

Исследование характера отражения в модельных опытах прямотеневым методом визуализации

С.И. Герасимов^{1,A,B,C,D}, А.В. Зубанков^{2,A,B}, В.А. Кикеев^{3,C,D},
И.Ю. Смирнов^{4,A}, Н.А. Трепалов^{5,A}, Р.В. Герасимова^{6,B}

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

^B Саровский физико-технический институт - филиал НИЯУ МИФИ, Саров, Россия

^C Институт проблем машиностроения РАН, Нижний Новгород, Россия

^D Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева, Нижний. Новгород, Россия

¹ ORCID: 0000-0003-2859-6275, s.i.gerasimov@mail.ru

² ORCID: 0000-0002-0515-2092

³ ORCID: 0000-0002-2375-0803

⁴ ORCID: 0000-0002-5419-5312

⁵ ORCID: 0000-0002-5131-1736

⁶ ORCID: 0000-0002-2711-3975

Аннотация

Основной характерной чертой прямотеневого метода является отсутствие оптических компонентов между изучаемым объектом и плоскостью регистрации. Объект освещается расходящимся (наиболее часто гомоцентрическим) или параллельным пучком. Распределение освещенности в получаемой картине связано с изменением второй производной в плотности газа по направлению перпендикулярному лучу. Большая часть информации в экспериментальной аэродинамике сжимаемого газа получается с использованием этой простейшей схемы. Применяя теневой метод, следует учитывать, что распределение освещенности в плоскости съемки зависит от расстояния между этой плоскостью и объектом изучения. Сильная рефракция световых лучей, проходящих через объект, может существенно исказить геометрические пропорции объекта, и чем больше расстояние от объекта до экрана, тем больше искажение. Искажение уменьшает точность измерения геометрических координат, особенно угловых. В данной работе теневой метод применялся для исследования регулярного отражения ударной волны от плоской и круглой преград. Получены экспериментальные данные по углу отражения головной ударной волны.

Ключевые слова: Визуализация сверхзвукового течения, теневой метод, регулярное и Маховское отражение, падающая и отраженная ударные волны

1. Введение

Теневые методы обнаружения оптических неоднородностей в прозрачных преломляющих средах широко применяются для исследования распределения плотности воздушных потоков, образующихся при обтекании моделей [1-5]. Использование теневой регистрации в аэробаллистическом эксперименте позволяет исследовать такие аэродинамические процессы, как развитие турбу-

лентности в пограничном слое, образование местных зон отрыва, течений в донной области, взаимодействие ударных волн и другие [6-10]. Развитие теневых методов с использованием компьютерной обработки характеризует магистральную линию современных цифровых технологий с применением высокоскоростной видеорегистрации. [11-14]. Однако, основное достоинство BOS методов – получение в одном опыте серии

теневого картин не компенсирует основное преимущество метода светящейся точки – высочайшее качество снимка за счет отсутствия оптики и достоинств галогенидов серебра, позволяющих получать теневую картину на пленке формата А3 и выше с пространственным разрешением до 600 мм⁻¹ и выше. Там где пленка предоставляет возможность визуализировать мельчайшие детали, например скачки уплотнения при практически акустических параметрах, BOS

методы не позволяют визуализировать слабые ударные волны с амплитудой меньше 0,1 атм. Для сравнения приведем теневые спектры пули, выпущенной из СВД (дульная скорость более 800 м/с) на одинаковом расстоянии от среза ствола, полученные аналоговым методом светящейся точки (рис.1а) и современным цифровым BOS методом с использованием камеры FastCam с разрешением 2Мпк (рис.1б).

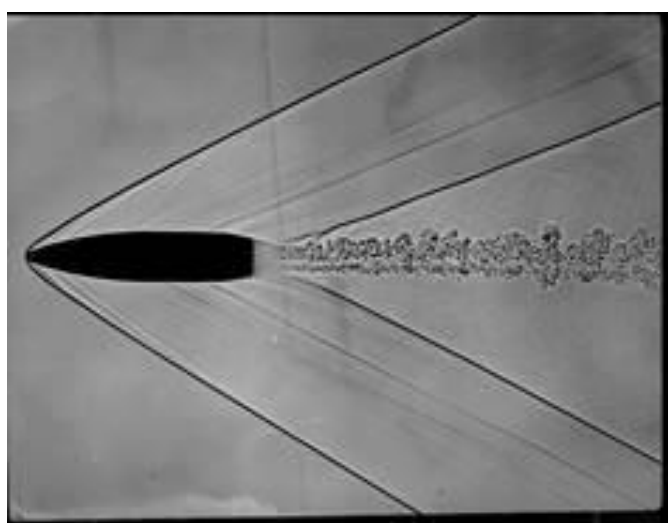


Рис.1а

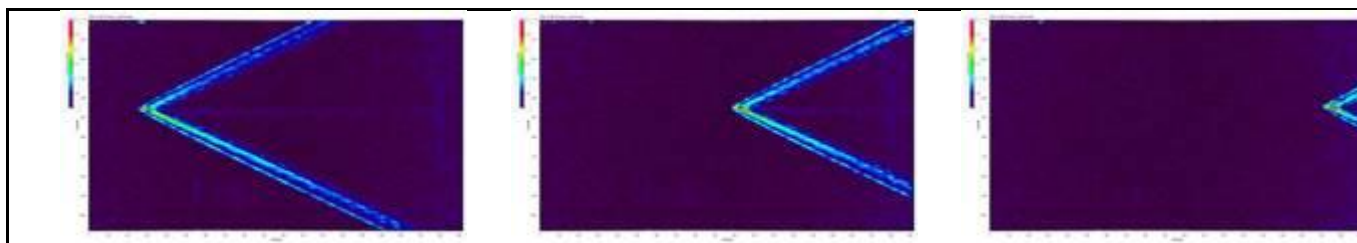


Рис.1б

Очевидно, что для анализа картины течения классический теневой способ является более предпочтительным. Именно такое качество требуется в настоящее время и для верификации численных методик визуализации.

На рис.2 в качестве примера приведены расчетно-экспериментальные результаты спектров обтекания конической модели и рассчитанного поля плотностей.

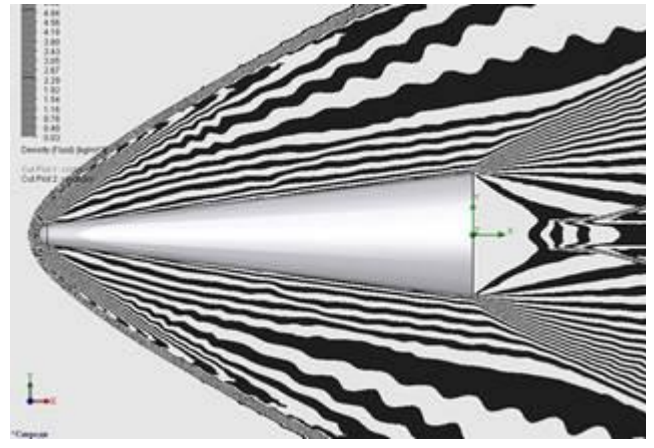
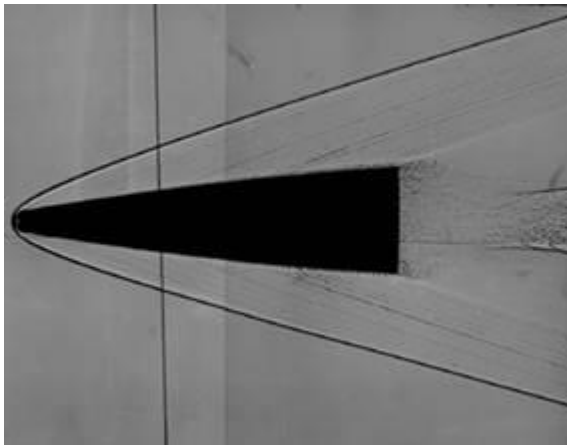


Рисунок 2 – Теневой спектр обтекания (слева) и расчетное поле плотностей (справа), рассчитанное для конуса при скорости обтекания, равной $M = 3,25$

Стенд теневого фотографирования, используемый в аэробаллистических экспериментах, предусматривает получение качественных теневых спектров обтекания моделей при аэродинамических испытаниях в аэробаллистическом тире [6]. Он используется для исследования картины обтекания моделей и физических явлений уноса материалов с поверхности моделей на гиперзвуковых режимах полета, а также для исследования различных газодинамических явлений. По изображению на теневом спектре проводятся измерения характерных линий и границ различных зон (ударные волны, линии слабых Маховских возмущений, границы зон разряжения, пограничных слоев, зон турбулентных образований, срывных зон, спутных следов и т. д.).

Стенд теневого фотографирования отвечает следующим требованиям:

1. является передвижным и имеет возможность установки как в любой точке траектории моделей внутри тира, так и на открытых трассах (участок между стволом баллистической установки и входным окном тира);
2. имеет возможность регулирования положения зоны регистрации по координатам Y и Z в диапазоне ± 1 м относительно оси трассы;
3. запуск источников света осуществляется от бесконтактных датчиков;
4. момент экспонирования фиксируется хронографической системой аэробаллистического тира;

5. размер зоны регистрации $800 \times 600 \times 600$ мм;
6. длина и калибр испытываемых моделей составляют 8 – 500 мм и 8 – 140 мм, соответственно;
7. диапазон скоростей полета моделей $V = 200$ м/сек - 3000 м/сек;
8. на теневом изображении должны быть видны конфигурации головной ударной волны и слабых ударных волн (волны Маха), зона образования пограничного слоя и его структура, структура донного следа и другие тонкие эффекты, возникающие при обтекании летящего объекта (качество приемлемых рабочих снимков, получаемых в опыте, иллюстрируется рисунками 3 и 4);
9. предусмотрена возможность измерения по изображению на теневом спектре координат характерных линий и границ различных зон с дискретностью (по X_i, Y_i) не более 1 мм и погрешностью не более $\Delta X_i = \Delta Y_i = 0,02$ мм в связанной с моделью системе координат (или в системе координат, связанной с местной вертикалью) и углов наклона линий Маха к поверхности моделей с точностью $\pm 0,2^\circ$. Объем проводимой обработки теневого снимка в конкретном опыте определяется совместным решением "оптика и аэробаллистика", исходя из задач испытаний.

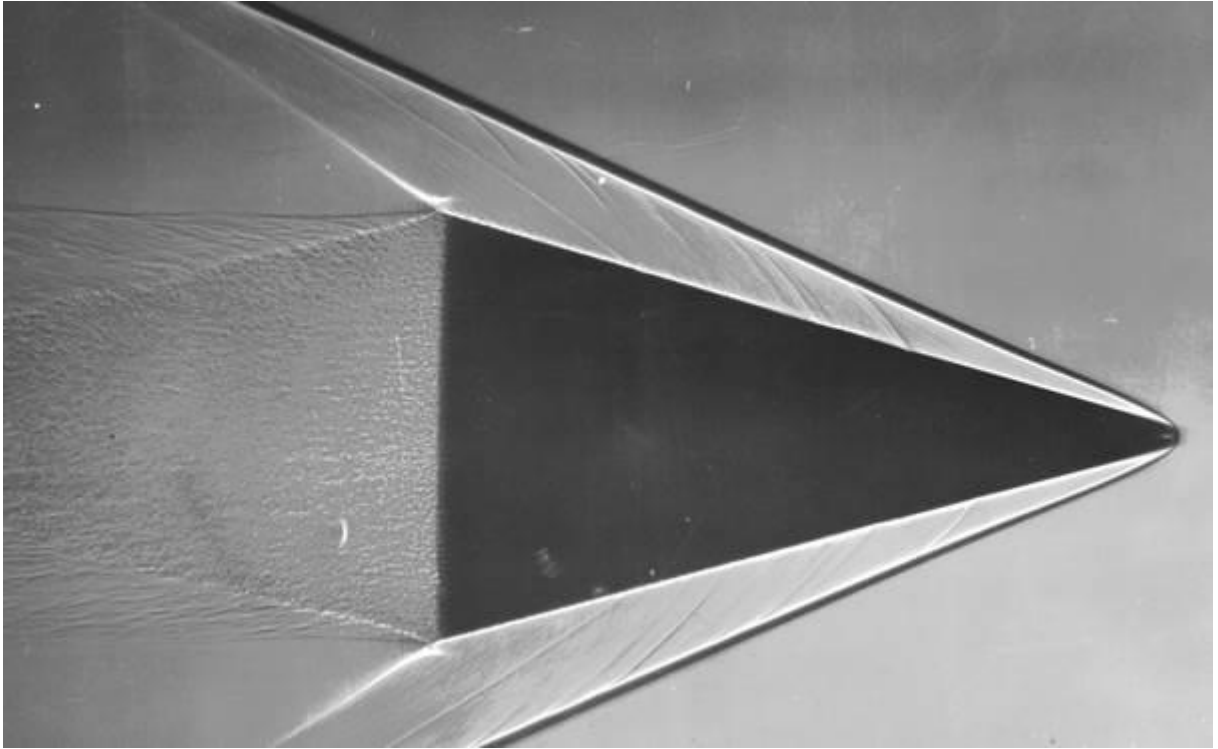


Рисунок 3 - Теневой спектр обтекания модели конуса

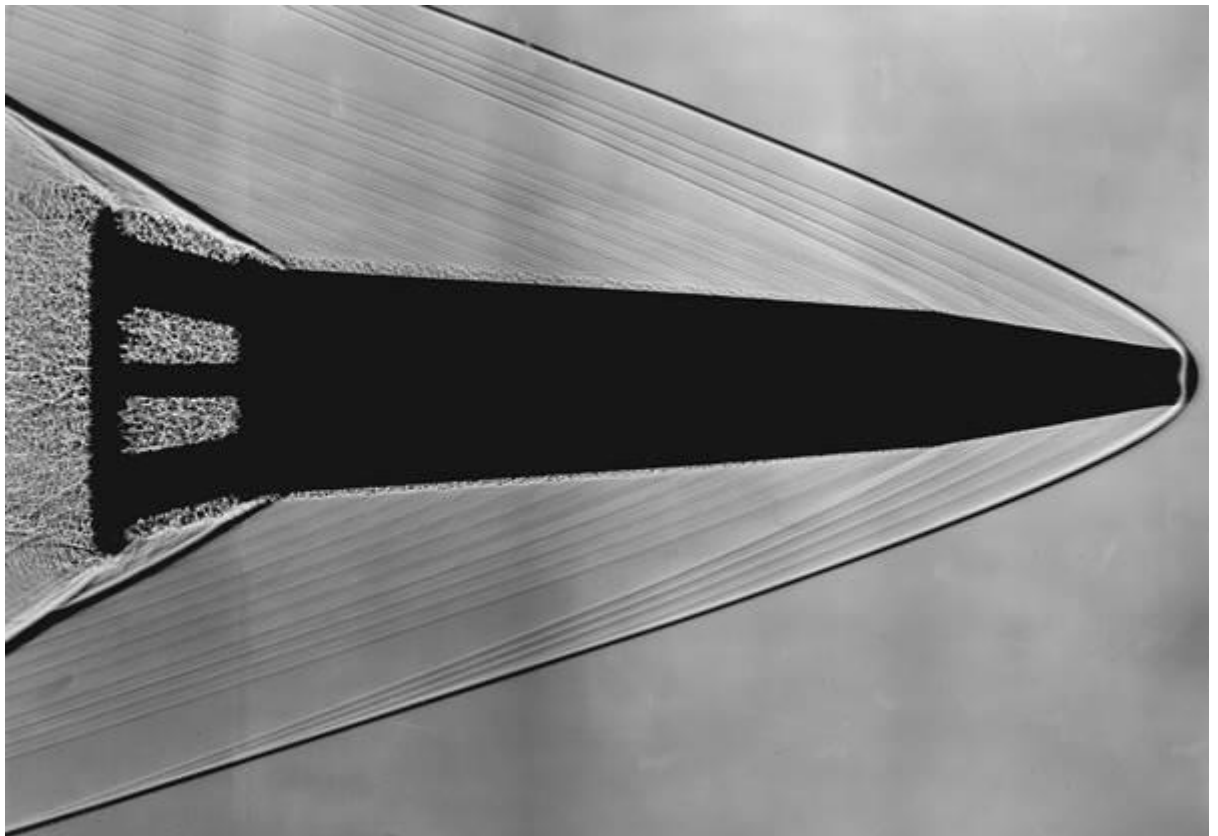


Рисунок 4 - Теневой спектр обтекания модели с тормозным устройством

Ниже приведены данные об опыте постановки в аэробаллистическом тире (АБТ) [6] экспериментальных исследований отражения ударных волн от преграды.

2. Методика аэробаллистических испытаний, основанная на визуализации спектров обтекания моделей.

Аэробаллистические испытания осуществляются методом отстрела моделей, установленных в специальном разделяющемся поддоне, из пороховых или легкогазовых баллистических установок (БУ) в неподвижную газовую среду измерительного участка испытательной трассы АБТ [6].

После выхода из ствола БУ части поддона разделяются и улавливаются отсекателем, а модель пролетает на измерительный участок. При пролете моделью измерительного участка осуществляется фотографирование теневого спектра обтекания модели в стенде

теневого фотографирования (СТФ). В серии опытов, проведенных в АБТ, в СТФ устанавливалась преграда, и фотографирование теневого спектра обтекания осуществлялось в момент синхронного с пролетом модели над преградой срабатывания импульсных источников света (ИИС) – см. рисунок 5. Синхронизирующие команды на срабатывание ИИС вырабатываются с помощью автоматической системы управления аппаратурой оптического измерительного комплекса, запускаемой от сигналов базозадающего устройства (БЗУ), соответствующих пролету моделью базового участка трассы. Точность высоты пролета модели над преградой (h) составляет ± 20 мм от требуемой.

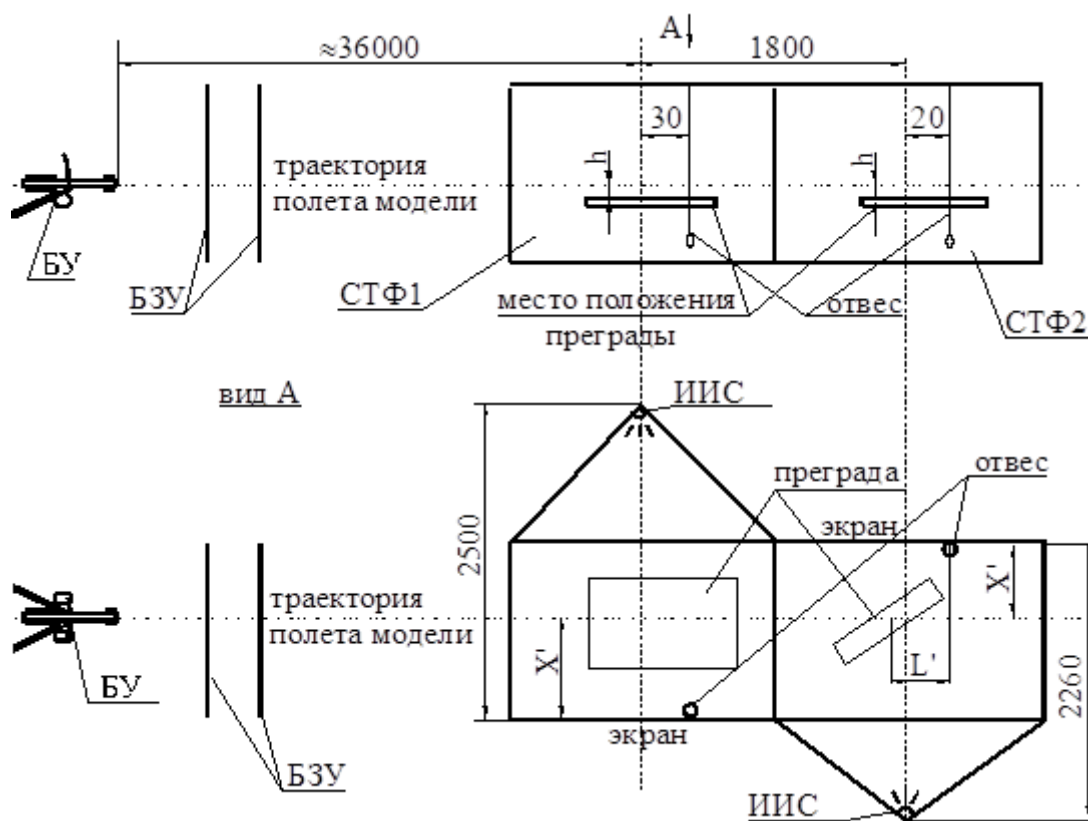


Рисунок 5 – Схема теневого стенда.

В качестве объекта испытаний использовалась модель цилиндроконической формы со сферически затупленным наконечником и иглой на нем, а преграды – плоскость и цилиндр, расположенный вдоль, поперек и под углом к траектории полета модели.

Схема получения теневого спектра обтекания моделей и проведенных на теновом спектре измерений приведены на рисунках 6 и 7.

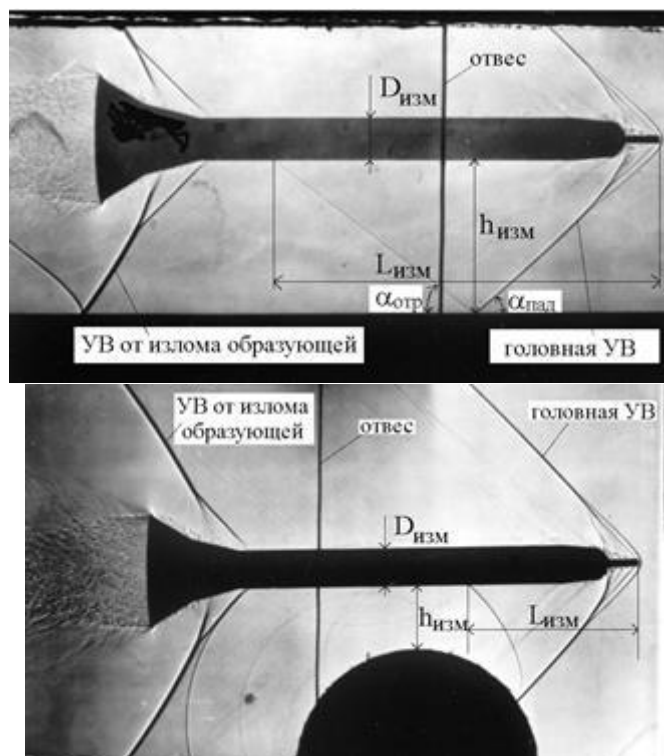


Рисунок 6 – Проведение измерений на теновом спектре обтекания моделей.

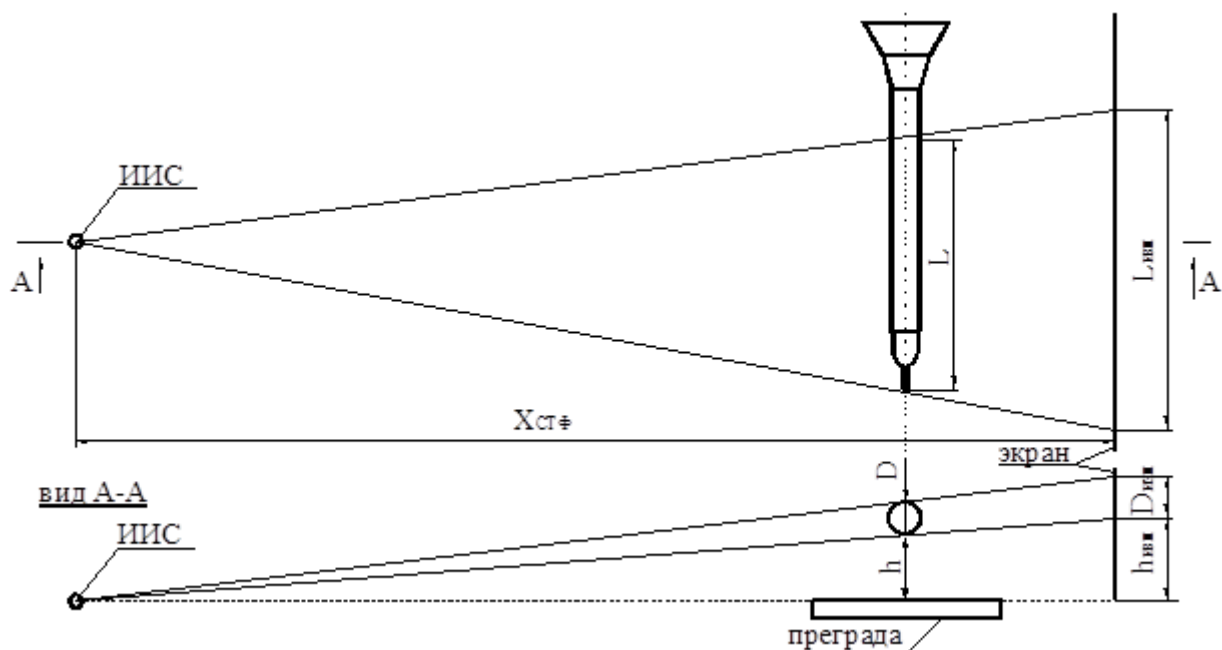


Рисунок 7 – Схема получения теновых спектров обтекания моделей.

3. Результаты аэробаллистических испытаний

Полученные в результате испытаний теновые спектры обтекания моделей приведены на рисунках 8-15. На них видны головная ударная волна (УВ), ударная волна от излома образующей и отраженные от преграды волны. При

этом отраженная головная ударная волна падает на поверхность ОИ, меняя структуру течения на ней.

Результаты измерений, проведенных на теновых спектрах обтекания, представлены в таблице 1.

Таблица 1

№ опыта	вид преграды	V, м/с	M, 1	α, град	X, мм	h, мм	L, мм	Головная УВ		УВ от излома	
								α _{па} , град	α _{от} , град	α _{па} , град	α _{отр} , град
1, СТФ1	плоскость	584	1.72	1.5	530	99.2	240.8	39	38	49	59
2, СТФ1	плоскость	572	1.68	3.0	580	68.6	152.8	41	41	-	-
3, СТФ1	плоскость	537	1.58	0	590	87.0	180.9	43	44	55	88
3, СТФ2	Стержень диаметром 100 мм вдоль траектории полета	537	1.58	0.5	630	73.8	156.6	44	44	59	89
4, СТФ1	Стержень диаметром 100 мм поперек траектории полета	581	1.71	1.1	590	85.5	217.1	-	-	-	-
4, СТФ2	Стержень диаметром 50 мм вдоль траектории полета	581	1.71	0.9	630	71.0	175.2	40	39	53	87
5, СТФ1	Стержень диаметром 100 мм поперек траектории полета	536	1.58	1.0	580	33.5	90.0	-	-	-	-
5, СТФ2	Стержень диаметром 100 мм под углом 45° к траектории полета	536	1.58	0.6	630	33.8	73.1	48	-	-	-

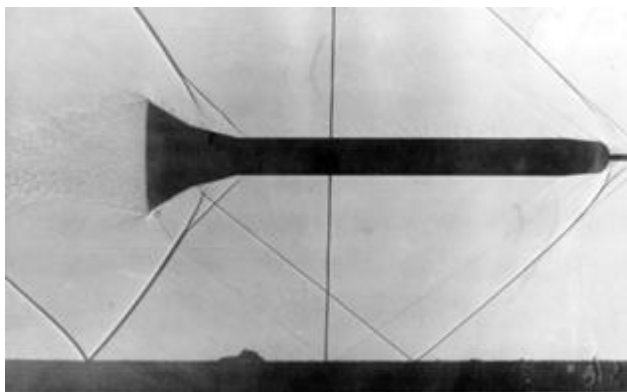


Рисунок 8 - Опыт 1, СТФ1

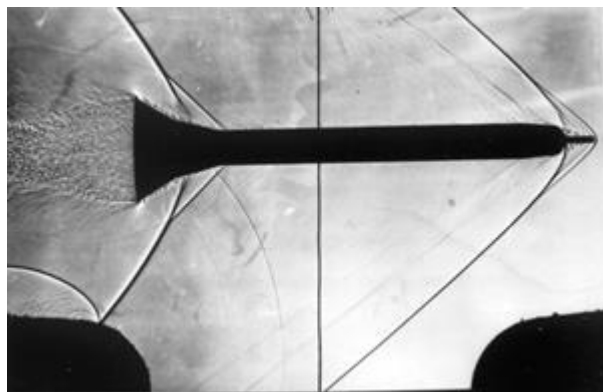


Рисунок 12 - Опыт 4, СТФ1

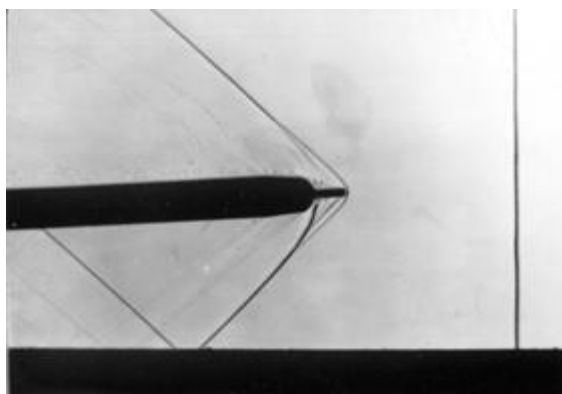


Рисунок 9 - Опыт 2, СТФ1

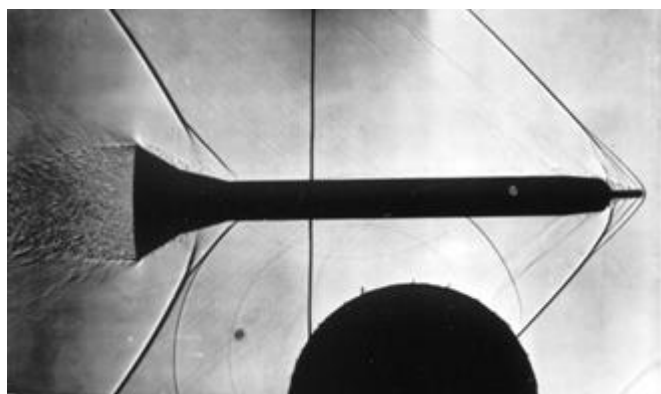


Рисунок 13 - Опыт 5, СТФ1



Рисунок 10 - Опыт 3, СТФ1



Рисунок 14 - Опыт 4, СТФ2

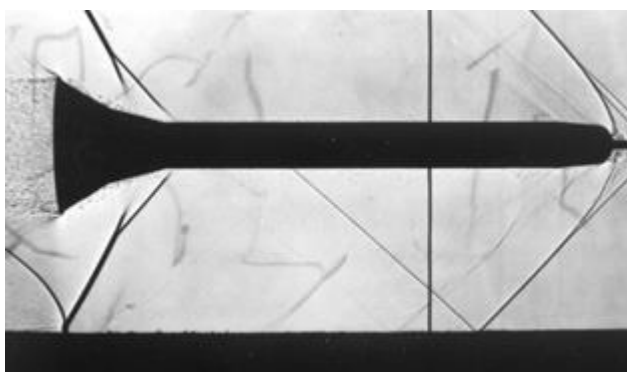


Рисунок 11 - Опыт 3, СТФ2

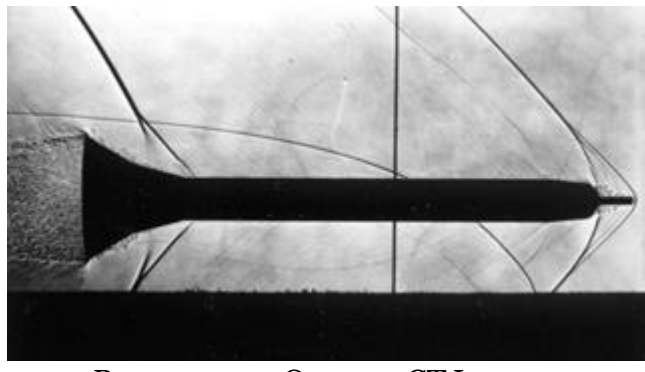


Рисунок 15 - Опыт 5, СТФ2.

На рисунке 16 приведено сопоставление данных, полученных в результате испытаний в аэробаллистическом тире и расчетных исследований отражения УВ [15, 16]. Данные проведенных испытаний хорошо согласуются с расчетными данными. Для головной УВ получено только регулярное отражение ударных волн от поверхности, а для УВ от излома образующей - как регулярное (оп. 1,

СТФ1), так и нерегулярное (с возникновением Маховской волны) отражение ударных волн от поверхности. Полученные ударные волны являются волнами слабой интенсивности ($p_1/p_0 \sim 1$), причем УВ от излома образующей имеют большую интенсивность ($p_1/p_0 \approx 1.3$) чем головная УВ ($p_1/p_0 \approx 1.05 - 1.1$).

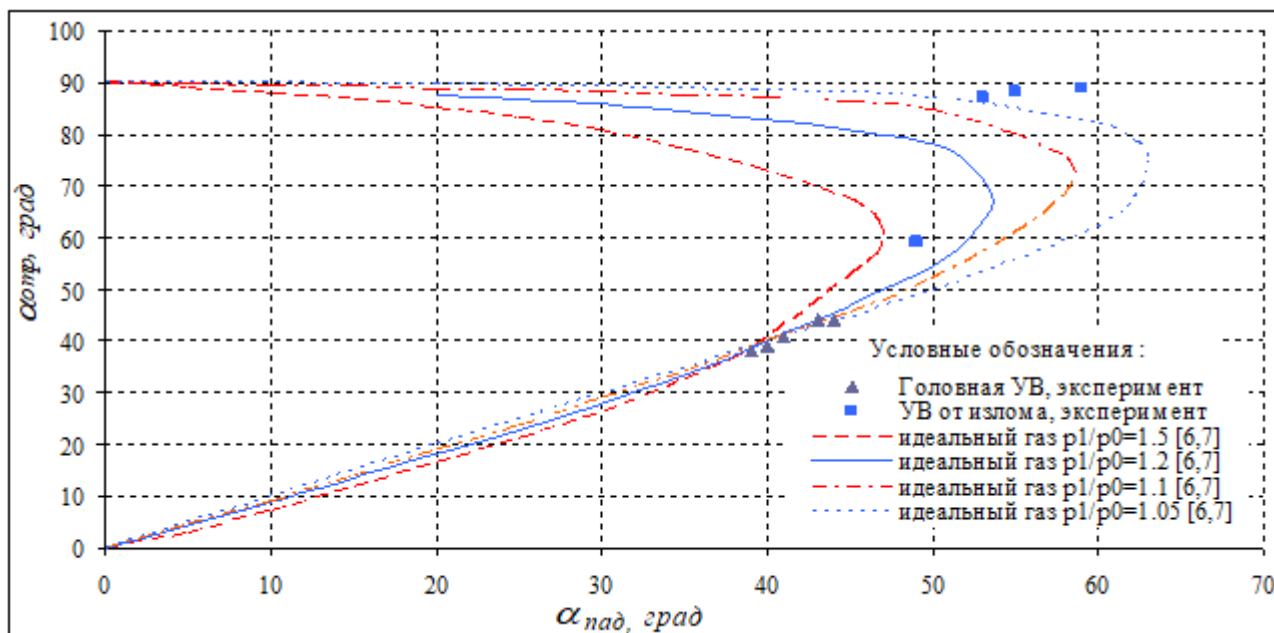


Рисунок 16 – Зависимость угла отражения от угла падения УВ.

Получена зависимость положения точки падения отраженной головной УВ на поверхность ОИ от высоты пролета над поверхностью – см. рисунок 17. Расстояние от носка модели до точки падения отраженной ГУВ на ОИ зависит от высоты пролета над поверхностью, угла атаки ОИ и не зависит от вида преграды.

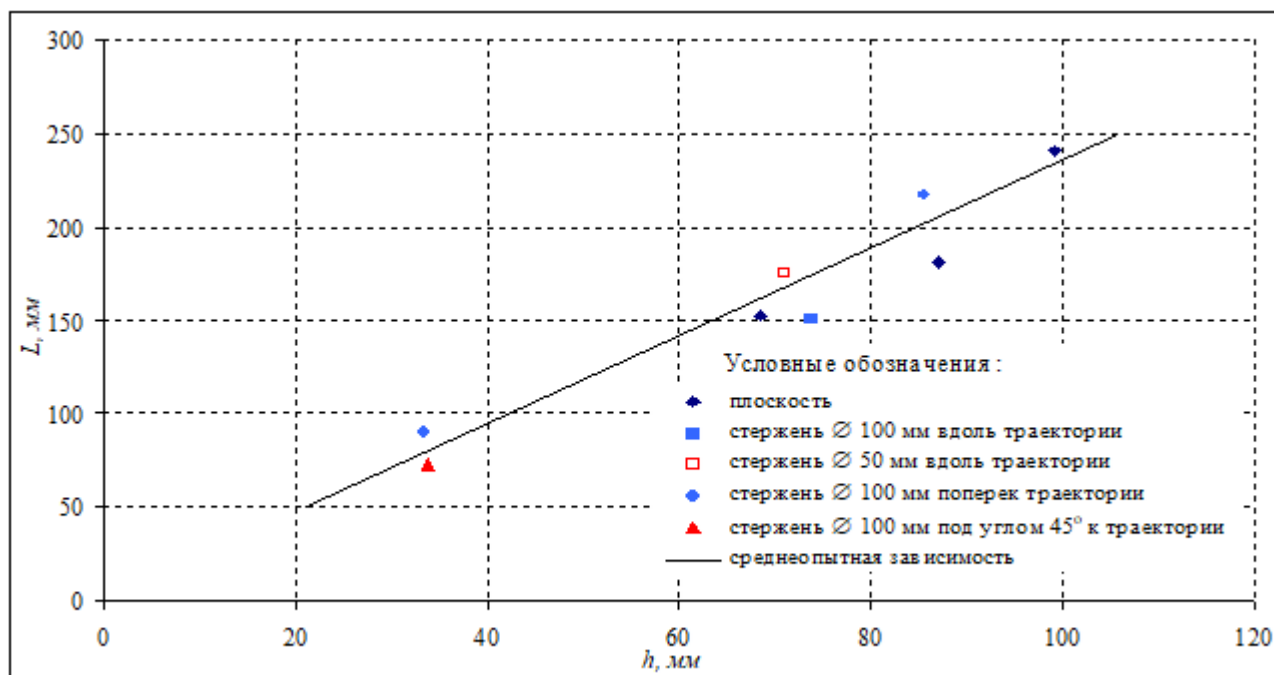


Рисунок 17 – Зависимость положения точки падения отраженной ГУВ на поверхность ОИ от высоты пролета.

Данные проведенных испытаний могут быть использованы при исследовании отраженных ударных волн и анализе движения летательных аппаратов вблизи различных поверхностей.

Таким образом, на примере конкретной прикладной аэродинамической задачи показано, что классический прототиповой метод визуализации в расходящемся пучке остается надежным инструментом исследования головных скачков уплотнений, благодаря тому, что перераспределение освещенности на экране (пленке) этим методом пропорционально второй производной по-

казателя преломления $\left(\int \left(\frac{d^2 n}{dx^2} + \frac{d^2 n}{dy^2} \right) dz \right)$ и имеет ярко выраженное контрастное изображение. Приведено описание рабочего теневого стенда, позволяющего при использовании широкоформатных листов ортохроматической пленки чувствительностью несколько единиц ГОСТ получать качественные теневые картины течений обтекания моделей, движущихся со сверх и гиперзвуковыми скоростями. Работа выполнена при под-

держке грантов РФФИ [16-08-00776](#), 17-08-01096, [18-08-00715](#).

Литература

1. An Album of Fluid Motion. Assembled by Van Dyke M. Stanford, California, The Parabolic Press, 1982, 182p
2. An Album of Supersonic Flow Visualization. Edited by P.I. Kovalev and N.P. Mende. National Defence Industry Press, 2000, 300p
3. Аэродинамика летательных аппаратов в фотографиях. Составитель Г.И. Майкапар. ЦАГИ, Жуковский, 2003, 174с
4. Ю.Н. Дубнищев и др. Оптические методы исследования потоков. Новосибирск. Сиб. Унив. Изд-во, 2003. - 418с.
5. А.Ф. Белозеров Оптические методы визуализации газовых потоков. Изд-во Казан. Гос. техн. ун-та, 2007. 747с.
6. Герасимов С.И., Файков Ю.И., Холин С.А. Кумулятивные источники света Саров, ФГУП РФЯЦ ВНИИЭФ, 2011.
7. Герасимов С.И., В.И. Ерофеев, И.И. Каньгин, А.В. Сальников, Р. В. Герасимова. Визуализация дульного выхлопа при выстреле из легкогазовой

- пушки. Научная визуализация, кв.2, т.6, №2, 2014.
8. Герасимов С.И., И.И. Каньгин, В.А. Кикеев и др. Расчетно-экспериментальная визуализация сверхзвукового обтекания управляющих щитков на телах вращения сегментно-конической формы. Научная визуализация, кв. 3, т.6, №3, 2014, сс.55-67.
 9. Герасимов С.И., В.И. Ерофеев, И.И. Каньгин, В.А. Кикеев, А.П. Фомкин Визуализация сверхзвукового обтекания фрагментов кубической формы. Научная визуализация, кв.3, т.7, №3, 2015, сс.12-20.
 10. Герасимов С.И., Тотышев К.В., Фомкин А.П., Яненко Б.А. [Визуализация сверхзвукового движения сферы в воздухе и в воде](#) Научная визуализация, 2017, №1, том 9, с.1-25.
 11. Meier G.E.A. Computerized background-oriented schlieren // Experiments in Fluids. 33. 2002. P. 181-187.
 12. Richard H. and M. Raffel. «Principle and applications of the background oriented schlieren (BOS) method.» Institute of Physics Publishing, Meas. Sci. Technol. 12 (2001) 1576–1585.
 13. Герасимов С.И., Трепалов Н.А. Регистрация воздушных ударных волн с помощью теневого фонового метода. Научная визуализация. 2017, кв.4, Том9, №4 ,Стр.1-12
 14. Герасимов С.И., Трепалов Н.А. Теневой фоновый метод – оптический метод исследования ударных волн ЖТФ. 2017, т. 62, № 12, сс. 1802–1807. .
 15. Арутюнян Г. М., Карчевский Л. В. Отраженные ударные волны. М., Машиностроение, 1973 г.
 16. Физика взрыва. Сборник под редакцией Станюковича К. П. М., "Наука", 1975 г.

Regular reflection of a shock waves in model tests with shadow method

S.I. Gerasimov^{1,A,B,C,D}, A.V. Zubankov^{2,A,B}, V.A. Kikeev^{3,C,D},
Y.U. Smirnov^{4,A}, N.A. Trepalov^{5,A}, R.V. Gerasimova^{6,B}

^A Russian Federal Nuclear Center - The All-Russian Research
Institute of Experimental Physics, Sarov, Russia

^B Sarov Physics and Technical Institute of National
Research Nuclear University «MEPHI», Russia

^C Institute of Problems of Mechanical Engineering RAS, N.Novgorod, Russia

^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: 0000-0002-0515-2092

³ ORCID: 0000-0002-2375-0803

⁴ ORCID: 0000-0002-5419-5312

⁵ ORCID: 0000-0002-5131-1736

⁶ ORCID: 0000-0002-2711-3975

Abstract

The basic specific feature of the shadow method consists in absence optical components between an object under study and the registration plane. The object is illuminated with divergent (most often homosentric) or parallel beam. Distribution of the illumination in the pattern obtained is connected with change of the second derivative of the gas density with respect to directions, which are perpendicular to rays. The most part of information in experimental aerodynamics of compressible gas is obtained with the help of this simplest method. Heading for application of shadow method one should keep in mind that illumination distribution in the registration plane depends on the distance between the plane and the object under study. Strong refraction of light rays passing through the object may significantly distort geometrical projection of the object and more the object-screen distance the larger the distortion. The distortion lowers accuracy of measurements of geometrical coordinates, especially of angular ones. In the work the shadow method has been applied for study the regular and Mach reflection of a shock wave from pane and circle surfaces. Experimental data on reflection angle of bow shock have been obtained.

Keywords: Supersonic flow visualization, shadow method, regular and Mach reflection, incident and reflected shock waves.

References

1. An Album of Fluid Motion. Assembled by Van Dyke M. Stanford, California, The Parabolic Press, 1982, 182p
2. An Album of Supersonic Flow Visualization. Edited by P.I. Kovalev and N.P. Mende. National Defence Industry Press, 2000, 300p
3. Aerodynamika letatel'nykh apparatov v fotografiyach. [Aerodynamics of flying apparatus in pictures] Edited by G.I. Maykapar. CAGI, Zhukovsky, 2003, 174p [in Russian]
4. Yu.N. Dubnishev et al. Opticheskie metody issledovaniya potokov. [Optical methods for investigating the flows] Novosibirsk. Sib. Univ. edition, 2003. - 418p. [in Russian]

5. A.F. Belozerov Opticheskie metody vizualizacii gazovykh potokov. [Optical methods for visualizing the gaseous flows] Kazan. Gos. tech. univ, edition 2007. 747p. [in Russian]
6. Gerasimov S.I., Fajkov Ju.I., Holin S.A. Kumuljativnye istochniki sveta [Cumulative light sources]. RFNC-VNIIEF, 2011 [In Russian].
7. Gerasimov S.I. , Erofeev V.I., Kanygin I., Sal'nikov A.V. Vizualizacija dul'nogo vyhlopa pri vystrele iz legkogazovoj pushki. [Visualization of Muzzle Exhaust Following the Light Gas Gun Shot]. Scientific visualization. Vol. 6, No. 2, 2014 [In Russian].
8. Gerasimov S.I., Kanygin I., Kikeev V.A., Gerasimova R.V. Raschetno-experimentalnaya vizualizacija sverhsvukovogo obtekaniya upravljajutshih tshitkov na telach vratsheniya segmentno-konicheskoy formy. [Numerical and experimental patterns of supersonic flow around control shields on segmentconical bodies of revolution]. Scientific visualization. Vol. 6, No. 3, 2014. P. 55-67. [In Russian].
9. Gerasimov S.I., Erofeev V.I., Kanygin I.I., Kikeev V.A., Fomkin A.P. Vizualizacija sverhsvukovogo obtekaniya fragmentov kubicheskoy formy. [Visualization of supersonic flow around a cube]. Scientific visualization. Vol. 7, No. 3, 2015. P.12-20. [In Russian].
10. Gerasimov S.I., Totyshev K.V., Fomkin A.P. , Yanenko B.A. Vizualizacija sverhsvukovogo dvizheniya sfery v vozduhe i v vode. [Visualization of supersonic motion of sphere in air and in water]. Scientific visualization. Vol. 9, No. 1, 2017. P.1-25. [In Russian].
11. Meier G.E.A. Computerized background-oriented schlieren // Experiments in Fluids. 33. 2002. P. 181-187.
12. Richard H. and M. Raffel. «Principle and applications of the background oriented schlieren (BOS) method.» Institute of Physics Publishing, Meas. Sci. Technol. 12 (2001) 1576–1585.
13. Gerasimov S.I., Trepalov N.A. Registraciya vozdyshnykh udarnykh voln s pomosh'yu tenevogo fonovogo method [Recording air shocks with BOS method] Scientific visualization. 2017, 4, vol 9, №4 ,pp.1-12 [in Russian].
14. Gerasimov S.I., Trepalov N.A. Tenevoy fonovyi metod – optichesky metod issledovaniya udarnykh voln [Background Oriented Schlieren Method as an Optical Method to Study Shock Waves], Journal of Technical Physics 2017, Vol. 62, No. 12, pp. 1802–1807 [in Russian].
15. Arutiunian G.M., Karchevskij L.V. Otrazhennye udarnye volny.[Reflected shock waves] M., Mashinostroenie, 1973 [in Russian].
16. Phisika vzryva . Edited by Staniukovich K. P. M., [Explosion Physics] "Nauka", 1975. [In Russian].