

**АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС, РЕАЛИЗУЮЩИЙ СХЕМУ  
ОДНОВРЕМЕННОГО ПОЛУЧЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ  
БЫСТРОПРОТЕКАЮЩЕГО ПРОЦЕССА  
В ОТРАЖЕННОМ И ПРОХОДЯЩЕМ СВЕТЕ**

© 2020 г. С. И. Герасимов<sup>a,b,c,d,\*</sup>, В. И. Ерофеев<sup>c,d</sup>, М. И. Крутик<sup>e</sup>,  
К. В. Тотышев<sup>b</sup>, Е. Г. Косяк<sup>a</sup>, П. Г. Кузнецов<sup>a</sup>, Р. В. Герасимова<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Саровский физико-технический институт –  
филиал Национального исследовательского ядерного университета “МИФИ”  
Россия, 607186, Саров Нижегородской обл., ул. Духова, 6

<sup>b</sup> Российский федеральный ядерный центр – ВНИИ экспериментальной физики  
Россия, 607190, Саров Нижегородской обл., просп. Мира, 37

<sup>c</sup> Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
Россия, 603950, Н. Новгород, ул. Минина, 24

<sup>d</sup> Институт проблем машиностроения РАН  
Россия, 603024, Н. Новгород, ул. Белинского, 85

<sup>e</sup> ООО НПП “НАНОСКАН”  
Россия, 107076, Москва, ул. Стромынка, 18

\*e-mail: s.i.gerasimov@mail.ru

Поступила в редакцию 28.01.2020 г.

После доработки 27.02.2020 г.

Принята к публикации 12.03.2020 г.

Описаны результаты разработки и приведены основные технические характеристики оптико-фото-электронного комплекса, предназначенного для одновременного получения изображений исследуемого быстропротекающего процесса в отраженном и проходящем свете и состоящего из двух устройств скоростной регистрации отечественного производства, импульсного источника света с газоразрядным точечным излучателем и полупрозрачного диффузно-рассеивающего экрана. Приведены примеры практического применения комплекса для получения информации в аэробаллистическом и газодинамических экспериментах, в том числе сопровождающихся интенсивным фоновым тепловым излучением.

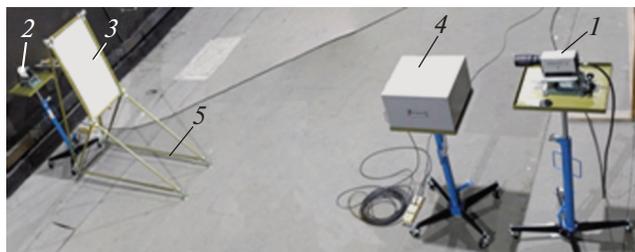
DOI: 10.31857/S0032816220040254

Увеличение скорости объекта исследований в ряде прикладных задач (баллистики, аэродинамики, физики взрыва и др.) сопровождается наличием фонового излучения, вызванного ионизацией окружающего газа, что снижает информативность фотографии процесса в отраженном свете. Повысить информативность картины можно, одновременно получив теневое изображение от того же источника света, имеющего точечные размеры излучателя. Это важно не только в случае гиперзвуковых скоростей, но и при сверхзвуковых режимах, когда фотография в отраженном свете позволяет наблюдать состояние поверхности исследуемого объекта (например, маркировку поверхности модели, наносимую для последующих фотограмметрических измерений), а теневая фотография позволяет анализировать спектр его обтекания.

Для реализации данной схемы разработан аппаратный комплекс, содержащий два устройства скоростной регистрации отечественного производства, импульсный источник света с газоразрядным точечным излучателем и полупрозрачный диффузно-рассеивающий экран (рис. 1).

Комплекс состоит из двух устройств для скоростной регистрации изображений, каждое из которых состоит из выносной электронно-оптической камеры (э.о.к.) с соответствующими цифровыми системами ввода изображения, управляющего компьютера с контроллерами ввода изображений на шине PCI, промышленного компьютера, соединительных кабелей и программного обеспечения для управления комплексом.

Параметры э.о.к.: спектральный диапазон чувствительности – 380...800 нм; задержка открытия затвора (“мертвое время”) – не более 80 нс; неста-



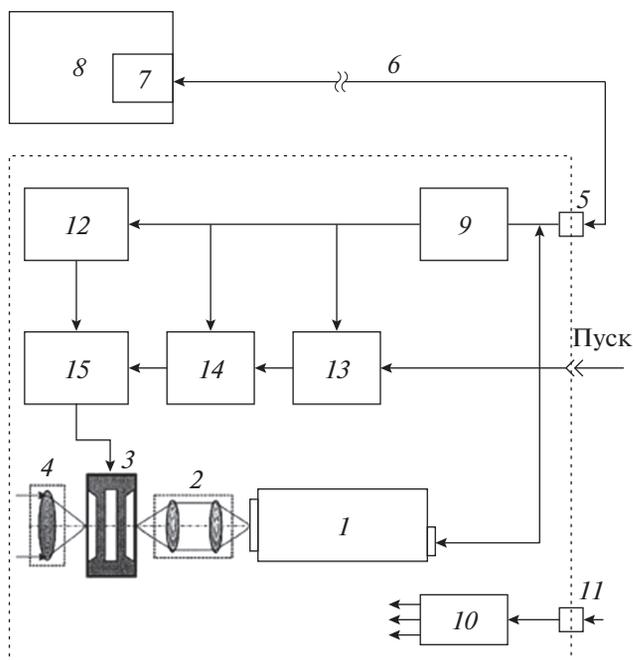
**Рис. 1.** Общий вид комплекса. 1 – камера для получения масштабных снимков в отраженном свете; 2 – камера для получения теневого спектров; 3 – диффузионно-рассеивающий полупрозрачный экран; 4 – импульсный источник света; 5 – гидравлические подставки.

бильность (джиттер) запуска камеры не более  $\pm 20$  нс; задержка запуска затворного импульса от 80 нс до 1300 мкс с шагом 20 нс; длительность затворного импульса от 40 нс до 20 мкс с шагом 40 нс.

Устройство для скоростной регистрации изображений (рис. 2) содержит цифровую видеокамеру 1, оптический вход которой связан через проекционный объектив 2 с выходом электронно-оптического преобразователя (э.о.п.) 3, оптический вход которого связан через входной объектив 4 с изображением регистрируемого объекта. Выход видеокамеры 1 соединен через разъем 5 и кабель связи 6 с контроллером 7 блока 8 приема и обработки информации.

Устройство содержит также интерфейсный модуль 9, источник 10 электропитания, связанный через соединительный разъем 11 с внешним источником электропитания (на рисунке не показан). Источник 10 предназначен для питания входящих в устройство функциональных блоков и узлов.

В устройство входят также программируемый высоковольтный источник питания 12 и последовательно соединенные программируемый формирователь 13 временных интервалов задержки, программируемый формирователь 14 длительности затворного импульса и формирователь 15 высоковольтного наносекундного затворного импульса. Вход интерфейсного модуля 9 связан через соответствующий соединительный разъем 5 с кабелем связи 6, а выход – с информационными входами программируемого высоковольтного источника 12, программируемого формирователя 13 временных интервалов задержки и программируемого формирователя 14 длительности затворного импульса. Выход программируемого высоковольтного источника 12 подключен к управляющему входу формирователя 15 высоковольтного затворного импульса, выход которого подключен к затвору э.о.п. 3. Запускающий вход программируемого формирователя 13

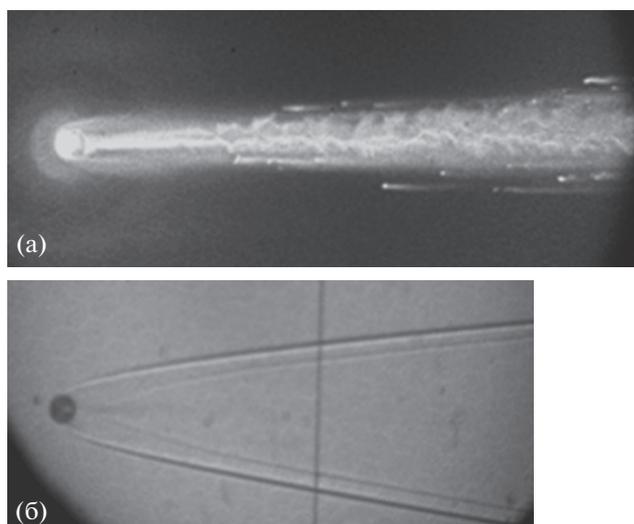


**Рис. 2.** Блок-схема устройства регистрации изображения. 1 – цифровая видеокамера; 2 – проекционный объектив; 3 – электронно-оптический преобразователь; 4 – входной объектив; 5 – разъем; 6 – кабель связи; 7 – контроллер; 8 – блок приема и обработки информации; 9 – интерфейсный модуль; 10 – источник электропитания; 11 – разъем; 12 – высоковольтный источник питания; 13 – формирователь временных интервалов задержки; 14 – формирователь длительности затворного импульса; 15 – формирователь высоковольтного наносекундного затворного импульса.

временных интервалов задержки подключен к входу “Пуск” устройства.

Режим многократной экспозиции, определяющий сколько раз будет открываться затвор э.о.п. при поступлении единственного импульса на разъем “Пуск”, устанавливает число затворных импульсов от 1 до 3. Интервал между повторяющимися затворными импульсами в режиме многократной экспозиции устанавливается от 120 нс до 1300 мкс с шагом 80 нс. Э.о.к. работает в двух режимах: квазистатическом, при котором э.о.п. постоянно приоткрыт (используется для юстировки комплекса), и динамическом, для которым э.о.п. постоянно закрыт, а его открытие происходит синхронно в момент прихода запускающего импульса [1].

Диапазон изменения напряжения на микроканальной пластине электронно-оптического преобразователя от 500 до 980 В позволяет варьировать коэффициент усиления изображения от 1 до 25000. Изменение длительности затворного импульса, интервал между повторяющимися затворными импульсами, значения задержки запуска затворного импульса, напряжения на микроканальной

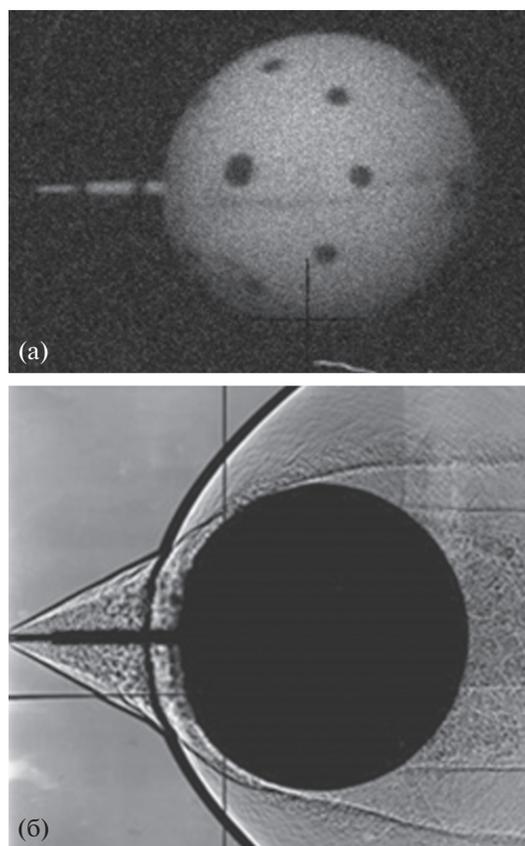


**Рис. 3.** Одновременная фоторегистрация в отраженном (а) и проходящем (б) свете шара из сплава вольфрам–рений, движущегося со скоростью 5.2 км/с.

пластине э.о.п. и режима работы (статика – динамика) происходит по командам от компьютера. Применяемая э.о.к. – камера Nanogate-2, используемый э.о.п. – ЭПМ102Г-05-22 (Россия), п.з.с.-матрица ICX-205AL (SONY) разрешением  $1380 \times 1024$ , размер пикселя  $4.65 \times 4.65$  мкм. Управляющая программа позволяет устанавливать временные и энергетические параметры выносных камер, захватывать кадры, записывать изображение в файл. Управление работой комплекса осуществляется с помощью виртуальной панели управления на экране монитора, которая представляет собой несколько окон (соответствует числу э.о.к. в комплексе), в каждом из которых визуализируются регистрируемые изображения.

Съемка при коротких экспозициях требует интенсивной подсветки объекта, которую выполняет газоразрядный излучатель, одновременно являющийся “светящейся точкой” в теневого ветви комбинированной схемы регистрации. Запуск источника света осуществляется сигналом от бесконтактного датчика того или иного типа (радар, индукционный датчик, фотодатчик) в момент появления объекта в поле зрения входного объектива [2, 3]. Точная регулировка задержки срабатывания затвора э.о.п. определяет момент съемки и выбирается из расчетного времени появления объекта в заданной точке.

Схема импульсного источника света состоит из шести функциональных блоков: источника высокого напряжения, предназначенного для зарядки высоковольтных конденсаторов каскадов умножения; схемы поджига, вырабатывающей импульс высокого напряжения в момент поступления импульса запуска; каскадов умножения,



**Рис. 4.** Движение шара со стержнем, движущегося со скоростью 1.2 км/с: а – фотография в отраженном свете, б – теневая картина спектра обтекания.

предназначенных для умножения импульсного напряжения в момент разряда высоковольтных конденсаторов через импульсную лампу; точечный газоразрядный излучатель световых импульсов [4]; формирователь импульса хронографии, преобразующий сигнал с токоразрядного датчика в нормированный по амплитуде и длительности сигнал; источник низкого напряжения, служащий для питания схемы поджига и формирователя импульса хронографии.

При поступлении импульса запуска схема поджига формирует высоковольтный импульс, инициирующий пробой управляемых разрядников в каскадах умножения импульсного напряжения.

Особенностью работы схемы с каскадным умножением импульсного напряжения является параллельный заряд конденсаторов в паузах между подачей пускового импульса и последовательный разряд при пробое разрядников (обычная схема Аркадьева–Маркса). Импульсное напряжение амплитудой  $\sim 30$  кВ при энергии разряда 75 Дж прикладывается к электродам точечного газоразрядного излучателя, вызывая появление световой вспышки. Газоразрядный излучатель с воздухом атмосферного давления в качестве рабочего газа, с

ограничением распространения разряда, с одной стороны, обладает необходимыми светотехническими параметрами, достаточными для построения изображения модели в отраженном свете (яркость  $\approx 6.2$  Мсб, тело свечения  $0.785 \text{ см}^2$ ), а с другой, имеет достаточно малое тело свечения ( $\varnothing 10 \text{ мм}$ ) для того, чтобы служить точечным источником теневой схемы и строить на экране теневые спектры удовлетворительного качества [4].

На рис. 3 приведен пример применения схемы для изучения аэротермомеханического разрушения объекта испытания из тугоплавкого материала при гиперзвуковой скорости движения в воздухе атмосферного давления.

На рис. 4 приведен пример применения схемы для сверхзвукового режима движения с отсутствием фоновых засветок — для получения информации о состоянии поверхности шара со стержнем, установленным в направлении полета (фотография в отраженном свете (рис. 4а)), и теневой картины спектра обтекания (рис. 4б). Повышение информативности за счет ветви теневой регистрации позволило выявить появление нормальной силы, зависящей от угла атаки, с составляющими, возникающими на боковой поверхности стержня, и дополнительной силы, обусловленной возмущением потока на поверхности шара от стержня.

Таким образом, разработан и применен в аэробаллистических испытаниях комплекс, реализующий при различных скоростных режимах одновре-

менную схему визуализации объекта испытаний в отраженном и проходящем свете, что позволяет существенно повысить информативность оптической регистрации в заданных измерительных участках трассы.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 18-08-00715; 18-29-10073).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крутик М.И., Майоров В.П., Попов В.В., Семин М.С. // Труды международной конференции — II Харитоновские тематические научные чтения “Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны” (Саров, 14–18 марта 2005 г.). Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005.
2. Герасимов С.И., Лысенков В.Е. // Труды IV Всероссийской научно-технической конференции “Фундаментальные основы баллистического проектирования — 2014” (Санкт-Петербург, 3–28 июля 2014 г.) — Библиотека журнала “Военмех. Вестник БГТУ” (Санкт-Петербург). 2015. № 29.
3. Зубанков А.В., Герасимов С.И. // ПТЭ. 2019. № 3. С. 38. <https://doi.org/10.1134/S0032816219030042>
4. Герасимов С.И., Вашурков А.С., Лень А.В. Патент на полезную модель 27739 РФ // Оpubл. 10.02.2003. Бюл. № 4.