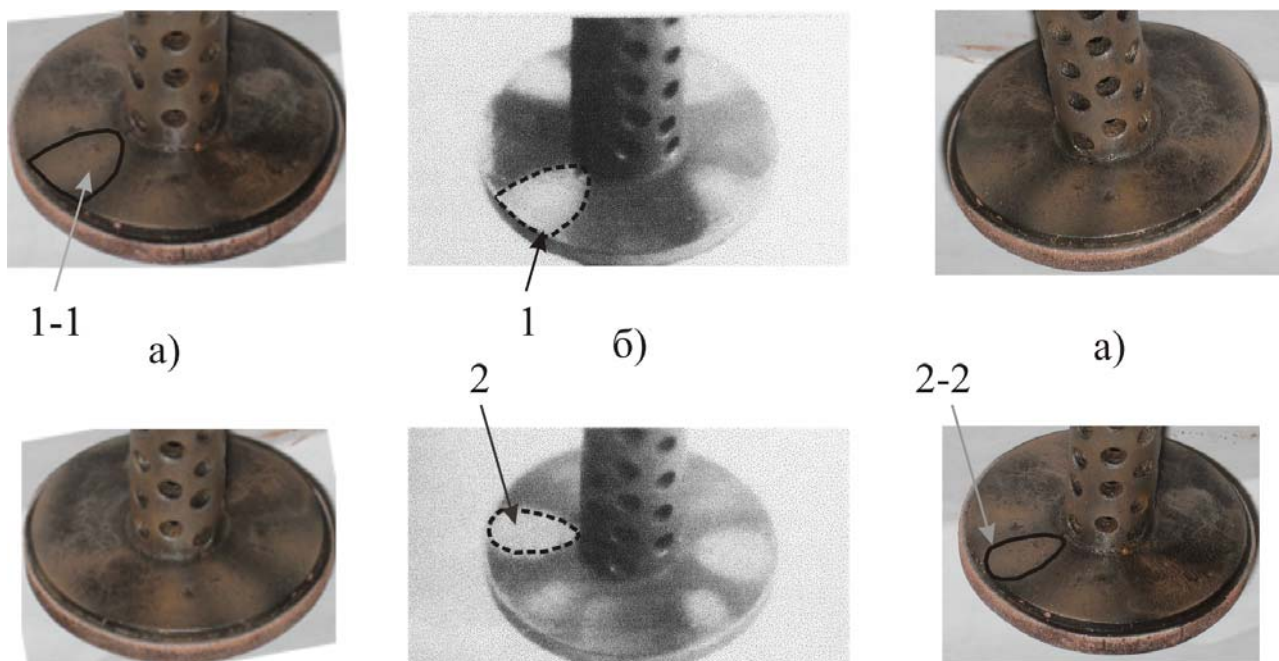


Рис. 5. Сравнение результатов визуализационных испытаний на модели и на натурном ПСУЗВ: а) – визуализационные картины, полученные на экспериментальном стенде (давление разрыва диафрагмы $p = 1,1$ МПа); б) визуализационные картины, полученные при использовании боеприпасов и стрелкового оружия в условиях стрельбы на полигоне

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.

Конструкция узла крепления диафрагмы позволяет максимально упростить эксперимент и расширить диапазон исследуемых характеристик потока в полости ПСУЗВ. Используя разрывные диафрагмы разной толщины и из различного материала можно обеспечить требуемые изменения условия проведения испытаний.

Таким образом разработанная конструкция ударной установки и методика проведения эксперимента позволяют достичь корректных испытаний ПСУЗВ.

Пример результата испытания модели в «ударном режиме» в виде обработанных материалов цифровой видеосъемки характеристик процесса испытаний приведен на рис. 6. Здесь фиксировались: покадровое изображение процесса испытаний (в том числе показание манометра); уровень звука и текущее время, привязанное к кадрам видеосъемки.

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

Из сравнения рабочих участков звуковой дорожки (рис. 6) видно, что абсолютный уровень звука имитации выстрела при наличии на стенде глушителя ПСУЗВ значительно снижается.

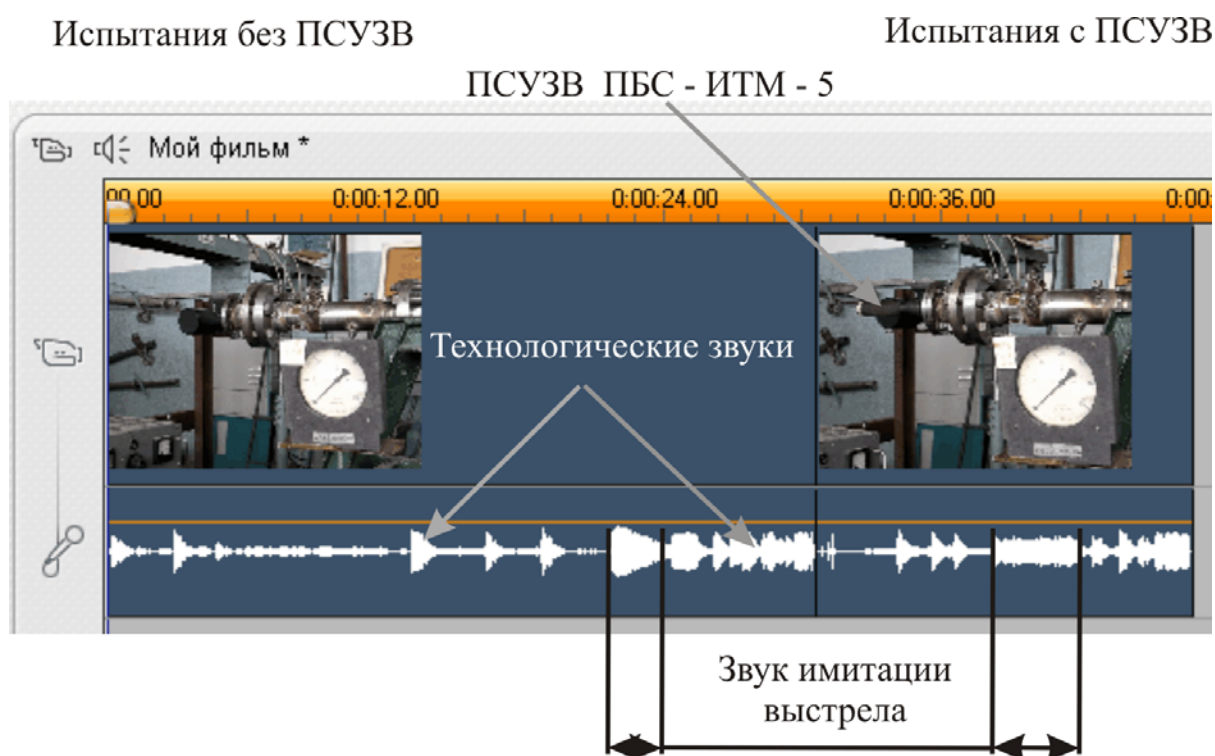


Рис. 6. Сравнение уровней звука имитации выстрела

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создана и опробована установка с использованием разрывных диафрагм для исследования ударных процессов в каналах моделей ПСУЗВ. Показана работоспособность установки, выдержавшей тестовые повышенные нагрузки, ее эксплуатационная технологичность.

Разработанная конструкция установки и методика проведения эксперимента гарантируют получение корректных результатов по визуализации картины течения в полости ПСУЗВ и эффективности снижения уровня звука выстрела.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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. и др. – Днепропетровск : НАН Украины и НКА Украины, Институт технической механики, 2008. – 303с.

2. **Процессы** торможения сверхзвуковых течений в каналах / О.В. Гуськов, В.И. Копченков, И.И. Липатов и др. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. - 168 с.

3. **Зубин М.А., Астапенко Н.А., Чулков А.А.** О новых свойствах отрыва турбулентного пограничного слоя в сверхзвуковых конических течениях на подстилающих поверхностях с изломом // Королевские чтения : материалы XXXIV академических чтений по космонавтике. – М. : Научное издательство «Акт», 2010. – С. 184-185.

4. **Получение** и обработка теневых изображений газодинамических процессов с помощью автоматизированных цифровых систем / И.В. Ершов, В.Е. Алехин, А.П. Овечкин и др. // Оптические методы исследования потоков» (ОМИП 2009) : труды X междунар. конф. – М. : Издательский дом МЭИ, 2009. – С. 202-205.

5. **Галактионов А.Ю., Каракотин И.Н.** Зависимость аэродинамических нагрузок на поворотное сопло ракеты-носителя от числа Рейнольдса // Космонавтика и ракетостроение. – 2009. – №3 (56). – С.30–36.

6. **Стрельников Г.А.** Регулируемые сверхзвуковые сопла малой длины – Днепропетровск: Изд-во ДГУ, 1993. – 192 с.

7. **Приходько А.А.** Современное состояние математического моделирования в аэрогидродинамике и тепломассообмене // Техническая механика. – 2009. – №1. – С. 29-43.

8. **Менде Н.П.** Наблюдение околодульных процессов // Физико-газодинамические баллистические исследования. – Л.: Наука.– 1980.– С. 225-231.

9. **Разработка** средств и методов визуализации течения газа в приборах снижения звука выстрела стрелкового оружия / Н.А. Коновалов, О.В. Пилипенко, Г.А. Стрельников и др. // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. – №2/59. – С. 53-61.

10. **Установка** для визуализации течения газа в приборах снижения звука выстрела стрелкового оружия / Н.А. Коновалов, О.В. Пилипенко, Г.А. Поляков и др. // Оптические методы исследования потоков (ОМИП 2009) : труды X междунар. конф. – М. : Издательский дом МЭИ, 2009. – С. 470-473.

11. **Исследование** течения газа в приборах снижения звука выстрела стрелкового оружия методом визуализации / Н.А. Коновалов, О.В. Пилипенко, Г.А. Поляков и др. // Оптические методы исследования потоков (ОМИП 2009): труды X междунар. конф. – М. : Издательский дом МЭИ, 2009. – С. 474-477.

12. **Исследование** течения в плоской модели глушителя звука выстрела стрелкового оружия с применением методов визуализации / Коновалов Н.А., Астапов А.И., Пилипенко О.В. и др. // Техническая механика.– Днепропетровск : ИТМ. – 2007. – №2. – С.137–146.

13. **Чаплиц А.Д., Астапов А.И.** Визуализация газовых потоков во внутренних каналах – Днепропетровск: НАН Украины и НКА Украины, Институт технической механики, 2007. – 209с.

14. **Ударная** установка для исследования газодинамических процессов в приборах снижения уровня звука выстрела / Коновалов Н.А., Пилипенко О.В., Скорик А.Д. и др. // Техническая механика. – 2010. – №3. – С.88-96.

15. **Способ** визуализации газовых потоков при моделировании условий выстрела / Коновалов Н.А., Пилипенко О.В., Скорик А.Д. и др. Заявка на выдачу патента на изобретение №200912205 Украина, МПК (2009) F41A 17/00. Заявитель и патентообладатель Институт технической механики НАНУ И НКАУ. – Заявл. 14.06.2010.

16. **Установка** для визуализации газовых потоков при моделировании условий выстрела / Коновалов Н.А., Пилипенко О.В., Скорик А.Д. и др. Заявка на выдачу патента на изобретение № 200912204 Украина, МПК (2009) F41A 17/00. Заявитель и патентообладатель Институт технической механики НАНУ и НКАУ. – Заявл. 14.06.2010.

17. **Модель** для экспериментального исследования течения газа в полостях приборов снижения уровня звука выстрела стрелкового оружия / **Коновалов Н.А., Пилипенко О.В., Скорик А.Д. и др.** Заявка на выдачу патента на изобретение №201012423 Украина, МПК

(2010) F41A 17/00. Заявитель и патентообладатель Институт технической механики НАНУ и НКАУ. – Заявл. 21.10.2010

*N.Konovalov, O.Pilipenko, A.Skorik, G.Polyakov,
D. Semenchuk, G.Strelnikov, A.Chaplits, A. Astapov*

Institute of Technical Mechanics NASU & NSAU, Dnepropetrovsk, Ukraine

SHOCK GASDYNAMIC UNIT AND ITS USE AT GAS FLOW VISUALIZATION IN FIRING SOUND REDUCTION DEVICES

Research results on shock unit improvement for visual study of nonstationary gas flow in cave of firing sound reduction device (FSRD) and its efficiency determination are given. An approach of experiment arrangement and procedure on two-dimensional and axial-symmetric model is considered. Operability of the unit that could stand test increased loadings and its maintenance workability are shown. Verification of results obtained from the shock unit by its comparison with results obtained in repair determination of FSRD examined under proving-ground tests in a fire-arm is carried out.

SHOCK GASDYNAMIC UNIT, BURST DIAPHRAGM, INTERNAL GAS FLOW, FIRING
SOUND REDUCTION DEVICE