

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

УДК 533.6.07

Н.А. Коновалов, О.В. Пилипенко, А.Д. Скорик, Г.А. Стрельников,  
С.П. Михайлов, В.И. Коваленко, А.Д. Чаплиц, А.И. Астапов

*Институт технической механики, Днепропетровск, Украина  
49600, ГСП, Днепропетровск -5, ул. Лешко-Попеля, 15, E-mail: a-chaplits@mail.ru*

**ВИЗУАЛИЗАЦИЯ КАРТИНЫ ТЕЧЕНИЯ ГАЗА В ПОЛОСТИ  
ПРИБОРА СНИЖЕНИЯ УРОВНЯ ЗВУКА ВЫСТРЕЛА**

*Рассматривается постановка и методика проведения эксперимента по визуализации картины течения газа в полости прибора снижения звука выстрела (ПСУЗВ). Приведены визуализационные картины, полученные с помощью прибора Теплера и поляризационного интерферометра с двоякопреломляющими призмами Волластона, (polarization interferometer), используемого в режиме «бесконечно широкой полосы». Проведен анализ полученных визуализационных картин с использованием метода цифровой обработки. Выявлены некоторые особенности структуры течения во входной полости и камерах ПСУЗВ, которые могут иметь влияние на его акустические характеристики.*

**ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ГАЗОВОГО ПОТОКА, ПРИБОР СНИЖЕНИЯ ЗВУКА ВЫСТРЕЛА,  
ВНУТРЕННИЕ ПОТОКИ ГАЗА**

**ВВЕДЕНИЕ**

В последнее время уделяется внимание исследованию процессов в полостях приборов снижения уровня звука выстрела (ПСУЗВ) огнестрельного оружия [1 – 5]. Несмотря на многообразие конструктивных схем ПСУЗВ аэродинамика потоков в их расширительных камерах и полостях подобна и может изучаться на моделях.

Исследования течений во внутренних каналах теоретическими методами предполагает, как правило, использование существенных упрощений и гипотез, необходимых для получения решений. В отличие от теоретических, экспериментальные методы [1 – 5] позволяют исследовать реальные течения в каналах самых сложных форм, в том числе таких, где обычные наблюдения в реальном времени невозможны. При этом сложной проблемой является визуализация газовых потоков в труднодоступных замкнутых полостях. По нашим сведениям практически нет информации о качественной визуализации газовых потоков в каналах приборов снижения звука выстрела стрелкового оружия (ПСУЗВ) при их функционировании. Экспериментаторы ограничиваются наблюдением процессов непосредственно за срезом оружейного ствола или ПСУЗВ [6]. При этом визуализация течения в полости ПСУЗВ ведется косвенными и малоэффективными методами.

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

Особый интерес представляет взаимодействие скачков уплотнения с поверхностями разной формы в полости шумоглушащих устройствах, поскольку при сверхзвуковых скоростях акустические возмущения могут взаимно усиливаться в результате резонанса, имеющего место на фронте ударной волны, а сила звука, излучаемого ей значительно превышает шум, издаваемый источником в невозмущенном потоке. В наложении акустических волн за фронтом ударной волны за короткое время воспроизводится весь суммарный шум, изданный источником за конечный промежуток времени.

Сложные и трудоемкие численные исследования процессов в расширительных камерах ПСУЗВ привели к необходимости экспериментального подтверждения полученных в расчетах газодинамических характеристик газового потока.

Прогресс в понимании сложного явления может быть обеспечен за счет сочетания экспериментальных и численных методов исследования процессов в полости ПСУЗВ.

Для успешного исследования течения газа во внутренних полостях ПСУЗВ, имеющего сложный характер и трудоемкого для численного моделирования необходимо применение самых современных экспериментальных методов, которые применяются в исследованиях внешней баллистики.

Расширился арсенал средств диагностики параметров газа около летящего объекта. В дополнение к интерферометру Маха – Цандера, прибору дорогому и редко встречающемуся, появились сравнительно компактные и виброустойчивые сдвиговые интерферометры. А так же находят применение и методы голографии.

## ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Настоящая работа явилась продолжением исследований, опубликованных в работах [1 – 3] и проводилась в два этапа. Была продолжена разработка методов экспериментальных исследований устройств с многократным расширением потока и их прозрачных моделей.

Испытания проводились на плоской модели ПСУЗВ, конструктивные особенности, которой подробно описаны в [7].

В ходе отладки эксперимента была доработана конструкция визуализационных окон модели с целью совершенствования регулировки их взаимной ориентации и ориентации относительно главной оптической оси визуализационных приборов. Указанное изменение конструкции подробно описано в [8].

Первый этап испытаний проводился на рабочем месте газодинамического испытательного стенда ИТМ, оснащенный теневым прибором ИАБ-451 (рис. 1). ИАБ функционировал в режиме «щель – нож» и в режиме поляризационного интерферометра.

Доработанная модель ПСУЗВ была собрана согласно технической документации и установлена на рабочее место газодинамического испытательного стенда (рис. 1).

Собранный в ИТМ на основе теневого прибора ИАБ-451 сдвиговой поляризационный интерферометр показан на рис. 1.

Основными базовыми частями для создания интерферометра [9] служат (рис. 1): осветительная 1 и коллиматорная 2 части прибора ИАБ-451, диагональные зеркала 3, защитные стекла 4 и испытываемая плоская модель ПСУЗВ 5. В качестве осветителей 6 могут использоваться лазер или «широкий» источник света. В данных испытаниях применялась лампа накаливания мощностью 60 Вт и напряжением 220 В. Осветительный узел 7 интерферометра (с поляридом 45 град.) крепился на штатное место осветителя. Приемный узел интерферометра 8 (с анализатором 135 град.) крепился на штатное место ножа Фуко коллиматора 2. Между лазером и «широким» источником света устанавливался поворотная призма 9. Приемный поворотный узел 10 устанавливался между основной 11 и вспомогательной 12 ветвью фотографирования.

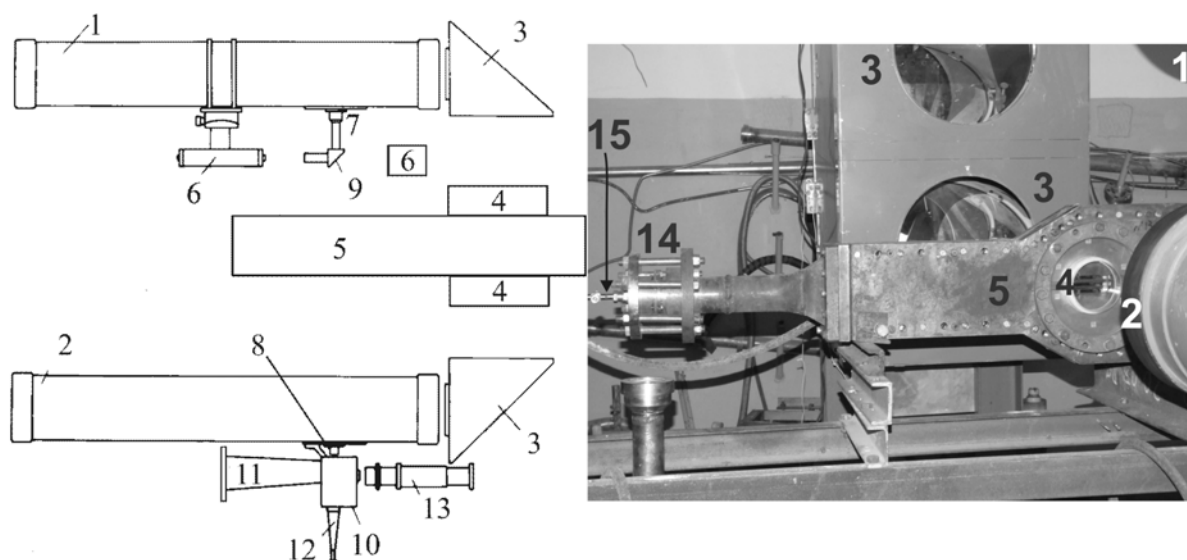


Рис. 1. Схема и фотография теневого прибора ИАБ-451 при испытании «плоских» моделей ПСУЗВ: 1, 2 – осветительная и коллиматорная части прибора ИАБ-451; 3 – диагональные зеркала; 4 – защитные стекла; 5 – плоская модель ПСУЗВ; 6 – осветители (лазер или иной источник света); 7 – осветительный узел; 8 – приемный узел; 9 – поворотная призма; 10 – приемный поворотный узел; 11, 12 – основная и вспомогательная ветви фотографирования; 13 – наблюдательная ветвь; 14 – узел разрывной диафрагмы; 15 – подводный трубопровод

Прибор юстировался и настраивался через наблюдательную ветвь 13. Оптическая ось системы 4 совмещалась с главной оптической осью коллиматора 2.

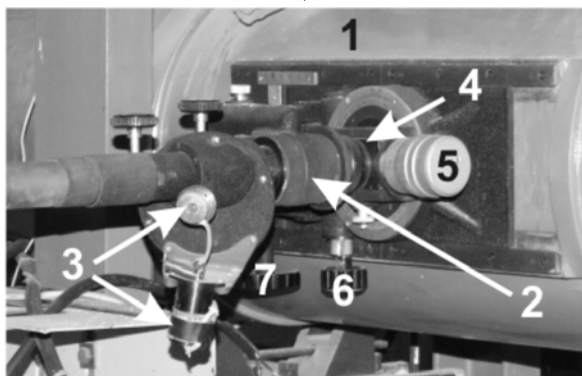


Рис. 2. Доработка приемного узла прибора ИАБ-451 под установку поляризационного интерферометра: 1 – коллиматор; 2 – переходная втулка; 3 – поворотный полуавтоматический узел; 4 – приемный поляризатор интерферометра; 5 – микрометрический винт продольного перемещения; 6 – винт поворотного червячного механизма; 7 – винт продольной настройки

После визуализационных испытаний в режиме «щель – нож», расположенный на коллиматорной части 1 (рис. 2) теневого прибора ИАБ-451, приемный узел перенастраивался в режим работы поляризационного интерферометра [9]. С помощью переходной втулки 2 при переключенном поворотном узле 3 на крепежное место ножа Фуко устанавливался приемный узел 4 интерферометра так, чтобы упорный штифт каретки вошел в соответствующий паз узла. При этом на крепежное место узла щели устанавливался осветительный узел интерферометра. На осветительный узел устанавливался «широкий» осветитель и рассеиватель. Прибор юстировался, наводился на резкость до наблюдения полос интерференции с помощью микрометрических винтов 5 – 7 (рис. 2).

Для наблюдения цветовых эффектов прибор настраивался на «бесконечно широкую интерференционную полосу» наблюдения. При этом выбиралась желто-зеленая область спектра, как самая наблюдаемая [10]. Настройка производилась таким образом, что при «небольших» смещениях приемного узла интерферометра отсутствует впечатление одностороннего движения цветов (слева направо или справа налево).

Интерференционная картина дает возможность установить форму волновой поверхности, прошедшей исследуемый прозрачный объект [10]. Деформации волновой поверхности связаны с изменением плотности газа. На снимке эти деформации выражаются в изменениях формы интерференционных полос или изменения цвета визуализационной

картины. Причем в доступных источниках информации не обнаружены описания экспериментов, когда наблюдение велось в режиме «бесконечно широкой интерференционной полосы», и с применением цветового спектра.

На втором этапе плоская модель ПСУЗВ была установлена на рабочее место газодинамического стенда, оснащенное теневым прибором с рабочим полем 70 мм (рис. 2). Методика и порядок проведения испытаний подробно описаны в [10].

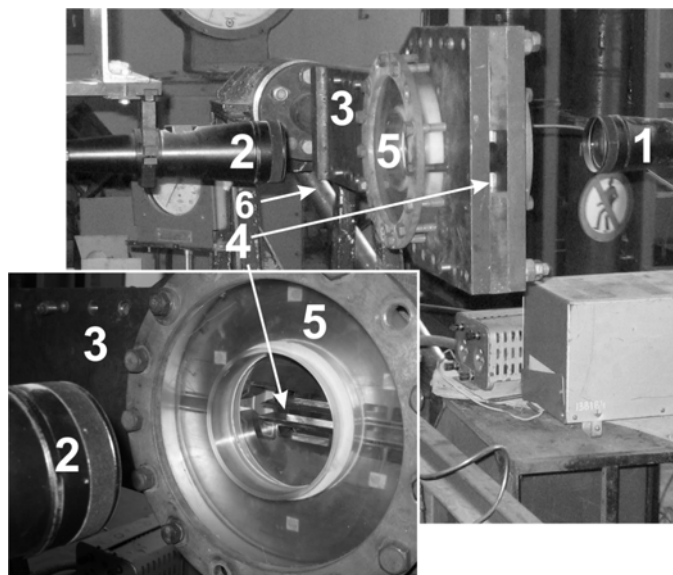


Рис. 3. Теневой прибор (рабочее поле  $d = 70$  мм) при испытании модели ПСУЗВ: 1, 2 – осветительная и коллиматорная части прибора; 3 – плоская модель ПСУЗВ; 4 – исследуемый профиль модели; 5 – защитные стекла; 6 – подводящий трубопровод

На плоской модели (рис. 1, 3), подготовленной для проведения эксперимента, были проведены продувки «холодным воздухом» с целью визуализации течений. Конструктивные особенности, сборка и регулировка модели перед испытаниями подробно описаны в [10].

Система измерений и подачи воздуха высокого давления описана в [10]. При экспериментах использовался очищенный и осушенный воздух высокого давления с точкой росы, не превышающей  $T_p = 55^\circ\text{C}$ .

После изготовления модель была собрана согласно технической документации и установлена на испытательный стенд, состав и устройство которого подробно описаны в [10].

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

Воздух при рабочем давлении  $P$  подавался в плоскую модель через узел разрывной диафрагмы по подводящему трубопроводу внутренним диаметром 10 мм.

Методика проведения экспериментов включала:

- Монтаж и наладку газодинамического стенда.
- Монтаж и наладку элементов автоматики и регулирования.
- Наладку и юстировку регистрирующей аппаратуры (теневой прибор в режиме «щель-нож» или в режиме интерферометра).

– Определение параметров режимов работы установки.

– Получение визуализационной картины течения.

– Регистрацию давлений по тракту.

Испытания проводились в следующем порядке.

– Продувочный газ под рабочим давлением подавался из баллонов высокого давления через входной вентиль на вход в модель через узел разрывной диафрагмы.

– Значение входного давления автоматически регистрировалось.

– Дистанционно включалась цифровая камера или блок искрового освещения ртутной лампы.

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

– Регистрировалась визуализационная картина течения в каналах модели.

– Отключалась подача продувочного воздуха в модель.

– Отключалось электропитание элементов автоматики и регулирования.

– Отключалось электропитание теневого прибора.

- Выключалась видеокамера.
- Закрывался входной вентиль подачи воздуха.

### Результаты визуализации картины течения

Результаты экспериментов показаны в таблице 1 и на photographиях (рис. 4 – 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	101020.05	43	0,6	283	0,05	+
2	101020.06	36	0,8	280	0,05	+
3	101020.07	39	0,6	285	0,05	+
4	101020.08	48	0,8	290	0,05	+
5	101020.09	35	0,4	290	0,05	+
6	101020.10	68	0,8	285	0,05	+
7	101020.11	32	0,4	290	0,01	-

На photographиях (рис. 4) показаны визуализационные картины течения в модели ПСУЗВ, полученные методом Теплера при различных давлениях на входе в модель.

На photographиях (рис. 5 (поз. 1)) показана визуализационная картина течения в модели ПСУЗВ, полученная с помощью поляризационного интерферометра при давлении на входе  $P_0 = 0,8$  МПа. Варианты последовательной цифровой обработки кадров показаны на том же рисунке (поз. 2 – 9).

На photographиях (рис. 6) показаны визуализационные картины течения в модели ПСУЗВ, полученные различными методами.

Анализируя рисунки 4 – 6, можно сделать следующие выводы.

Полученная информация о течении в каналах ПСУЗВ (см. рис. 4) согласуется и дополняет результаты испытаний, полученные на первых этапах настоящего исследования [3, 11].

При этом, исследовано обтекание большего количества элементов внутренних каналов ПСУЗВ, чем в работах [1, 4]. Например, получены визуализационные картины в первой и второй камерах модели глушителя, течение в его канале исследовано на большую относительную длину и т.д. (см. рис. 6). Течение в канале имеет характерные систематические особенности, свидетельствующие о характере развития течения и его структуре.

Течение на начальном участке канала (см. рис. 6в), описано в работе [11].

Анализируя рис. 4, можно сделать вывод о зависимости структурных и турбулентных возмущений в полостях модели ПСУЗВ от давления на входе.

Анализируя отснятый видеоматериал (см. табл. 1), можно сделать вывод, что течение в камерах ПСУЗВ имеет колебательный характер.

При рассмотрении картин визуализации рис. 6а и рис. 6б следует учитывать следующее.

Принцип получения интерференционной картины (рис. 6а) описан в работе [9]. Ребра клиньев обеих призм параллельны между собой, азимуты пропускания поляроидов составляют углы  $\pm 45^\circ$  с ребрами клиньев. Действие призм основано на том, что вследствие оптической анизотропии кристаллического материала падающий луч разделяется на два луча со взаимно перпендикулярными азимутами поляризации, причем лучи отклоняются в разные стороны. Поляриод обеспечивает когерентность (способность к интерференции) обоих лучей, а также примерное равенство их интенсивностей. Поскольку лучи, поляри-

званные взаимно перпендикулярно, интерференционной картины не дают, в приемном узле установлен поляризатор-анализатор. Выделяя одинаково направленные компоненты поляризации обоих пучков, он дает возможность наблюдать интерференционную картину.

Таким образом, в сдвиговом интерферометре (настроенном на «полосы бесконечной ширины») происходит интерференция идентичных волновых поверхностей, одинаково искаженных исследуемым объектом, но находящихся рядом по отношению друг к другу.

Принцип создания картины, полученной на приборе Теплера (рис. 6б) [12] состоит в «срезании» отклоненных неоднородностью лучей, установленным в фокальной плоскости ножом Фуко. В результате этого происходит изменение освещенности, пропорциональное градиенту плотности в исследуемой области перпендикулярно кромке ножа.

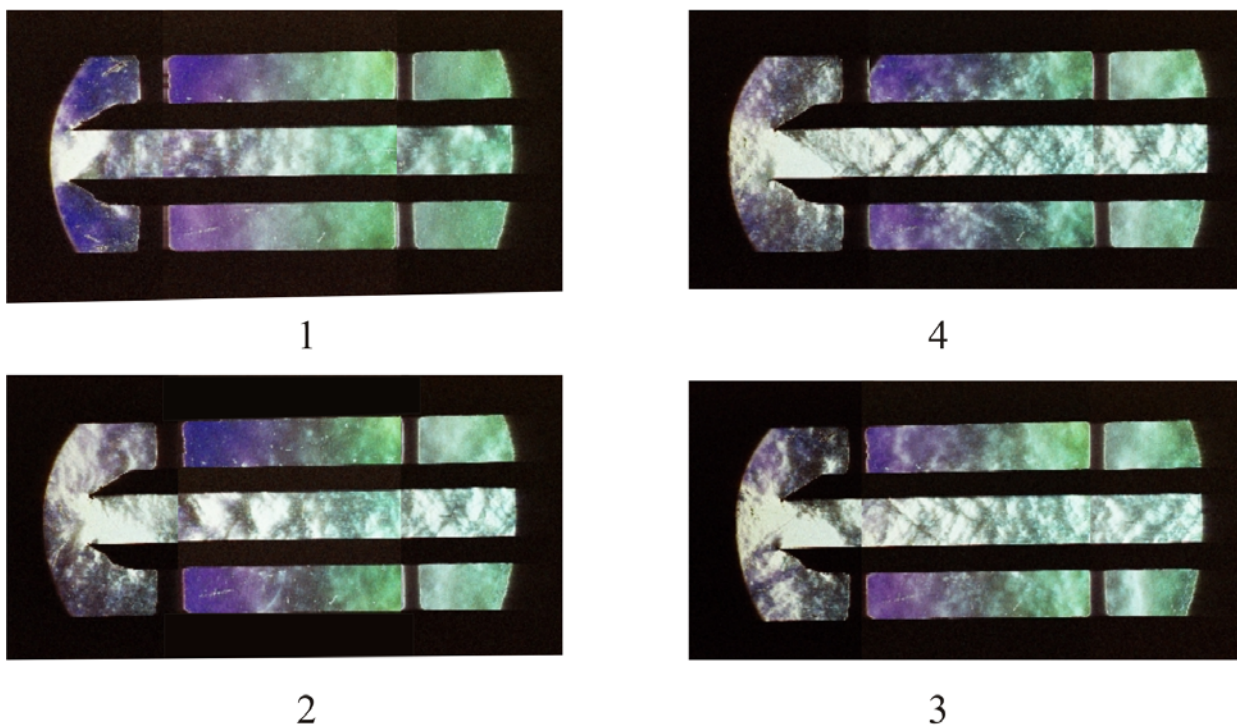


Рис. 4. Теплеровские снимки последовательных стадий развития течения ( $M = 2$ ) в канале модели ПСУЗВ: 1 –  $P_0 = 0,2$  МПа; 2 –  $P_0 = 0,4$  МПа; 4 –  $P_0 = 0,8$  МПа; 3 –  $P_0 = 0,6$  МПа

Анализ рис. 4 – рис. 6 показывает корреляцию визуализационных картин полученных на интерферометре и на приборе Теплера. Вместе с тем указанные результаты визуализации имеют свои особенности, приводящие к повышению информативности экспериментальных результатов.



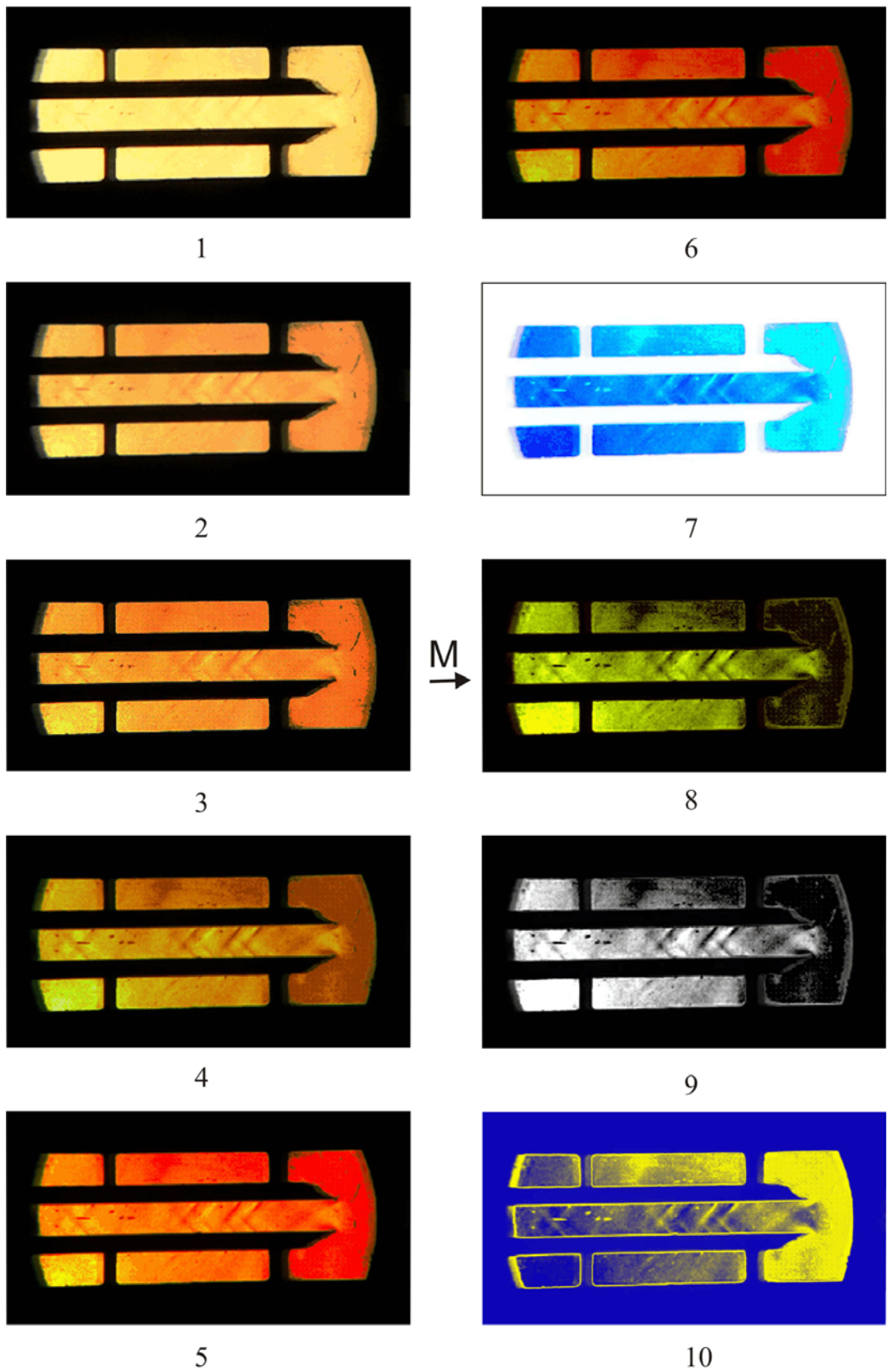
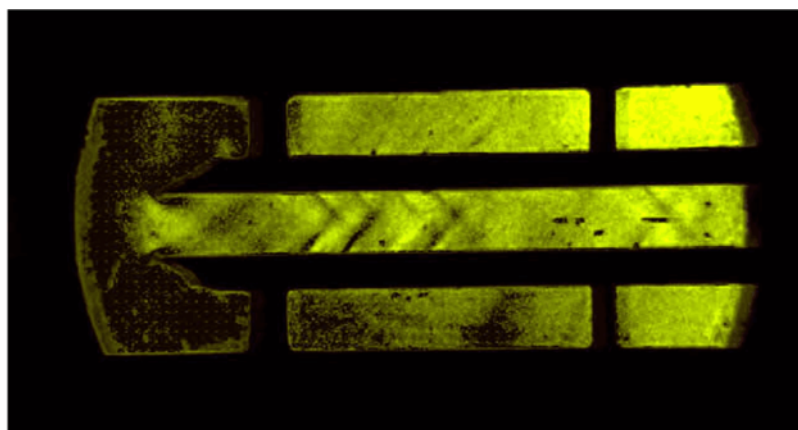
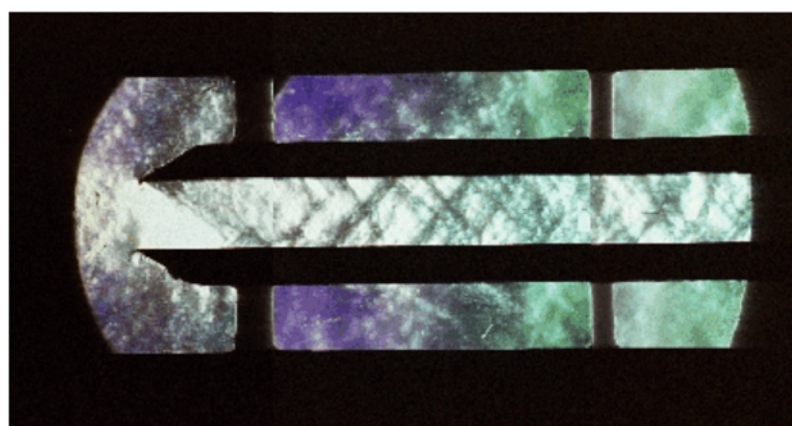


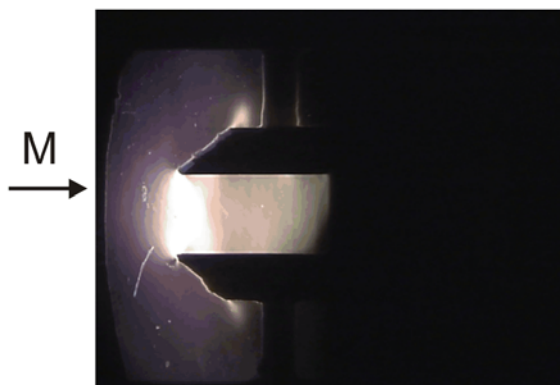
Рис. 5. Пример последовательной цифровой обработки кадров видеосъемки интерферограммы, полученной на поляризационном интерферометре ( $P_0 = 0,8$  МПа):  
 1 – захваченный необработанный кадр; 2 – 10 – обработанные кадры видеосъемки



а)



б)



в)

Рис. 6. Визуализационные картины, полученные различными методами при  $P_0 = 0,8$  МПа:  
а) поляризационный интерферометр; б) метод Теплера (искровая экспозиция, длительность вспышки 10 мкс); в) метод Теплера (съемка на видеокамеру, выдержка 1/25 с)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе теневого прибора ИАБ-451 собран и опробован в режиме «бесконечно широкой полосы» поляризационный интерферометр с двоякопреломляющими призмами Волластона, (polarization interferometer).

Доработаны методы диагностирования параметров газодинамических процессов в плоской модели с разной конфигурацией внутренних каналов. Использован метод цифро-



вой обработки визуализационных картин, полученных на поляризационном интерферометре.

Проведена визуализация в модели ПСУЗВ и сравнение полученных различными теневыми методами визуализационных картин [13].

Подготовлены экспериментальные исследования картины течения газа в полостях плоской модели прибора снижения звука выстрела (ПСУЗВ) на переходных и стационарных режимах.

Обнаружены новые особенности структуры течения во входной полости, каналах и камерах ПСУЗВ, которые могут указывать на источники акустических, шумовых возмущений в создаваемых конструкциях и разработать меры по снижению их интенсивности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **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.
2. **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.
3. **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.
4. **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.
5. **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.
6. **Менде Н. П.** Наблюдение околодульных процессов // *Физико-газодинамические баллистические исследования*. – Л.: Наука.– 1980.– С.225-231.
7. **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.
8. **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
9. **Комиссарук В.А., Менде Н.П.** Опыт применения дифракционного и поляризационного интерферометров в баллистическом эксперименте // *Оптические методы исследований в баллистическом эксперименте*. – Л.: Наука.– 1979.– С.91-112.
10. **Чаплиц А. Д., Астапов А.И.** Визуализация газовых потоков во внутренних каналах. Днепропетровск : НАН Украины и НКА Украины, Институт технической механики, 2007. – 209с.
11. **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.
12. **Васильев Л. А.** Теневые методы / Л. А. Васильев. – М. : Наука, 1968. - 400 с.
13. **Альбом** течений жидкости и газа: Пер. англ. / Сост. М. Ван-Дайк. – М. : Мир, 1986. 184 с.

*N. Konovalov, O. Pilipenko, A. Skorik, S. Michaylov,  
V. Kovalenko, G. Strelnikov, A. Chaplits, A. Astapov*

Institute of Technical Mechanics NASU & NSAU, Dnepropetrovsk, Ukraine

### **IMAGE VISUALIZATION OF GAS FLOW IN CAVE OF FIRING SOUND REDUCTION DEVICE**

*An arrangement and an approach of experiment procedure on image visualization of gas flow in cave of firing sound reduction device (FSRD) are considered. Visualization images obtained with the use of Toepler's device and polarization interferometer with birefringent Wollaston prisms used under "infinitely broad band" regime are given. The analysis of obtained visualization images with the use of a digital processing method is given. Some flow structure features in FSRD input caves and chambers which can have influence on its acoustics are found.*

**GAS FLOW VISUALIZATION, FIRING SOUND REDUCTION DEVICE, INTERNAL GAS FLOW**