

УДК 539

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕНЕВОГО ФОНОВОГО МЕТОДА
ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ОТ ВЗРЫВА ЗАРЯДА
ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ***

© 2018 г. **Герасимов С.И.^{1,2,3,4}, Ерофеев В.И.^{3,5},
Трепалов Н.А.², Яненко Б.А.¹, Герасимова Р.В.¹**

¹*Саровский физико-технический институт НИЯУ МИФИ,
Саров, Российская Федерация*

²*Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский
научно-исследовательский институт экспериментальной физики,
Саров, Российская Федерация*

³*Институт проблем машиностроения РАН, Нижний Новгород,
Российская Федерация*

⁴*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
Нижний Новгород, Российская Федерация*

⁵*Национальный исследовательский Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация*

s.i.gerasimov@mail.ru, erof.vi@yandex.ru

Поступила в редакцию 03.10.2017

Показана возможность применения теневого фонового метода для регистрации ударной волны несферической формы. В отличие от измерений с помощью датчиков давления, теневой фоновый метод позволяет получить двумерную картину распространения ударной волны. Для применения метода требуется простейший фон с яркостными различиями (трава, песок, лес), одна кинокамера и компьютер. Источником ударной волны являлся заряд взрывчатого вещества цилиндрической формы. Для визуализации ударной волны регистрируется освещенность, создаваемая взрывом заряда. Получена серия последовательных кадров процесса взрыва. На основе их анализа построены зависимости избыточного давления на фронте ударной волны от времени. Визуализация показывает неравномерное распространение ударной волны. Неравномерность избыточного давления на фронте волны уменьшается по мере ее распространения. Продемонстрирована возможность определения центра взрыва в плоскости регистрации по результатам визуализации ударной волны. Предполагается, что наличие многокадровой видеорегистрации позволит получить трехмерную картину распространения ударной волны и определить координаты центра взрыва в пространстве.

Ключевые слова: теневой фоновый метод, взрыв, ударная волна, высокоскоростная видеорегистрация.

* Выполнено при поддержке РФФИ (гранты №15-08-01836, №16-08-00776, №17-08-01096).

Форма зарядов взрывчатого вещества (ВВ), соответствующая сфере или полусфере, встречается редко, за исключением специальных постановочных опытов. Чаще всего форма зарядов представляет собой цилиндр длиной L и диаметром D с удлинением $L/D > 1$. В общем случае форма ударной волны (УВ) при взрыве цилиндрического заряда ВВ не сферична на достаточно большом удалении от источника взрыва. Несферичность УВ означает непостоянство перепада давления по поверхности ударного фронта. Несферичность УВ и непостоянство давления по разным направлениям сохраняется до перепада давления $\Delta P \sim 14$ кПа. Для менее интенсивных УВ несферичность и непостоянство перепада давления в разных направлениях уже не столь существенны и могут не приниматься во внимание [1].

Для экспериментального определения параметров УВ несферической формы, как правило, проводят измерения с помощью «линейки» датчиков давления, расположенных по различным азимутальным направлениям. В публикации [2] представлен такой пример. Для цилиндрического заряда ВВ с отношением L/D от 1 до 5, расположенного цилиндрической поверхностью на земле, в направлениях по азимуту 0° ; $22,5^\circ$; 45° ; $67,5^\circ$; 90° ; $112,5^\circ$; 135° ; $157,5^\circ$; 180° определены значения перепадов давления. В настоящей статье продемонстрирована возможность получения информации о двумерном распространении УВ и оценке перепадов давления. Производится высокоскоростная видеорегистрация процесса взрыва и последующая обработка полученной информации с целью визуализации УВ, являющейся частным случаем оптической неоднородности.

В последнее время как в России, так и за рубежом активно развиваются методы, позволяющие проследить за динамикой распространения оптической неоднородности. В статьях [3, 4] описано использование оптических методов для регистрации оптических неоднородностей, обусловленных изменением температуры. В [5, 6] показано применение оптических методов для визуализации структуры нестационарного газодинамического потока с локальными сверхзвуковыми зонами. Оптические методы применяются для 3D-визуализации оптически прозрачных областей с градиентом плотности [7]. С помощью оптического метода были выполнены натурные исследования обтекания лопастей вертолетного винта [8]. Приведенные способы регистрации различных оптических неоднородностей созданы на основе теневого фонового метода (ТФМ), который в англоязычной литературе известен как Background Oriented Schlieren (BOS) [9].

Визуализация оптических неоднородностей при использовании ТФМ, как правило, осуществляется на основе кросс-корреляционной обработки [3–8]. В настоящем исследовании использовался способ визуализации оптических неоднородностей [10, 11]. В отличие от известных аналогов [12–19], этот способ менее требователен к структуре фоновых экранов, что позволяет использовать естественные фоны (лес, трава, песок, кирпичная стена и др.) для визуализации УВ.

1. Постановка эксперимента

Для регистрации распространения УВ от взрыва цилиндрического заряда использовался ТФМ. Регистрация с помощью ТФМ предполагает высокоскоростную видеосъемку УВ на фоне контрастного экрана. В данном случае осуществлялась регистрация цифровой высокоскоростной видеокамерой с частотой съемки 9300 кадр/с и временем экспозиции 50,22 мкс в условиях естественного освещения. В качестве контрастного экрана использовался естественный фон (трава, пе-

сок, лес). Источником УВ являлся заряд ВВ (200 г ПВВ-7) цилиндрической формы с удлинением $L/D = 4,3$. Заряд располагался в центре зоны видеорегистрации и устанавливался цилиндрической поверхностью на деревянной подставке на высоте 320 мм от песчаного грунта, ось заряда была перпендикулярна оси видеорегистрации (рис. 1).

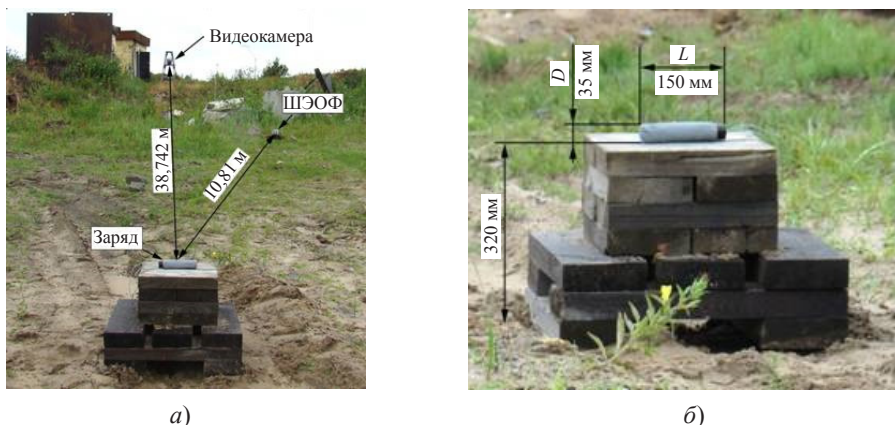


Рис. 1. Постановка эксперимента: *а* – расположение видеокамеры, *б* – размещение заряда на рабочем поле

Инициирование заряда осуществлялось с помощью высоковольтного генератора ВУ-19. Синхронно с запуском ВУ-19 производился запуск высокоскоростной видеокамеры. С целью определения момента начала процесса взрыва производилась регистрация освещенности, создаваемой взрывом заряда ВВ. Регистрация осуществлялась с помощью широкодиапазонного электронно-оптического фотометра (ШЭОФ) и цифрового осциллографа.

2. Результаты регистрации

С помощью цифрового осциллографа регистрировались сигнал с выхода ШЭОФ, пропорциональный освещенности, сопровождающей взрыв заряда ВВ, и сигнал на запуск подрывной установки (ПУ). Момент времени начала процесса взрыва, характеризующийся резким увеличением освещенности, соответствовал 3,866 мс после подачи импульса на запуск ПУ (рис. 2).

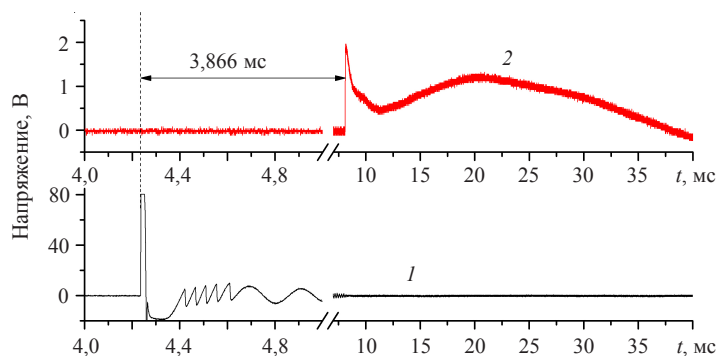


Рис. 2. Хронографическая информация сигнала запуска ПУ (1) и освещенности, создаваемой взрывом заряда ВВ (2)

В результате высокоскоростной видеосъемки получена серия последовательных кадров процесса взрыва заряда ВВ. На рис. 3 представлен фрагмент видеорегистрации, а на рис. 4 – фрагмент визуализации в интервале времени от 0,973 до 5,812 мс после начала процесса взрыва. На приведенных кадрах присутствует постепенно расширяющаяся светящаяся область взрыва.

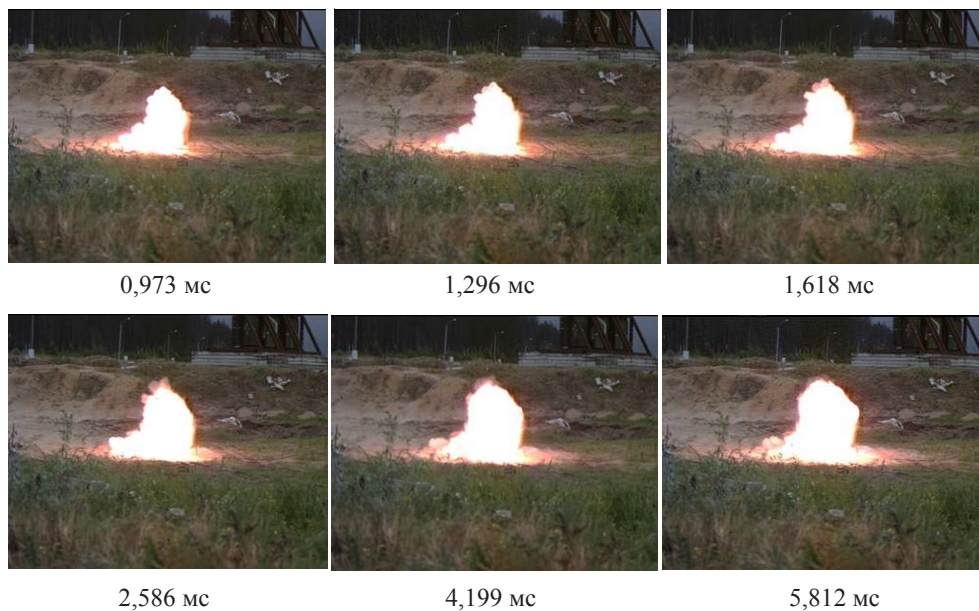


Рис. 3. Результаты видеорегистрации (фрагмент)

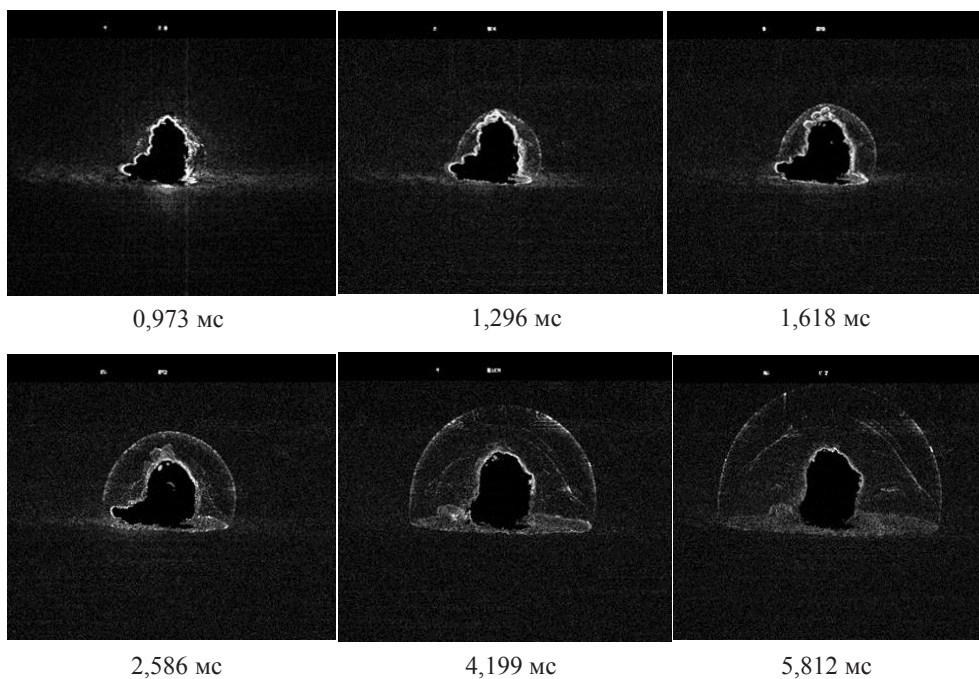


Рис. 4. Результаты визуализации УВ (фрагмент)

На момент проведения опыта температура окружающего воздуха составляла $+21\text{ }^{\circ}\text{C}$, атмосферное давление 105 Па, относительная влажность воздуха 59%.

3. Анализ экспериментальных данных

Результаты визуализации показывают ожидаемое неравномерное распространение УВ. При распространении УВ ее форма постепенно приближается к сферической (см. рис. 4). На рис. 5а представлен результат визуализации УВ ($R_{УВ} \approx 3,28\text{ м}$) в момент времени 5,81 мс после начала процесса взрыва и приведена окружность, наилучшим образом описывающая фронт УВ. Центр окружности расположен над торцевой, противоположной месту инициирования, частью цилиндра (заряда) и на расстоянии 0,35 м от оси цилиндра (рис. 5б).

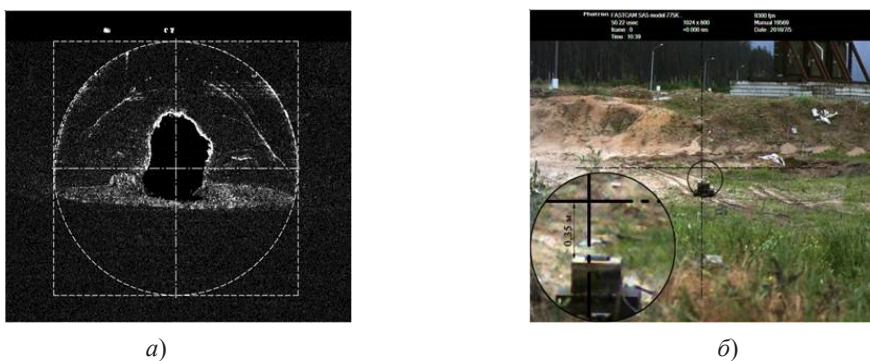


Рис. 5. Результаты визуализации УВ с вписанной окружностью (а) и расположение центра окружности относительно заряда (б)

Для определения параметров УВ область ее распространения была разбита на 5 секторов (рис. 6). В пределах каждого сектора определялась зависимость распространения фронта УВ от времени.

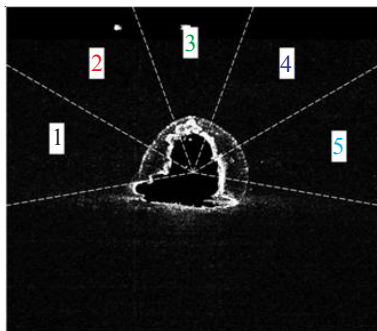


Рис. 6. Деление области распространения УВ на секторы

Определение радиуса УВ производилось путем наилучшего описания фрагмента фронта УВ в пределах каждого сектора окружностью, расположение центра которой было найдено ранее (см. рис. 5). Количество секторов зависит от необходимого уровня усреднения, для детального анализа их количество должно быть увеличено, что ведет к увеличению трудоемкости расчетов.

С учетом проекционных особенностей формирования изображения сферы реальный радиус УВ вычисляется по формуле:

$$R = D \cos \left[\arctg \frac{R'}{D} \right],$$

где R' – радиус УВ, найденный по ее изображению; D – расстояние между видеокамерой и центром взрыва [20].

Для каждого сектора найдены экспериментальные значения зависимости ударной волны от времени. Путем дальнейшей обработки полученных данных определены зависимости избыточного давления ΔP во фронте УВ от времени, результаты представлены на рис. 7.

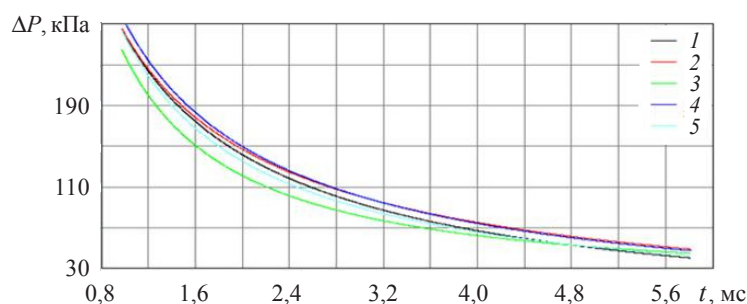


Рис. 7. Экспериментальные зависимости $\Delta P(t)$ по секторам

Полученные значения показывают неравномерность ΔP УВ по разным направлениям, которая уменьшается по мере распространения УВ.

Заключение

Приведенные результаты показывают возможность применения ТФМ для регистрации УВ, имеющей несферичную форму. В отличие от измерений с помощью датчиков давления, ТФМ позволяет получить двумерную картину распространения УВ. Обработка полученных данных позволяет оценить значения избыточного давления по разным направлениям. Продемонстрирована возможность определения центра взрыва в плоскости регистрации по результатам визуализации УВ. Наличие многокадровой видеорегистрации позволяет получать трехмерную картину распространения УВ, а также определять пространственные координаты центра взрыва.

Список литературы

1. Гельфманд Б.Е., Сильников М.В. *Фугасные эффекты взрывов*. СПб.: ООО «Изд-во «Полигон», 2002. 305 с.
2. Guerke G., Scheklinski-Giueck G. Blast parameters from cylindrical charges detonated on the surface of the ground. *20th Expl. Saf. Seminar*. 1983. DTIC. Vol. 1. P. 87.
3. Михалева Е.М., Михалев А.С., Поройков А.Ю., Скорнякова Н.М. Комплекс обнаружения возгорания и перегрева оборудования на основе теневого фонового метода. *Технологии технологической безопасности: Интернет-журнал*. 2013. Вып. 1(47). С. 8. (<http://ipb.mos.ru/ttb>).
4. Попова Е.М., Толкачев А.В., Скорнякова Н.М. Применение фонового теневого метода для исследования естественной конвекции. *Оптические методы исследования потоков: Труды VII Междунар. научно-техн. конф.* М.: Изд-во МЭИ, 2003. С. 126–129.

5. Глазырин Ф.Н., Знаменская И.А., Мурсенкова И.В., Сысоев Н.Н., Цзинь Ц. Исследования ударно-волнового течения в канале теньвым и теньвым фоновым методами. *Автометрия*. 2012. Т. 48. №3. С. 101–110.
6. Глазырин Ф.Н., Знаменская И.А., Коротеева Е.Ю., Мурсенкова И.В., Сысоев Н.Н. Использование теневого фонового метода для исследования нестационарного потока с ударной волной. *Научная визуализация: Электронный журнал*. 2013. Т. 5. №3. С. 65–74.
7. Klemkowsky J.N., Thurow B.S., Mejia-Alvarez R. 3D visualization of density gradients using a plenoptic camera and background oriented schlieren imaging. *54th AIAA Aerospace Sciences Meeting*. 2016. Pap. 1047. P. 4–8.
8. Kindler K., Goldhahn E., Leopold F., Raffel M. Recent developments in background oriented schlieren methods for rotor blade tip vortex measurements. *Experiments in Fluids*. 2007. Vol. 43. No 2–3. P. 233–240.
9. Meier G. Computerized background-oriented schlieren. *Experiments in Fluids* 2002. **33**(1). P. 181–187.
10. Герасимов С.И., Тотышев К.В., Трепалов Н.А. Способ визуализации оптических неоднородностей. Патент 2621620 С2 РФ. МПК G01N 21/45, G06T 7/20. Заявитель и патентообладатель РФЯЦ-ВНИИЭФ. Заявл. 16.10.15. Оpubл. 06.06.17. Бюл. № 16.
11. Герасимов С.И., Роженцов В.С., Тотышев К.В., Трепалов Н.А. Теневой фоновый метод в прикладных задачах. *Молодежь в науке: Сб. докл. 13-й научно-технич. конф. РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров*. 2014. С. 86.
12. Удалов А. В. *Аппаратно-программный комплекс теневого фонового метода для натурных исследований*: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2010. 16 с.
13. Dalziel S.B., Hughes G.O., Sutherland B.R. Whole-field density measurements by «synthetic schlieren». *Experiments in Fluids*. 2000. Vol. 28. No 4. P. 322–335.
14. Popova E.M. Processing schlieren-background patterns by constructing the direction field. *Journal of Optical Technology*. 2004. Vol. 71. No 9. P. 572–574.
15. Popova E.V., Scornyakova N.M., Tolkachev A.V. Application of background-oriented schlieren method to the visualization inhomogenities of liquid during exposure to laser radiation. Ed. by V.E. Privalov. *Proceedings of the SPIE*. 2005. Vol. 5447. P. 151–161.
16. Raghunath S., Mee D.J., Roesgen T., Jacobs P.A. Visualization of supersonic flows in shock tunnels, using the background oriented schlieren technique. *AIAA. Australian Aerospace Student Conference*. 2004. P. 10.
17. Glazyrin F.N., Znamenskaya I.A., Mursenkova I.V., Sysoev N.N., Jin J. Study of shock-wave flows in the channel by schlieren and background oriented schlieren methods. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2012. Vol. 48. No 3. P. 303–310.
18. Loose S. Background oriented schlieren (BOS) and particle image velocimetry (PIV) applied for transonic turbine blade investigations. *10th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics*. Lisbon, Portugal. 10–13 July. 2000. 24 p.
19. Mizukaki T. Visualization of compressible vortex rings using the background-oriented schlieren method. *Shock Waves*. 2010. Vol. 20. Iss. 6. P. 531–537.
20. Dewey J.M. Expanding spherical shocks (blast waves). In: Ben-Dor G., Igra O., Elperin E. (eds.) *Handbook of Shock Waves*. Vol. 2. London: Academic Press, 2001. P. 441–481.

References

1. Gelfmand B.E., Silnikov M.V. *Fugasnye efekty vzryvov [Concussive Effects of Explosions]*. Saint Petersburg. Poligon Publ. 2002. 305 p. (In Russian).
2. Guerke G., Scheklinski-Giueck G. Blast parameters from cylindrical changes detonated on the surface of the ground. *20th Expl. Saf. Seminar*. 1983. DTIC. Vol. 1. P. 87.
3. Mikhaleva E.M., Mikhalev A.S., Poroykov A.Y., Skornyakova N.M. Kompleks obnaruzheniya vozgoraniya i peregreva oborudovaniya na osnove tenevogo fonovogo metoda [Complex detection of fire and overheating of equipment on basis of background oriented schlieren method]. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti. Internet-zhurnal [Technology of technosphere safety. Internet Journal]*. 2013. Iss. 1(47). P. 8. (<http://ipb.mos.ru/ttb>) (In Russian).
4. Popova E.M., Tolkachev A.V., Skornyakova N.M. Primenenie fonovogo tenevogo metoda dlya issledovaniya estestvennoy konveksii [Background the application of shadow method for the

study of natural convection]. *Opticheskie metody issledovaniya potokov: Trudy VII Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii* [Optical Methods of Flow: Proceedings of the VII Conference]. Moscow. MEI Publ. 2003. P. 126–129 (In Russian).

5. Glazyrin F.N., Znamenskaya I.A., Mursenkova I.V., Sysoev N.N., Jin J. Study of shock-wave flows in the channel by schlieren and background oriented schlieren methods. *Opto-electronics, Instrumentation and Data Processing*. 2012. Vol. 48. No 3. P. 303–310.

6. Glazyrin F.N., Znamenskaya I.A., Koroteeva E.Yu., Mursenkova I.V., Sysoev N.N. Ispolzovanie tenevogo fonovogo metoda dlya issledovaniya nestatsionarnogo potoka s udarnoy volnoy [Application of background oriented schlieren technique for investigations of a non-stationary flow with shock wave]. *Nauchnaya vizualizatsiya. Elektronnyy zhurnal* [Electromic Journal Scientific Visualization]. 2013. Vol. 5. No 3. P. 65–74 (In Russian).

7. Klemkowsky J.N., Thurow B.S., Mejia-Alvarez R. 3D visualization of density gradients using a plenoptic camera and background oriented schlieren imaging. *54th AIAA Aerospace Sciences Meeting*. 2016. Pap. 1047. P. 4–8.

8. Kindler K., Goldhahn E., Leopold F., Raffel M. Recent developments in background oriented schlieren methods for rotor blade tip vortex measurements. *Experiments in Fluids*. 2007. Vol. 43. No 2–3. P. 233–240.

9. Meier G. Computerized background-oriented schlieren. *Experiments in Fluids* 2002. **33**(1). P. 181–187.

10. Gerasimov S.I., Totyshev K.V., Trepalov N.A. *Sposob vizualizatsii opticheskikh neodnorodnostey* [Method of Visualization of Optical Inhomogeneities]. Patent 2621620 S2 Rossiyskaya federatsiya. MPK G01N 21/45, G06T 7/20. Zayavitel i patentoobladatel RFYaTs-VNIIEF. [Patent 2621620 S2 of the Russian Federation. IPC G01N 21/45, G06T 7/20. Applicant and patentee of the RFNC-VNIIEF]. Appl. 16.10.15. Publ. 06.06.17. Bull. No 16. (In Russian).

11. Gerasimov S.I., Rozhentsev V.S., Totyshev K.V., Trepalov N.A. Tenevoy fonovyy metod v prikladnykh zadachakh [Background oriented schlieren method in applied problems]. *Molodezh v nauke. Sbornik dokladov 13-oy nauchno-tehnicheskoy konferentsii* [Youth and Science. Collection of Papers of the 13th Scientific-Technical Conference]. Sarov. RFNC-VNIIEF. 2014. P. 86 (In Russian).

12. Udalov A.V. *Apparatno-programmnyy kompleks tenevogo fonovogo metoda dlya naturnykh issledovaniy* [Hardware-Software Complex of the Shadow Background Method for Field Studies]. Avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [The dissertation on competition of a scientific degree of candidate of technical sciences]. Moscow. 2010. 16 p. (In Russian).

13. Dalziel S.B., Hughes G.O., Sutherland B.R. Whole-field density measurements by «synthetic schlieren». *Experiments in Fluids*. 2000. Vol. 28. No 4. P. 322–335.

14. Popova E.M. Processing schlieren-background patterns by constructing the direction field. *Journal of Optical Technology* 2004. Vol. 71. No 9. P. 572–574.

15. Popova E.V., Scornyakova N.M., Tolkachev A.V. Application of background-oriented schlieren method to the visualization inhomogenities of liquid during exposure to laser radiation. Ed. by V.E. Privalov. *Proceedings of the SPIE*. 2005. Vol. 5447. P. 151–161.

16. Raghunath S., Mee D.J., Roesgen T., Jacobs P.A. Visualization of supersonic flows in shock tunnels, using the background oriented schlieren technique. *AIAA. Australian Aerospace Student Conference*. 2004. P. 10.

17. Glazyrin F.N., Znamenskaya I.A., Mursenkova I.V., Sysoev N.N., Jin J. Study of shock-wave flows in the channel by schlieren and background oriented schlieren methods. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2012. Vol. 48. No 3. P. 303–310.

18. Loose S. Background oriented schlieren (BOS) and particle image velocimetry (PIV) applied for transonic turbine blade investigations. *10th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics*. Lisbon. Portugal. 10–13. July. 2000. 24 p.

19. Mizukaki T. Visualization of compressible vortex rings using the background-oriented schlieren method. *Shock Waves*. 2010. Vol. 20. Iss. 6. P. 531–537.

20. Dewey J.M. Expanding spherical shocks (blast waves). In: Ben-Dor G., Igra O., Elperin E. (eds.) *Handbook of Shock Waves*. Vol. 2. London. Academic Press. 2001. P. 441–481.

**USING THE SHADOW BACKGROUND METHOD FOR REGISTERING
A SHOCK WAVE FROM EXPLODING A CYLINDRICAL EXPLOSIVE CHARGE**

**Gerasimov S.I.^{1,2,3,4}, Erofeev V.I.^{3,5}, Trepalov N.A.²,
Yanenko B.A.¹, Gerasimova R.V.¹**

¹*Sarov Physics and Technical Institute of National Research Nuclear University MEPhI,
Sarov, Russian Federation*

²*Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics,
Sarov, Russian Federation*

³*Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences,
Nizhni Novgorod, Russian Federation*

⁴*Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,
Nizhni Novgorod, Russian Federation*

⁵*Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod, Nizhni Novgorod, Russian Federation*

The applicability of the shadow background method for registering non-spherical shock waves is demonstrated. In contrast with measuring using pressure indicators, the shadow background method makes it possible to obtain 2D pictures of shock wave propagation. The method requires the presence of a simplest background (grass, sand, wood), a camcorder and a computer. A shock wave is caused by an explosive charge of a cylindrical form. To visualize the shock wave, the illumination produced by the explosion of the charge is registered. A series of successive pictures of the explosion process is obtained. Based on their analysis, curves of excessive pressure along the shock wave front as a function of time are constructed. The visualization shows inhomogeneous distribution of the shock wave. The inhomogeneity of the excessive pressure along the shock wave front decreases as the wave propagates on. It is demonstrated that, based on the results of visualization of the shock wave, it is possible to determine the explosion center in the registration plane. The authors believe that the use of multi-aspect video-registration will make it possible to obtain 3D pictures of shock wave propagation and to determine explosion center coordinates in space.

Keywords: shadow background method, explosion, shock wave, rapid video-registration.