

Теневая схема с селективным диапазоном фоторегистрации в аэродинамических испытаниях

С.И. Герасимов^{1,А,В,С,Д}, В.А. Кикеев^{2,А,Д}, В.А. Кузьмин^{3,А,В,С},
К.В. Тотышев^{4,С}, А.П. Фомкин^{5,С}, Р.В. Герасимова^{6,В}

^А Институт проблем машиностроения РАН – филиал Института прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

^В Саровский физико-технический институт НИЯУ МИФИ, Саров, Россия

^С Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, Россия

^Д Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева, Россия

¹ ORCID: 0000-0002-6850-0816, s.i.gerasimov@mail.ru

² ORCID: 0000-0002-2375-0803

³ ORCID: 0000-0002-7141-0408

⁴ ORCID: 0000-0002-6232-505X

⁵ ORCID: 0000-0002-7787-7121

⁶ ORCID: 0000-0002-2711-3975

Аннотация

Классическая прямотеневая схема регистрации обладает высоким разрешением и отсутствием искажений, связанных с использованием оптики. Принципиальный недостаток, не позволяющий использовать эту схему в полевых условиях – восприимчивость к фоновым излучениям, сопровождающим эксперимент. Между тем, ряд регистрируемых процессов, характеризуются относительно малыми размерами метаемых объектов, например, в задаче моделирования соударения космического «мусора» с заданными экранами или в задаче моделирования аварийного разлета фрагментов активного материала. Разрешения рентгеновских снимков оказывается недостаточным для визуализации таких частиц, а их гиперзвуковые скорости и соответствующая ионизация воздуха приводят к засветке открытой фотопленки в прямотеневой схеме. Дополнительными фоновыми засветками в таких опытах выступают излучение дульного выхлопа в случае использования для разгона баллистических ствольных установок или свечение продуктов взрыва в случае детонационных разгонных устройств. Возможности прямотеневой схемы можно расширить, проводя опыт в сумеречное время суток и защищаясь от фонового излучения, например, ракордом в качестве светофильтра большой площади. В работе описана теневая схема фоторегистрации, в состав которой входит точечный источник света и широкоформатная фотопленка с защитным светофильтром. Представлен результат применения данной схемы в аэродинамических испытаниях, сопровождающиеся интенсивной фоновой засветкой.

Ключевые слова: фоторегистрация, изопанхроматическая фотопленка, светофильтр, импульсный источник света.

Введение

При авариях изделий с взрывчатыми веществами (ВВ) возможна фрагментация деформируемых материалов (ДМ) с образованием как мелких частиц с размерами менее 100 мкм, так и более крупных частиц (осколков). В процессе разлета при взаимодействии высокоскоростных частиц с продуктами взрыва (ПВ) происходит их термохимическое

разрушение с образованием более мелких частиц – фрагментов, что вносит дополнительный вклад в спектр мелкодисперсных частиц. Экспериментальные данные по спектру дополнительно образующихся частиц при взаимодействии осколков ДМ с ПВ необходимы для определения их вклада в радиоактивное загрязнение местности, а также разработки технических решений по снижению радиационных последствий подобных аварий.

Эксперименты с образцами (моделями), содержащими ДМ, являются дорогостоящими и представляют экологическую опасность. В связи с этим для определения вклада высокоскоростных осколков ДМ в общий спектр распределения разработана методика исследования диспергирования ДМ при аварийных ситуациях, сопровождающихся взрывом, с использованием имитатора ДМ. Способ имитации свойств плутония с использованием материала-имитатора (металлического церия), сходного с ДМ по его поведению при воздействии гиперзвукового потока воздуха, и экологически безопасный (патент РФ № 2298850). Для решения задач по исследованию аэрозолей из имитаторов ДМ были созданы методики, позволяющие метать группу из твердых частиц размером от $1,4 \times 0,8 \times 0,9$ мм до $1,4 \times 0,8 \times 1,1$ мм, по форме близких к параллелепипеду, с гиперзвуковыми скоростями и осуществлять оптическую бесконтактную регистрацию этой группы и образующихся аэрозолей из твердых частиц этой группы в полете. Первоначальные экспериментальные исследования показали, что при полете частиц имитатора ДМ в атмосфере воздуха с начальной скоростью ~ 3000 м/с происходит термомеханическое разрушение частиц в твердом состоянии с образованием большого количества частиц вследствие их окисления при нагреве и торможении в набегающем высокоэнтальпийном потоке.

Для этой и подобных задач возникла необходимость разработки оптической бесконтактной регистрации этих частиц.

1. Теневая схема с селективным диапазоном фоторегистрации.

В практике оптической регистрации широко используются импульсные источники света с газоразрядными и ламповыми излучателями [1]. Основное достоинство этих источников света заключается в том, что они имеют высокую яркостную температуру и широкий диапазон излучения, который имеет свой максимум в ультрафиолете.

На сегодняшний день, несмотря на активный переход на цифровую технику, существуют задачи, в которых применяются фотоматериалы. Изопанхроматическая фотоэмульсия имеет цветочувствительность, наиболее полно перекрывающую видимый спектр излучения. При этом максимум чувствительности остается в области ультрафиолета (рис. 1).

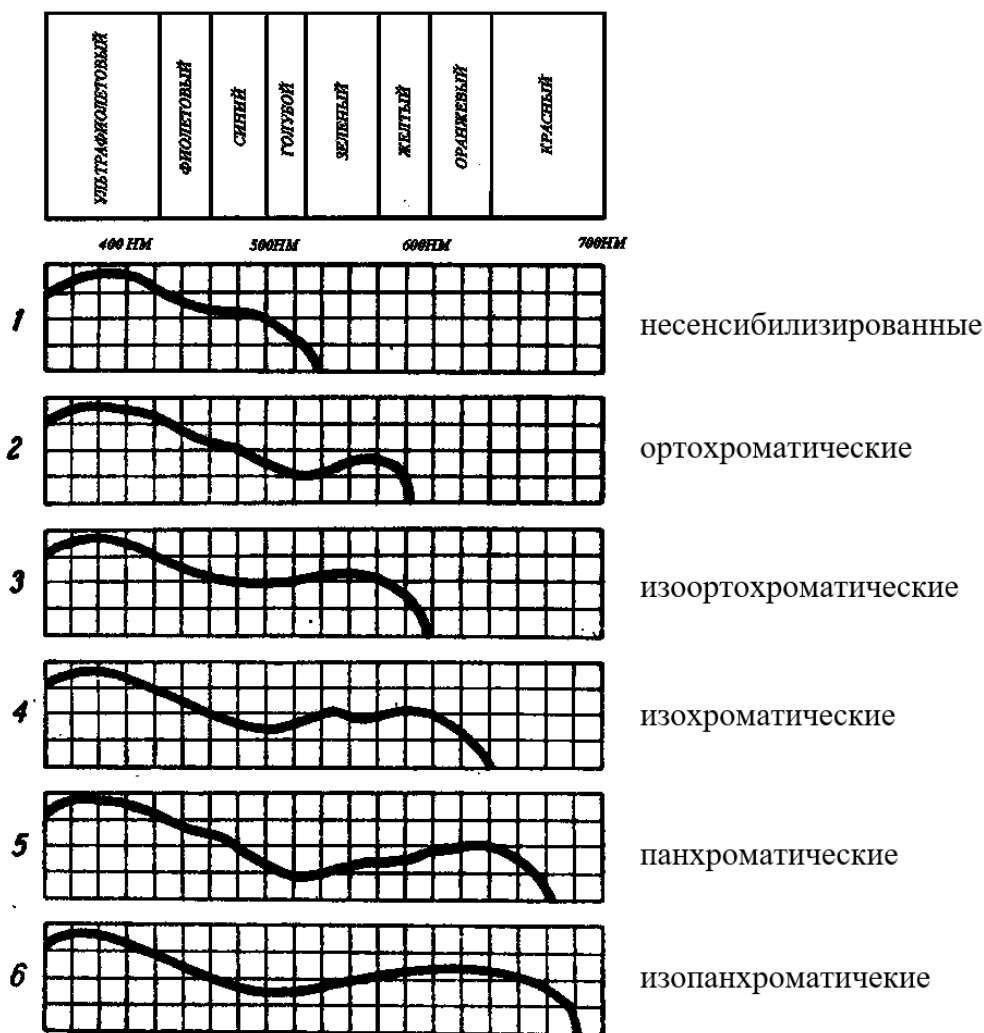


Рис. 1 – Кривые цветочувствительности различно сенсibilизированных фотоматериалов

Классическая схема построения теневого изображения представляет собой схему, где точечный источник излучения (размеры тела свечения много меньше расстояния до экрана) строит в расходящихся лучах теневую картину от объекта испытания (ОИ) на фоточувствительном материале (фотопленка, фотобумага или фотопластинка) [2-12]. При этом за счет зависимости показателя преломления от плотности меняется угол наклона и при прохождении оптических неоднородностей, что позволяет при сверхзвуковых скоростях визуализировать на фотоматериале, в частности, головную ударную волну и турбулентный след за ОИ. Главный недостаток фотоматериала заключается в том, что это приемник однократного использования. Однако из всех приемников изображения это до сих пор единственный, обладающий одновременно и большой чувствительностью, и большой разрешающей способностью. Применение классической теневой схемы в баллистическом эксперименте не всегда возможно вследствие сильных фоновых излучений, например, при интенсивном процессе гиперзвукового аэродинамического разрушения или при фоторегистрации на участке промежуточной баллистики траектории движения ОИ [13,14]. Улучшение основных и введение дополнительных элементов в схему фоторегистрации позволяет решать подобные задачи с использованием теневой метода. Основными элементами этой схемы являются источник света и экран (фотоматериал), совокупность их параметров определяет пространственное разрешение оптической схемы. Чувствительность схемы растет пропорционально расстоянию от источника до экрана. Теневая картина тем отчетливее, чем меньше источник света и чем ближе расположен объект регистрации к экрану [1]. По-

сколькx применение открытой фотопленки в редакции сформулированной задачи невозможно, для защиты негатива от интенсивной фоновой засветки на кассету с изопанхроматической фотопленкой устанавливается защитный светофильтр для отсечки фонового излучения в зелено-красном диапазоне (спектр фонового излучения продуктов горения и взрыва). Рассматривались стеклянный фильтр СС-8 и пленочный фильтр ракорд. Было замерено распределение спектральной чувствительности данных фильтров, которое представлено на рис. 2.

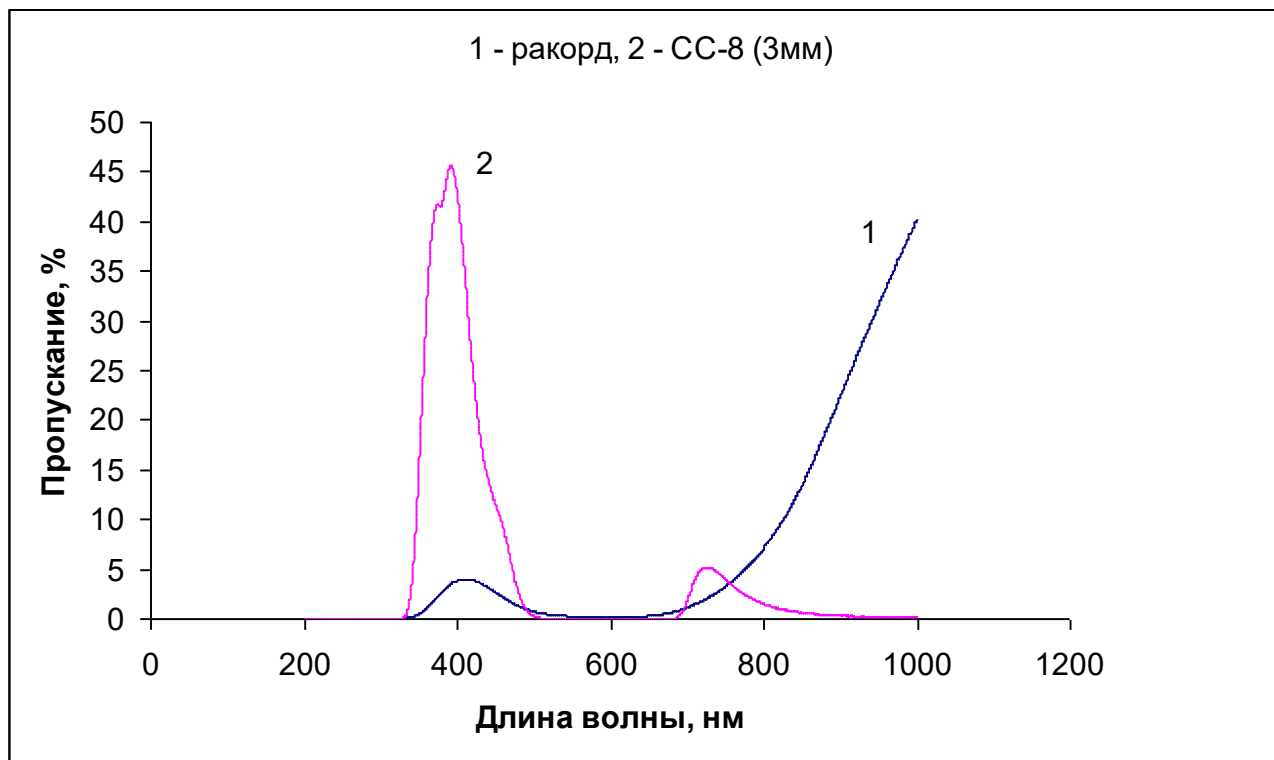


Рис. 2 – Диаграмма спектральной чувствительности двух светофильтров.

Оба светофильтра имеют схожие параметры, область за 700 нм и более для фотопленки не чувствительна, следовательно, не представляет интерес. С учетом того, что для газоразрядных источников света характерна яркостная температура от 10000 до 30000 К (ультрафиолетовая – фиолетовая область) применение обоих светофильтров является оптимальным. Наибольшую пропускающую способность в диапазоне 350 ÷ 500 нм имеет стеклянный фильтр СС-8, однако к полигонным условиям испытаний больше применим пленочный светофильтр ракорд. Таким образом, теневая схема (рис. 3) состоит из точечного газоразрядного источника 1 с излучателем ЭВИС [1] с размером диафрагмы 7 мм, расположенной напротив кассеты 2 с широкоформатной открытой изопанхроматической фотопленкой 3, закрытой светофильтром «ракорд» 5. Кроме того, под эту схему был спроектирован и изготовлен светонепроницаемый передвижной стенд теневой фоторегистрации 4 с входным и выходным окнами для сквозного движения объекта 6 в зоне регистрации.

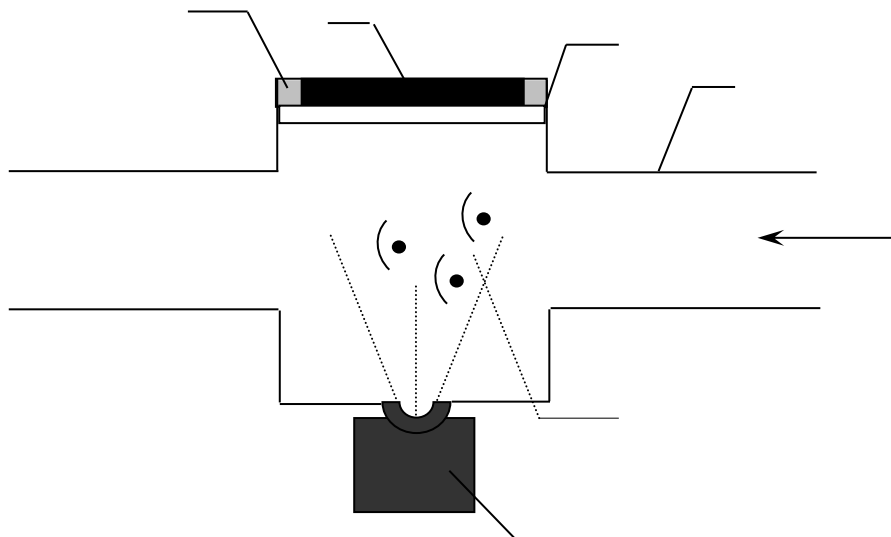


Рис. 3 – Схема теневой регистрации.

2. Постановка экспериментов

Для решения поставленных задач была разработана методика проведения испытаний, ориентированная на использование в качестве разгонного устройства 23-миллиметровой легкогазовой пушки (ЛГП), обеспечивающей возможность метания частицы с размером от $1,4 \times 0,8 \times 0,9$ мм до $1,4 \times 0,8 \times 1,1$ мм со скоростью 3 км/с. Так как частицы металла имеют разный размер и массу, то при выходе из канала ствола и испарении парафина (рис.4) частицы летят «облаком». Поэтому оптическая схема регистрации должна иметь достаточно большую зону регистрации (0,5 м) и высокое разрешение для визуализации самих частиц и газодинамической картины, сопровождающей сверхзвуковое движение.

Основная трудность фоторегистрации теньевым методом заключалась в том, что требовалось проводить оптическую диагностику состояния метаемого объекта в 3 м от среза ствола ЛГП. Дело в том, что после выхода из канала ствола метаемого объекта его дальнейший свободный полет происходит совместно с продуктами баллистического выстрела (воздушно - гелиевая смесь температурой порядка 2000 К), из-за малой массы частиц (0,5 мг до 20 мг).

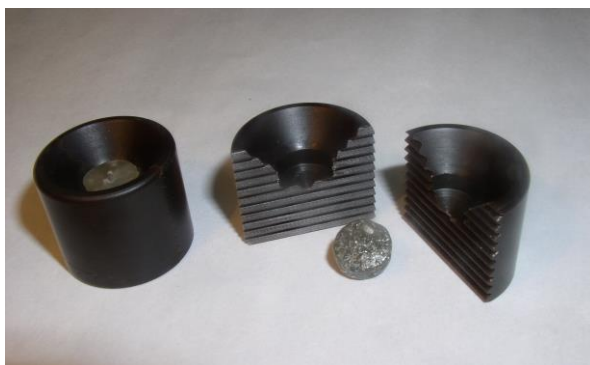


Рис. 4 – Парафиновая таблетка с частицами металла и ведущий поддон, в собранном состоянии и поэлементно.

Схема размещения оборудования на рабочем поле вместе с ЛГП в опыте приведена на рис. 5.

Моментом запуска источника света является пробитие пленочного контактного датчика, устанавливаемого на выходе из стенда, твердыми частицами, имеющими наименьший баллистический коэффициент и, как следствие, летящими вперед.

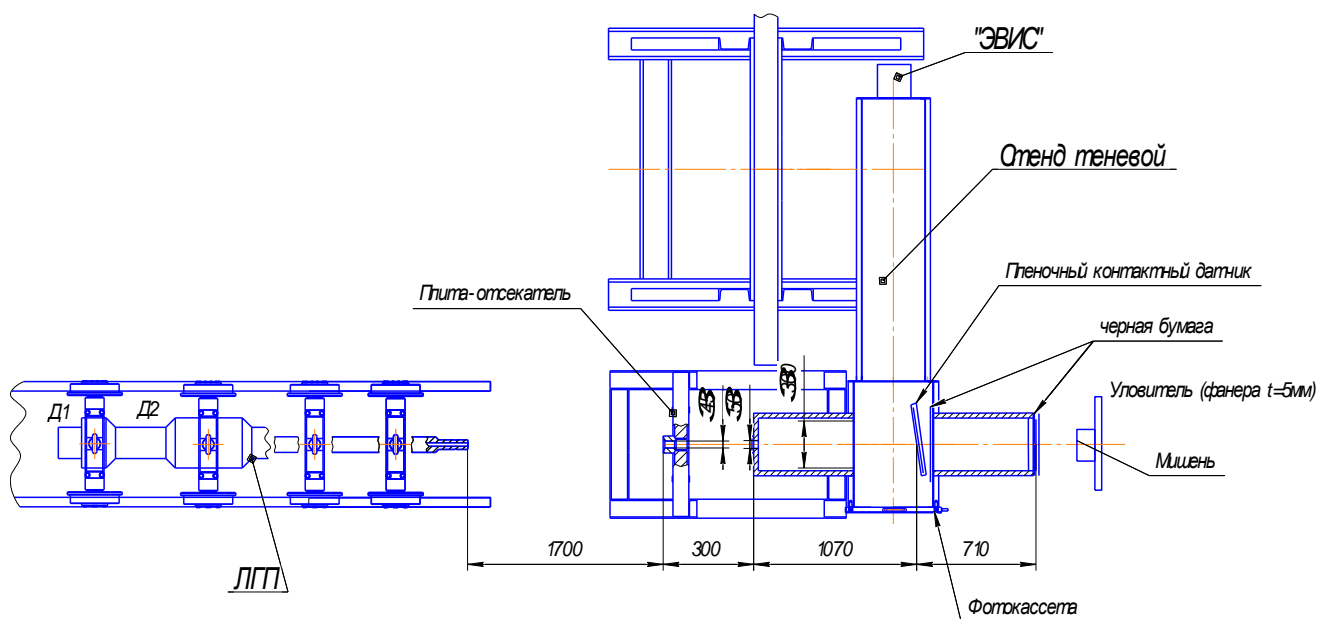


Рис. 5 – Схема размещения оборудования.

В результате проведения зачетных опытов были получены теневые спектры обтекания твердых частиц металла, пример которых представлен на рис 6.

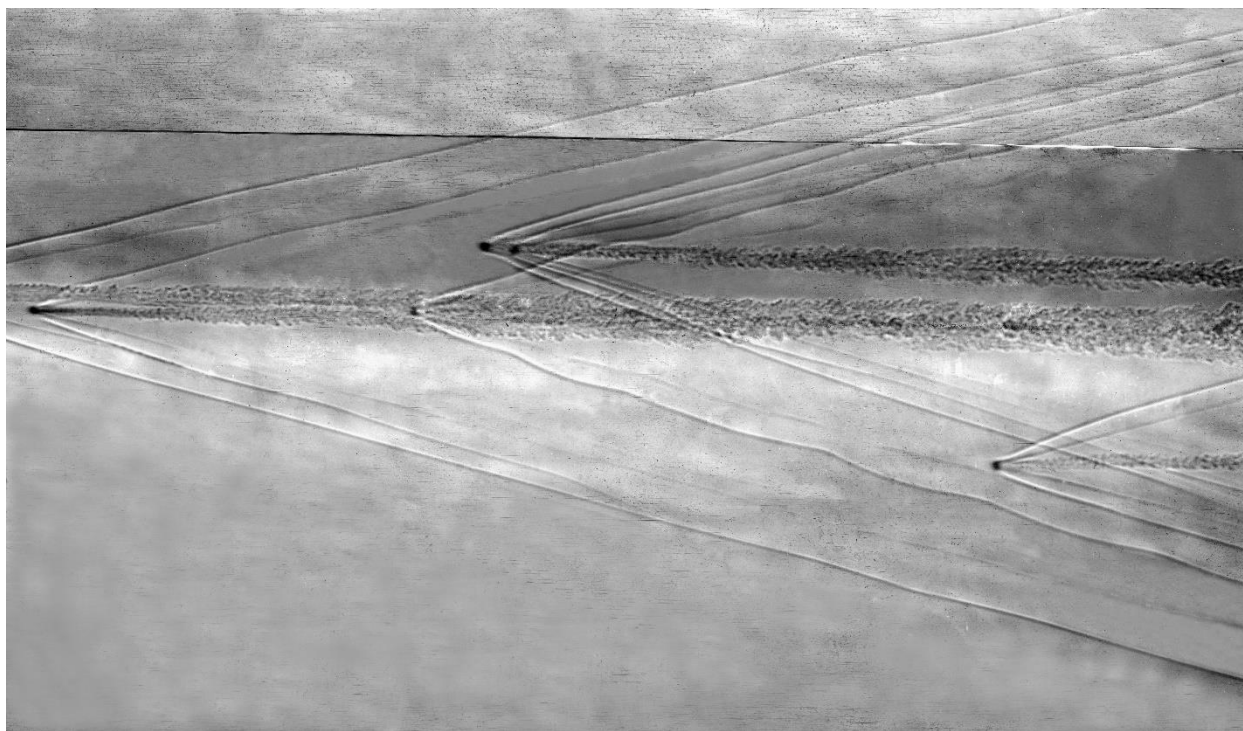


Рис. 6 – Теневой спектр обтекания частиц металла.

3. Анализ полученных результатов

Из анализа негативов были оценены числа Маха, падение числа Маха зарегистрированных частиц на участке траектории от среза ствола ЛГП до центра зоны регистрации в теновом стенде. Определены диапазоны изменения температур в точке торможения, по результатам теневой регистрации, в процессе их полета на этом же участке траектории.

Теневые спектры обтекания, полученные в ходе экспериментов, являются превосходным материалом для верификации методик численного моделирования процессов высокоскоростного движения частиц металла в газе. В частности, есть возможность исследовать обтекание группы частиц различного диаметра при воздействии сверхзвукового потока воздуха. Произведено численное моделирование процесса обтекания твердых частиц материала с помощью системы SolidWorks Flow Simulation [15]. Трехмерный расчет процесса внешнего обтекания сверхзвуковым потоком сжимаемого газа проводился с учетом соответствующих граничных условий, на входе в расчетные домены задавались граничные условия по скорости, условие прилипания потока – на поверхности частиц. Решались полные, осредненные по Рейнольдсу, уравнения Навье-Стокса, дополненные двухпараметрической моделью турбулентности $k-\varepsilon$.

Рассматривались несколько расчетных случаев, соответствующих полету тел примерно одного размера и существенно отличающихся по диаметру частиц.

Конечно-объемная сетка состояла из гексагональных элементов, ориентированных с учетом направления движения потока газа при входе в расчетный домен. В зонах наибольших градиентов параметров газа производилась адаптация сетки путем измельчения расчетных ячеек. Итоговое количество ячеек для случая обтекания частиц разных диаметров составляло порядка 3,3 миллионов ячеек, для обтекания частиц одинаковых размеров – 5,7 миллионов ячеек. Общий вид конечно-объемной сетки показан на рис. 7.

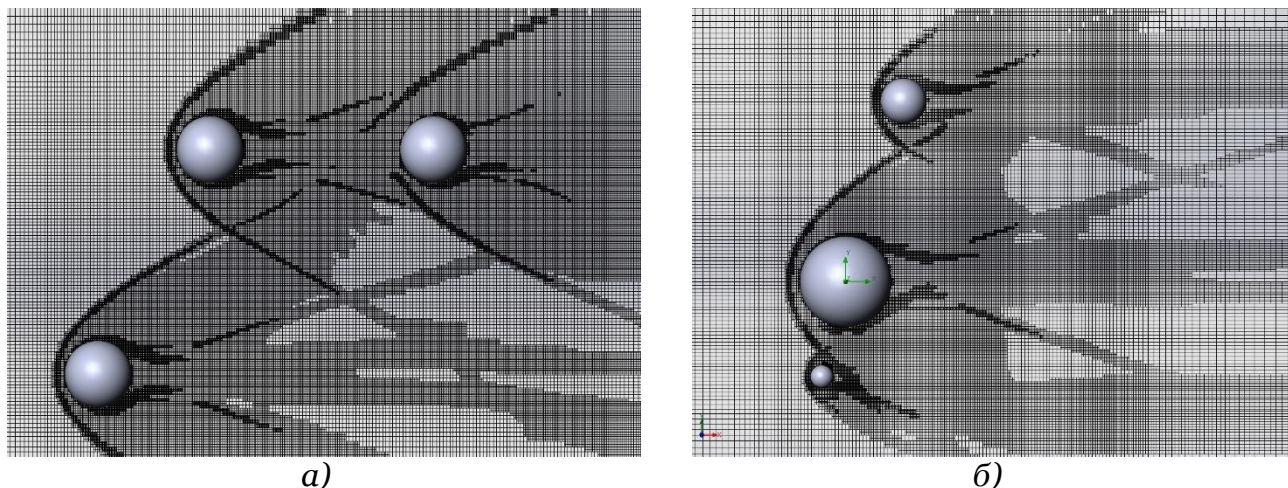


Рис. 7 – Общий вид адаптированной конечно-объемной сетки при моделировании обтекания частиц, схожих по размеру (а) и отличающихся по диаметру (б)

На рис. 8, 9 показаны картины распределения полей скоростей и давлений для группы частиц разных и одинаковых размеров, находящихся в сверхзвуковом потоке газа. В целом картина обтекания соответствует зафиксированному в экспериментах данным.

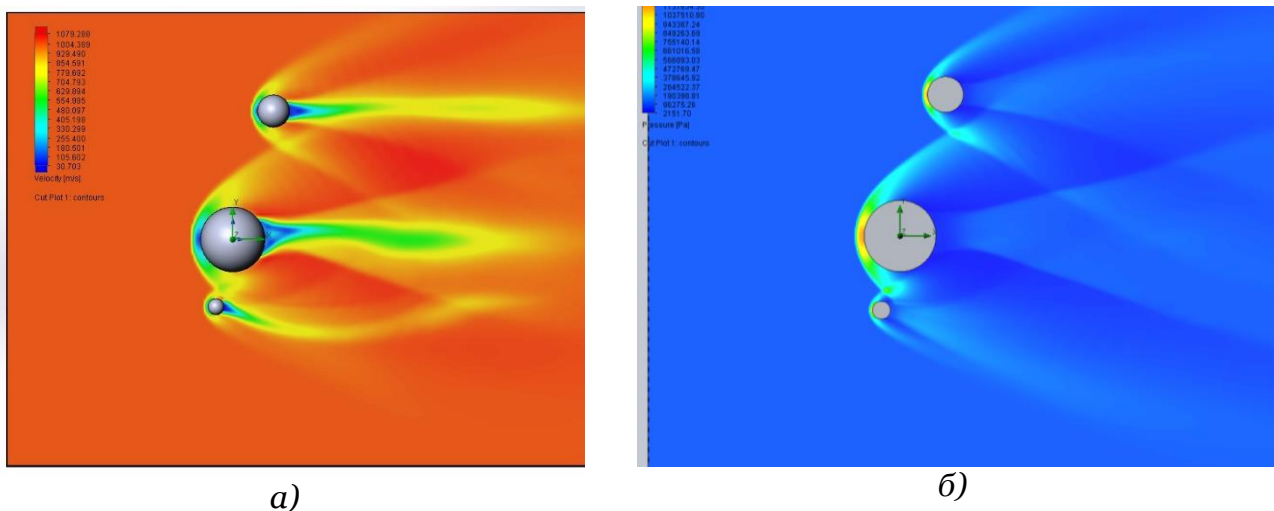


Рис. 8 – Распределение полей скоростей (а) и давлений (б) в газе при обтекании группы частиц разных размеров

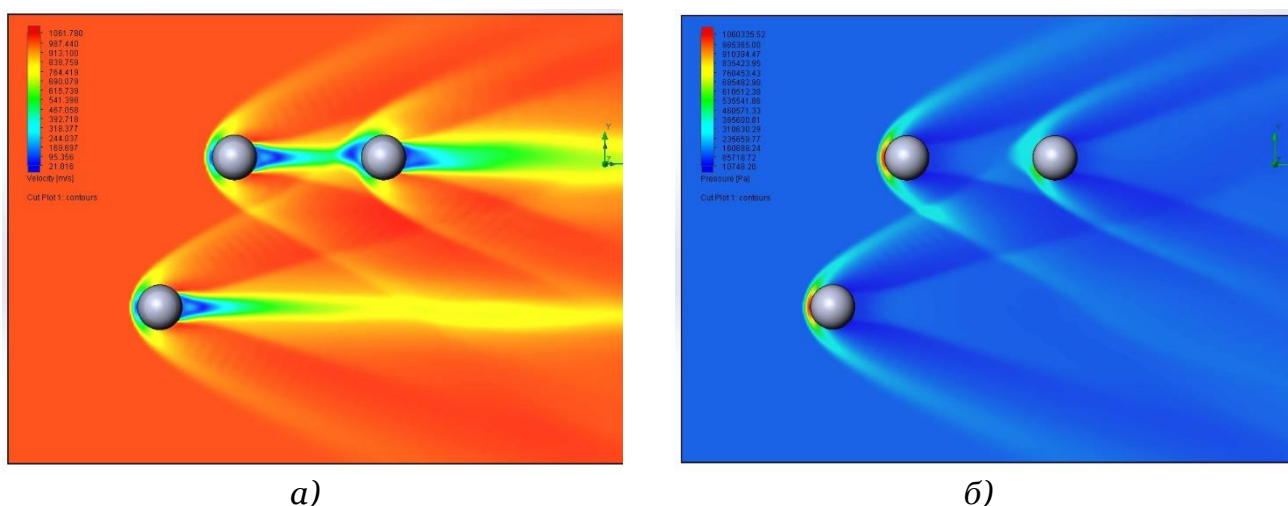


Рис. 9 – Распределение полей скоростей (а) и давлений (б) в газе при обтекании группы частиц одинаковых размеров

По опытным данным был сделан вывод, что полёт частиц металла в атмосфере воздуха с начальной скоростью ~ 3000 м/с на дистанции $\sim 2,9$ м от среза ствола происходит их интенсивное разрушение, плавление и испарение.

Заключение

Разработана теневая схема с селективным диапазоном фоторегистрации. С использованием этой схемы были получены теневые спектры частиц, моделирующих разлет фрагментов ДМ в случае аварии.

Анализ теневых спектров обтекания частиц позволил определить некоторые количественные характеристики:

- получены оценки величины чисел Маха, выполненные по величине угла наклона ударных волн от частиц, находящихся вне зоны рисунка, и для двух частиц, находящихся в зоне рисунка, которые составили $M_1 \approx 4$, $M_2 \approx 2,9$ и $M_3 \approx 1,5$;
- на основании того, что определены скорости зарегистрированных частиц $V_i = M_i \times a$, где $a = 340$ м/с - скорость звука в воздухе, а расчетная величина начального числа Маха составляет $M_{\text{лпг}} \approx 8,8$, можно оценить массо-геометрические характеристики частиц, ударные волны от которых видны на теневом спектре;

- оценены размеры частиц, находящихся в поле фотографии ($R_1 \approx 0,30$ мм, - частицы, летящие впереди и находящиеся вне поля фотографии; $R_2 \approx 0,17$ мм- частица, летящая впереди и находящаяся в поле фотографии; $R_3 \approx 0,11$ мм - частица, летящая сзади и находящаяся в поле фотографии). Проведено численное моделирование процесса.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 17-08-01096, 18-38-00297.

Литература

1. Герасимов С.И., Файков Ю.И., Холин С.А. Кумулятивные источники света. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2002 г. 143 с.
2. Аbruков С.А. Теневые и интерференционные методы исследования оптических неоднородностей. Казань: Изд-во КГУ, 1962. 81с.
3. Холдер Д., Норт Р. Теневые методы в аэродинамике. М.:Мир, 1966.179с.
4. Клемекс П., Кингерн М. Разработка техники измерений для гиперзвуковых баллистических установок// Техника гиперзвуковых исследований.М.-Л.: Машиностроение, 1964. С.124-198
5. Merkirch W. Flow Vizualization. New York, London: Academic Press, 1974. 250p.
6. Васильев Л.А. Теневые методы. М.:Наука, 1968. 400с
7. Герасимов С.И., Кикеев В.А., Львова Е.А., Тотышев К.В., Герасимова Р.В. Спектры обтекания тел, движущихся со сверхзвуковой скоростью в аэродинамических исследованиях. Вестник НИЯУ МИФИ, 2016, том 5, №4, с.289-293.
8. G. Settles [Historical Background](#) - Schlieren and shadowgraph techniques, 2001
9. G. Settles [Schlieren and shadowgraph techniques- Visualizing phenomena in transparent media\(Book\)](#) - Berlin, Germany: Springer-Verlag GmbH, 2001.
10. Дубнищев Ю.Н., Арбузов В.А., Белоусов П.П. и др. Оптические методы исследования потоков. Новосибирск: Изд-во Сибир. Ун-та, 2003. 410с.
11. Белозеров А.Ф. Оптические методы визуализации газовых потоков. Изд-во Казан. Гос. Техн. Ун-та, 2007. 747с.
12. Емельянов В.Н., Тетерина И.В., Волков К.Н. и др. Визуализация данных физического и математического моделирования в газовой динамике. Из-во физматлит, 2018, 360с.
13. Герасимов С.И., В.И. Ерофеев, И.И. Каныгин, А.В. Сальников Р. В. Герасимова Визуализация дульного выхлопа при выстреле из легкогазовой пушки. Научная визуализация. Т.6, №2, 2014.
14. Герасимов С.И., В.И. Ерофеев, В.А. Кикеев, А.П. Фомкин. Различные механизмы разрушения тел в гиперзвуковом потоке, выявленных с помощью рентгенографической регистрации Научная визуализация. Т.7, №1, 2015, сс.38-44.
15. <https://www.solidworks.com/product/solidworks-flow-simulation>.

Shadow scheme with selective range of photoregistration in aerodynamic tests

S.I. Gerasimov^{1,A,B,C,D}, V.A. Kikeev^{2,A,D}, V.A. Kuzmin^{3,A,B,C},
K.V. Totyshev^{4,C}, A.P. Fomkin^{5,C}, R.V. Gerasimova^{6,B}

^A Institute of Problems of Mechanical Engineering, Nizhny Novgorod, Russia

^B Sarov Physics and Technical Institute of NRNU «MEPHI», Russia,
Nizhny Novgorod region

^C Russian Federal Nuclear Center – All-Russia Research Institute of Experimental Physics,
Russia, Sarov, Nizhny Novgorod region

^D Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Russia

¹ ORCID: 0000-0002-6850-0816, s.i.gerasimov@mail.ru

² ORCID: 0000-0002-2375-0803

³ ORCID: 0000-0002-7141-0408

⁴ ORCID: 0000-0002-6232-505X

⁵ ORCID: 0000-0002-7787-7121

⁶ ORCID: 0000-0002-2711-3975

Abstract

The classical straight-cut registration scheme has a high resolution and the absence of distortions associated with the use of optics. The principal drawback that does not allow the use of this scheme in the field – susceptibility to background radiation accompanying the experiment. Number of recorded processes are characterized by relatively small size of the objects being thrown, for example, in the problem of modeling the impact of space "debris" with given screens or in the problem of modeling the emergency expansion of fragments of the active material. Resolution of x-rays is insufficient to render such particles, and their hypersonic speed and the corresponding ionization of the air result in the exposure of photographic film in an open straight-cut scheme. Additional background highlights in such experiments are the emission of muzzle exhaust in the case of use for dispersal of ballistic barrel systems or the glow of the explosion products in the case of detonation accelerating devices. Meanwhile, opportunities of straight-cut scheme can be expanded by spending experience in the twilight time of the day and protected from background radiation, for example, by raccord as a filter of large area. The paper describes a shadow scheme of photo registration, which includes a point light source and a wide-format film with a protective filter. The result of application of this scheme in aerodynamic tests accompanied by intense background illumination is presented.

Keywords: photographic, isopanchromatic film, filter, pulse light source.

References

1. Gerasimov S. I., Faykov I., Kholin S. A., Cumulative light sources. Sarov: RFNC-VNIIEF, 2002, 143 p.
2. Abrukov S. A. Shadow and interference methods of investigation of optical inhomogeneities. Kazan: KSU publishing House, 1962. 81s.
3. Holder D., North R. Shadow methods in aerodynamics. M.:Mir, S. 1966.179
4. Clamex P., Kinghorn M. Development of measurement techniques for hypersonic ballistic units// Technique hypersonic research.M.-L.: Mechanical Engineering, 1964. P. 124-198
5. Merkirch W. Flow Visualization. New York, London: Academic Press, 1974. 250p.

6. Vasiliev L. A. Shadow methods. M.: Science, 1968. 400s
7. Gerasimov S. I., Chikeev V. A., Lvova E. A., Tatashev K. V., Gerasimov V. R. Spectra of the flow of bodies moving with supersonic speed aerodynamic research. Bulletin of the national research nuclear University MPhI, 2016, vol. 5, No. 4, pp. 289-293.
8. G. Settles Historical Background-Schlieren and shadowgraph techniques, 2001
9. G. Settles Schlieren and shadowgraph techniques - Visualizing phenomena in transparent media(Book) - Berlin, Germany: Springer-Verlag GmbH, 2001.
10. Dubnischchev, Arbuzov V. A., Belousov p. P. and others. Optical methods of research of streams. Novosibirsk: publishing house of Sibir. UN-TA, 2003. 410s.
11. Belozerov Optical methods of visualization of gas flows. Kazan publishing house. State. Tech. UN-TA, 2007. 747s.
12. Emelyanov V. N., Teterina I. V., Volkov K. N. Visualization of data of physical and mathematical modeling in gas dynamics. [In] 2018, 360s.
13. Gerasimov S. I., V. I. Erofeev, I. I. Kanygin, A. V. Salnikov, R. V. Gerasimov Visualization of muzzle exhaust at a shot from a light-gas gun. Scientific visualization. Vol. 6, №2, 2014.
14. Gerasimov S.I., Erofeev V.I., Kikeev V.A., Fomkin A.P. Various mechanisms of destruction of bodies in hypersonic flow, identified by radiographic registration. Scientific visualization, vol. 7, No. 1, 2015, pp38-44.
15. <https://www.solidworks.com/product/solidworks-flow-simulation> .