

УДК 538.521

РАСПРОСТРАНЕНИЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ПРИ ВЗРЫВЕ ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА С ПЛАСТИЧНЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ

С. И. Герасимов^{1,2,3,4}, А. Л. Михайлов^{1,2,3}, Н. А. Трепалов^{1,2}

¹РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607190 Саров, s.i.gerasimov@mail.ru

²Саровский физико-технический институт — филиал университета «МИФИ», 607186 Саров

³Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 115409 Москва

⁴Нижегородский государственный технический университет им. Р. А. Алексеева, 603950 Нижний Новгород

Представлены результаты измерения распространения ударной волны при взрыве взрывчатого вещества с пластичным наполнителем. Регистрация осуществлялась высокоскоростными аналоговыми и цифровыми камерами. Визуализация воздушной ударной волны проводилась в зоне отрыва от расширяющихся продуктов взрыва с помощью теневой съемки в проходящем свете, а в дальней зоне — с помощью теневое фонового метода. Оптические измерения распространения воздушной ударной волны использовались для оценки максимального давления в зоне сжатия на различных участках и сравнивались с данными, полученными датчиками давления. Вычисленные пиковые давления хорошо согласуются с измеренными. Теневой фоновый метод демонстрирует себя как полезный инструмент, легко вводимый в обычные масштабные полигонные эксперименты.

Ключевые слова: высокоскоростная видеорегистрация, теневой фоновый метод, взрывной опыт.

DOI 10.15372/FGV20170609

ВВЕДЕНИЕ

Сферический взрыв в воздухе представляет научный и практический интерес по ряду причин. К ним, в частности, можно отнести юстировку датчиков давления, тестирование расчетных методик, изучение влияния состава взрывчатого вещества (ВВ) на развитие неустойчивости Рэлея — Тэйлора на границе раздела продукты детонации — ударно-сжатый газ [1] и многое другое. Отдельной задачей является выбор оптимальных бесконтактных схем регистрации процесса. Из-за перепадов освещенности при взрыве применять одну схему оптической регистрации для изучения всех стадий процесса затруднительно. Относительно высокая повторяемость реализуемых параметров позволяет использовать в разных опытах различные схемы регистрации для одного состава ВВ в зависимости от исследуемой фазы взрыва и далее объединять полученные данные в общую диаграмму процесса

для приведенных масс и времен. В этой связи для изучения относительно поздней стадии взрыва большой интерес вызывает технология background oriented schlieren (BOS) или, иначе, теневой фоновый метод (ТФМ), позволяющий бесконтактно получать большое количество рабочих точек, определяемое зоной регистрации и частотой скоростной съемки.

ПРОВЕДЕНИЕ ВЗРЫВНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Фоторегистрация, теневые методы, методы трассерной визуализации широко использовались в классических исследованиях получения положений ударной волны [2–4]. В настоящее время в практике полномасштабных взрывных исследований большое распространение получила фотовидеорегистрация с различными вариациями ее схем. В работе [5] применяли регистрацию с отклонением лучей для измерения параметров работы детонатора. В [6] использовали оптические методики для получения характеристик ударных волн за дульным срезом при крупнокалиберном выстреле. В [7, 8] применяли теневые методы для регистрации распространения воздушной ударной вол-

Работа выполнена при поддержке программы повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ.

© Герасимов С. И., Михайлов А. Л., Трепалов Н. А., 2017.

ны (ВУВ) от взрывов. В работе [9] продемонстрированы преимущества небольших взрывчатых зарядов и теневой регистрации для получения детальных характеристик взрывов. В [10] были расширены возможности метода путем применения двух различных процедур обработки информации, полученной технологией BOS, для измерения характеристик распространения ВУВ и определения соответствующего избыточного давления, длительности фазы сжатия и идентификации отраженных волн в ограниченном пространстве при взрыве С4.

ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

На начальной стадии после выхода детонационной волны на границу с воздухом распространение ВУВ можно регистрировать в отраженном свете по изменению размеров светящейся зоны. В данной работе это осуществлялось съемкой камерой СФР в режиме лупы времени. По мере отхода ВУВ от зоны продуктов детонации применялась теневая съемка в проходящем свете. Импульсный точечный газоразрядный источник запускается в заданный момент времени относительно подрыва заряда. Теневая картина с визуализацией оптических неоднородностей (ударных волн) формируется на полупрозрачном, диффузно рассеивающем экране, расположенном на расстоянии 500 мм от заряда. Съемка осуществляется аналоговой камерой с электронно-оптическим затвором, обеспечивающим выдержку $1 \div 1.5$ мкс и синхронизированным со вспышкой источника света. Размеры излучателя, яркостная температура и расстояние до экрана определяются условием, что излучение, создаваемое самим изучаемым процессом, многократно превышает уровень сигнала источника света фонового освещения экрана. От этого условия зависят также предельные размеры (масса) ВВ при заданных параметрах схемы теневой регистрации. В данной работе схема умножения напряжения, параметры накопителя и излучателя обеспечивали получение источника света диаметром 20 мм с яркостной температурой 17 000 К, что позволяло проводить теневую съемку начиная с расстояния 4 м до рассеивающего экрана при массе исследуемых зарядов до нескольких десятков граммов в момент отхода ВУВ от зоны продуктов детонации. Для поздних стадий процесса использовался метод BOS [11–14] (далее используем аббревиатуру ТФМ). Схема экспериментальной

установки для ТФМ состоит из некогерентного источника света, фонового экрана, исследуемого потока, видеокамеры или фотоаппарата, компьютера и программного обеспечения. Два кадра фона, снятые с высоким разрешением, один из которых — опорный, а другой — содержащий оптические неоднородности, обрабатываются на компьютере для выявления искажений фона вследствие изменения показателя преломления. Регистрируемая оптическая неоднородность должна находиться в зоне резкости объектива, а фоновый экран должен устанавливаться строго в фокусе камеры.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Испытывались заряды эластичных и пластичных ВВ (ПВВ-7, ТКФ [15]) массой $0.01 \div 0.5$ кг, подрываемые в центре электродетонатором. Стадия «огненного шара» регистрировалась скоростной аналоговой камерой СФР-2М, стадия отрыва ВУВ от продуктов детонации — аналоговыми камерами с электронно-оптическим затвором «ЭПоС» собственной разработки. В дальней зоне осуществлялась цифровая высокоскоростная видеорегистрация ВУВ.

В зависимости от исследуемой фазы процесса и соответствующей методики регистрации заряды подвешивались на разной высоте от поверхности в диапазоне $1.5 \div 6$ м.

Стадия «огненного шара» регистрировалась в режиме лупы времени камерой СФР-2М с частотой 600 000 кадр/с. Регистрация стадии отрыва ВУВ от расширяющихся продуктов проводилась методом теневой съемки на диффузно рассеивающем экране с применением последовательно запускаемых импульсных точечных газоразрядных источников света и камер с электронно-оптическим затвором [15]. Распространение ВУВ в дальней зоне регистрировалось с помощью ТФМ. Применялась высокоскоростная цифровая видеокамера с ограничением по разрешению 1 Мпикс, в качестве фонового экрана использовалась виниловая пленка с нанесенным «гауссовским шумом» с рабочей зоной 2×1 м и размером зерна 3 мм.

Характерное расположение элементов схемы регистрации в одном из опытов представлено на рис. 1.

В работе [10] в качестве экрана применялся естественный фон, а для освещения использовался солнечный свет. Это ограничивало возможности метода. В частности, при та-

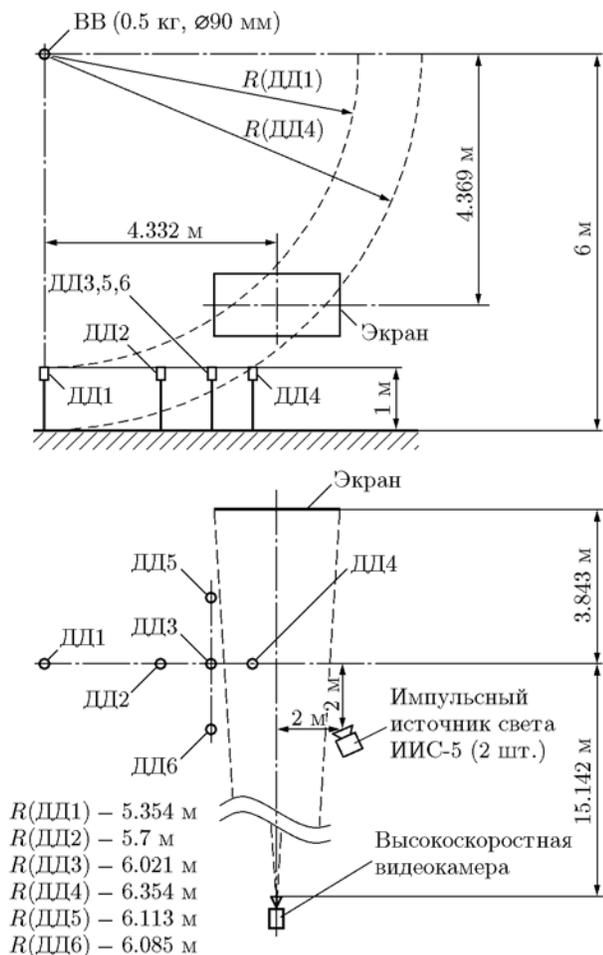


Рис. 1. Характерная схема опыта для изучения поздней стадии взрыва

ком освещении требуемый контраст достигался при максимальном времени экспонирования, равном обратной частоте съемки (≈ 100 мкс). Такое время экспозиции представляется большим для взрывных экспериментов и приводит к искажению положения фронта волны («smearing» of the shock). В данной работе для уменьшения времени экспозиции при видеорегистрации подсветка экрана осуществлялась с помощью двух импульсных газоразрядных источников света ИИС-5, расположенных вертикально (амплитудная сила света ИИС-5 составляет $6 \cdot 10^6$ кд $\pm 15\%$, длительность импульса ≈ 5 мс). ВУВ регистрировали высокоскоростной видеокамерой (частота съемки 7000 кадр/с, время экспозиции 12 мкс) на фоне экрана шириной 2 м и высотой 1 м. Параллельно с оптической регистрацией проводилась регистрация с помощью датчиков давле-

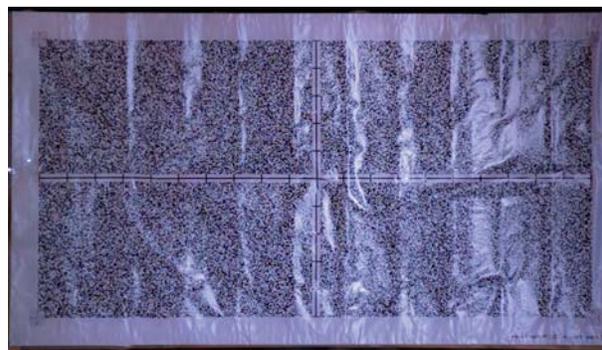


Рис. 2. Пример кадра видеорегистрации в момент времени 12.571 мс после подрыва заряда ПВВ-7 массой 500 г

ния (ДД) (ХСQ-080-5PSI, США). Датчики были ориентированы вертикально относительно горизонтальной площадки на высоте ≈ 1 м (см. рис. 1). Одновременно с подрывом заряда запускалась регистрирующая аппаратура, записывающая сигналы с датчиков давления. Через 7.168 мс после формирования сигнала на подрыв заряда осуществлялся запуск импульсных источников света ИИС-5 и высокоскоростной видеокамеры. На рис. 2 приведен пример одного из кадров полученной видеоинформации.

Для визуализации ВУВ данные ТФМ-регистрации подлежат программной обработке. Существует несколько алгоритмов обработки, в данной работе использовался метод вычитания изображения [10]. Обработка последовательности кадров видеорегистрации проводилась в среде MathCAD согласно зависимости [10]. В этом случае анализируются отдельные кадры, полученные при высокоскоростной съемке с опорным (статическим) изображением, зарегистрированным до подрыва. Каждый кадр после взрыва рассматривается как кадр с зафиксированным течением. Метод вычитания изображения идентифицирует положения, где яркость пикселей меняется между двумя кадрами [10]:

$$N(i, j) = \frac{(F(i, j) - S(i, j))^2}{(F(i, j) + S(i, j))/2 + 1}, \quad (1)$$

где N — результат визуализации, F — изображение с ВУВ в кадре, S — опорное изображение.

На рис. 3 представлен результат ТФМ-визуализации ВУВ с использованием алгоритма вычитания изображений. Визуализированы как первичная (ВУВ 1), так и вторичная (ВУВ 2) воздушные волны, образованные

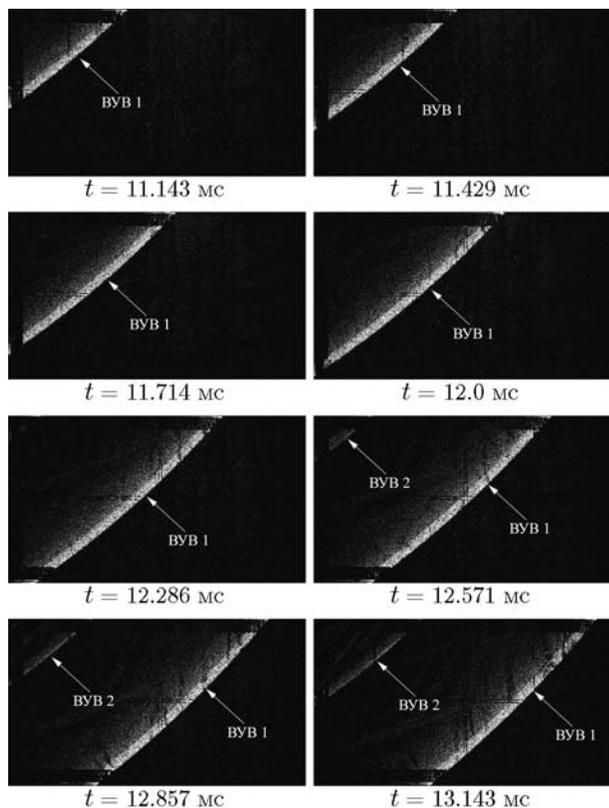


Рис. 3. Результат визуализации ВУВ в опыте, проведенном по схеме рис. 1

взрывом сферического заряда с инициированием из центра.

На рис. 4 представлены негативы начальной стадии сферического взрыва зарядов ТКФ и ПВВ-7, полученные при съемке в режиме лу-

пы времени с частотой 600 000 кадр/с [15]. Результаты съемки показаны в отраженном свете, слева — статические снимки начального расположения зарядов.

На рис. 5 приведены теневые картины расширения продуктов детонации в стадии отрыва ВУВ, полученные при выдержке ≈ 1.5 мкс съемкой в проходящем свете [15].

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Результаты опытов были проанализированы и использованы для построения годографа ВУВ для приведенных значений массы и времени. Для построения годографа ВУВ в ближней зоне взрыва использовались данные, полученные камерой СФР-2М, в дальней зоне — результаты ТФМ-регистрации. Результаты ТФМ-регистрации применялись для расчета скорости ВУВ и последующего определения амплитуды избыточного давления в местах расположения датчиков давления и затем сравнивались с данными, полученными с помощью этих датчиков. Проводилось также сопоставление ТФМ-результатов по времени последовательности приходов ВУВ к местам расположения датчиков с хронографией изменения давления во времени, зарегистрированной этими датчиками.

На рис. 6 приведены результаты регистрации распространения ВУВ камерой СФР, полученные в восьми опытах с зарядами разных типов и масс, после обработки в приведенных координатах $d' = d_0/m_0^{1/3}$, $t' = t/m_0^{1/3}$, где d_0 ,

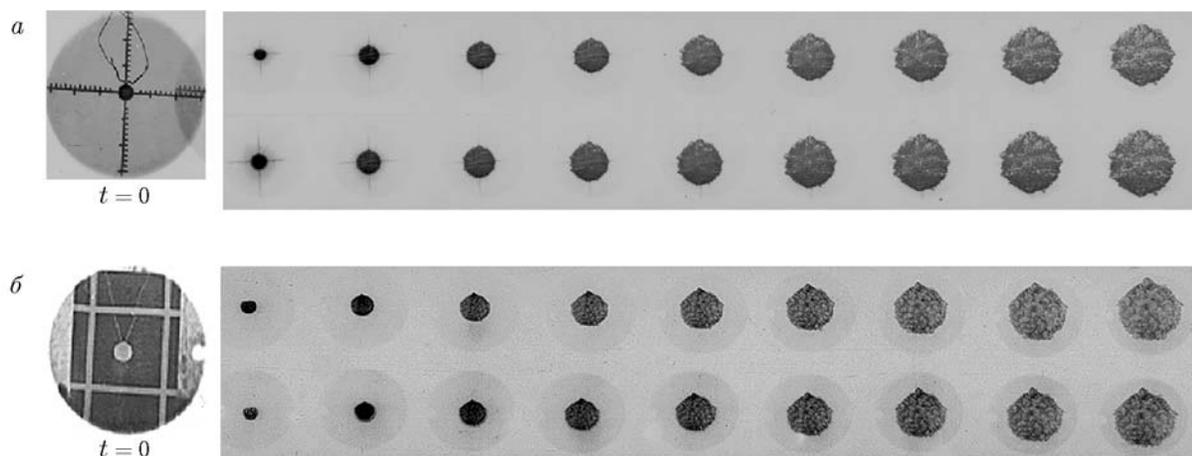


Рис. 4. Сферический взрыв в воздухе:

a — заряды ТКФ, $d_0 = 34$ мм, $m_0 = 30$ г; *б* — заряды ПВВ-7, $d_0 = 48$ мм, $m_0 = 100$ г

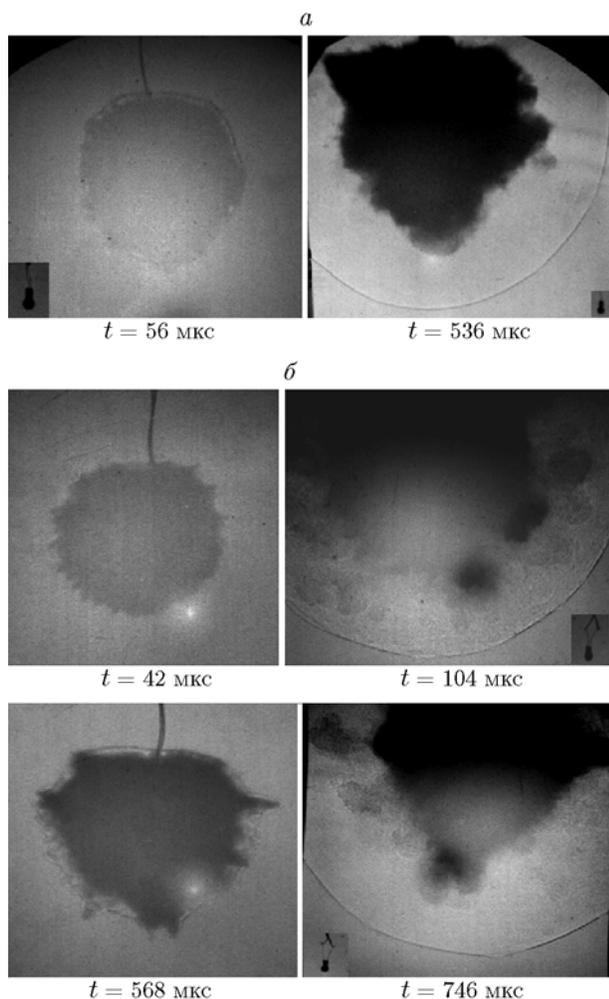


Рис. 5. Теневые фотографии разлета продуктов детонации зарядов ТКФ массой 10 г (а), шаровых зарядов ПВВ-7 массой 10 г (б): время указано от момента инициирования

m_0 — начальные диаметр и масса заряда.

Из результатов ТФМ-регистрации при известном расположении элементов схемы оптической регистрации для каждого кадра с визуализированным положением ВУВ были определены радиусы ВУВ 1 и ВУВ 2. Найденные значения и данные датчиков давления приведены на рис. 7. Видно хорошее согласование двух методов, что подтверждает возможность использования ТФМ для регистрации положения ВУВ.

Экспериментальные данные по распространению фронта ВУВ в ближней и дальней зонах взрыва заряда ПВВ-7 в воздухе представлены на рис. 8. Приведенные значения радиуса R_S и времени t_S вычислялись по формулам [3]

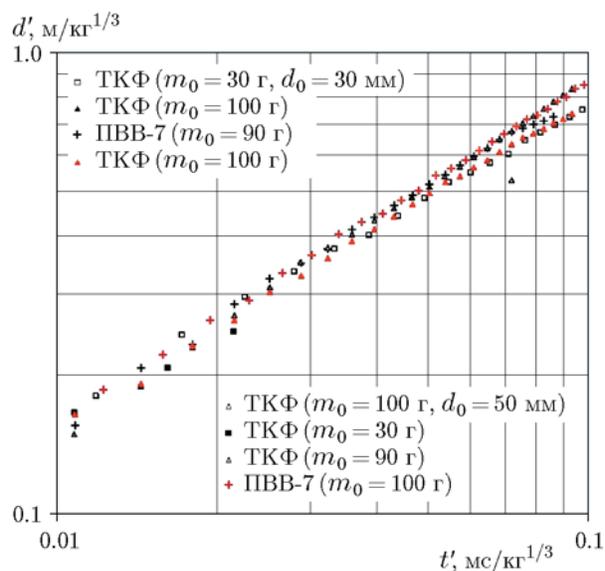


Рис. 6. Годограф ВУВ по результатам экспериментов для ближней зоны

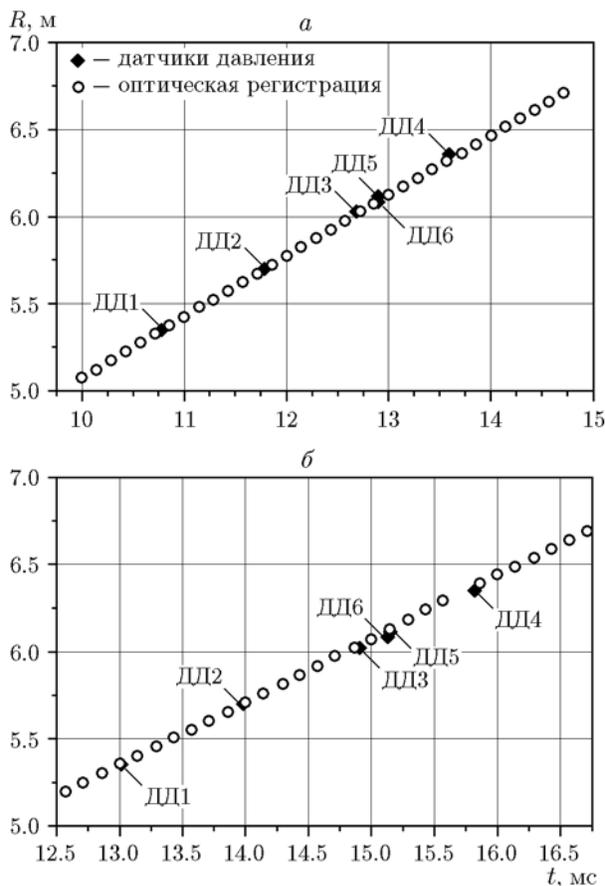


Рис. 7. Распространение ВУВ 1 (а) и ВУВ 2 (б) в экспериментах, выполненных по схеме рис. 1

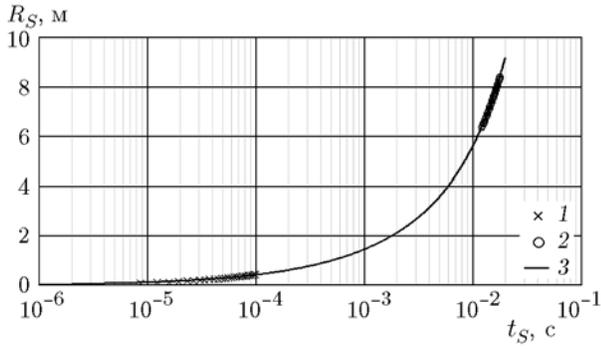


Рис. 8. Зависимости параметров первичной ВУВ при взрыве заряда ПВВ-7 массой 100 (1), 500 г (2) и аппроксимирующая зависимость (3) в приведенных координатах

$$R_S = R/S, \quad t_S = ct/S, \quad (2)$$

$$S = \sqrt[3]{W} \sqrt[3]{101.325/p}, \quad c = \sqrt{T/288.6},$$

где R , t — измеренный радиус и соответствующее ему время дискретного положения ВУВ; S , t_S — масштабные коэффициенты; W — масса заряда, кг; p , T — давление и температура окружающего воздуха в эксперименте, кПа и К соответственно.

К полученному массиву значений $R_S(t_S)$ добавлено значение R , равное радиусу заряда в момент времени $t = 0$. Результирующий массив был аппроксимирован (см. рис. 8) зависимостью

$$R_S(t_S) = A + Bc_0t_S + C \ln(1 + c_0t_S) + D\sqrt{\ln(1 + c_0t_S)}, \quad (3)$$

где A , B , C , D — коэффициенты аппроксимации, c_0 — скорость звука в невозмущенной среде при нормальных климатических условиях (340.29 м/с). Для ПВВ-7, по результатам экспериментов, коэффициенты аппроксимации составили: $A = -0.036$, $B = 0.957$, $C = -0.265$, $D = 2.264$.

Одна из целей измерения ТФМ состояла в определении пикового давления ударной волны по $R(t)$ -диаграмме и сравнении с измеренными значениями, полученными с помощью датчиков давления. Экспериментальные данные по перемещению фронта ВУВ $R(t)$ аппроксимировали зависимостью вида (3). Путем дифференцирования полученной зависимости найдены скорости распространения ВУВ. Эти значения использованы для вычисления избыточного давления во фронте ВУВ по известным соотношениям [16]:

$$\Delta p = \frac{2\rho_0}{k+1} (D^2 - c_0^2),$$

$$\Delta p_{rf} = \Delta p \left(1 + \frac{\cos \varphi}{B} + \frac{(k+1)\Delta p}{(k-1)\Delta p + 2kp_0} \cos^2 \varphi \right), \quad (4)$$

$$B = \sqrt{\frac{k+1}{4}} \sqrt[3]{1 - \exp\left(-2.3 \frac{\Delta p}{p_0}\right)},$$

где Δp , Δp_{rf} — избыточное давление на фронте соответственно падающей и отраженной ВУВ, Па; ρ_0 — плотность воздуха в невозмущенной области атмосферы, кг/м³; $k = 1.4$ — коэффициент адиабаты Пуассона для воздуха; D — скорость фронта ВУВ, м/с; φ — угол падения падающей волны, рад; p_0 — атмосферное давление в невозмущенной среде, Па.

Приведенные на рис. 9 результаты позволяют провести сравнение. Оптические измерения дают меньшие значения, чем пиковые давления, полученные по показаниям датчиков. Таким образом, при оценке пикового давления следует учитывать вклад отражения. В данном случае под отраженной ВУВ имеется в виду волна, отраженная от верхней (торцевой) поверхности корпуса датчика давления, представляющего собой цилиндр диаметром порядка 5 см, в центре которого располагается чувствительный элемент датчика. В работе [10] по измеренной ТФМ скорости волны (числу Маха) сразу делается пересчет для получения пикового давления в отраженной волне. Давление за косой ударной волной вычисляется по известным газодинамическим соотношениям [16] в предположении, что ВУВ плоская и угол падения известен. При таком подходе оптически измеренное пиковое давление как при нормальном, так и при косом отражении волны находится в хорошем соответствии с измерениями датчиками давления. Отметим, что лишь для ДД1 наблюдается некоторое несоответствие пикового давления его значению в отраженной волне (см. II на рис. 9). Возможной причиной является «обрезание» регистрирующим оборудованием полезного сигнала с ДД1 амплитудой выше 54 кПа, о чем свидетельствует отсутствие изменения сигнала на осциллограмме в интервале времени $10.79 \div 10.8$ мс.

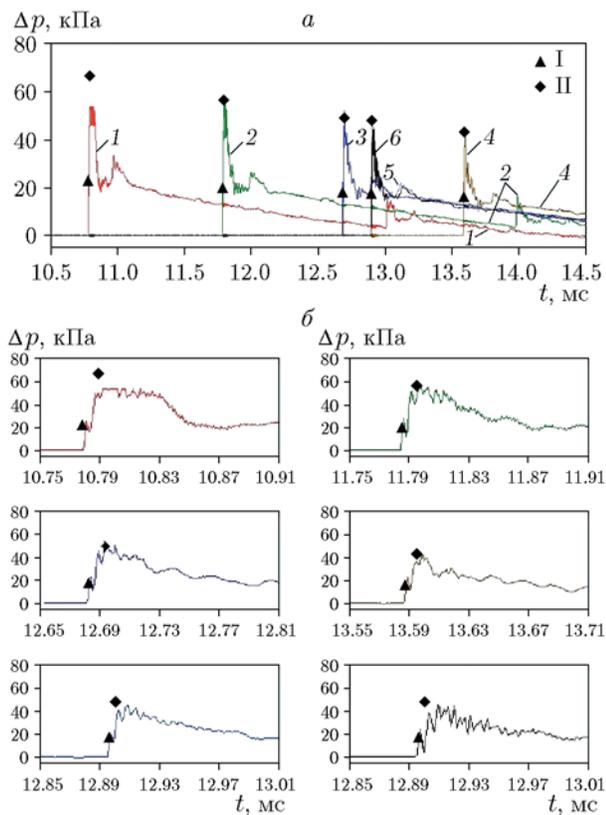


Рис. 9. Профили давления ВУВ, полученные с помощью датчиков (1–6), и значения давления, найденные методом оптической регистрации (I — падающая ВУВ, II — ВУВ, отраженная от плоскости установки датчиков давления):

a — общий график, *б* — увеличенные фрагменты для каждого датчика

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные результаты подтверждают, что регистрацию ВУВ можно проводить оптическими методами, и в частности ТФМ. Отличительной особенностью ТФМ является простота реализации, что позволяет применять его к очень широкому кругу задач, различных как по своей сути, так и по масштабу. ТФМ использовался для измерения прохождения ВУВ при взрыве заряда ПВВ-7. Для измерения положения ВУВ во времени применялся метод вычитания изображения. В отличие от работы [10], где время экспонирования кадра определялось обратной величиной частоты съемки, в данной работе за счет импульсной подсветки экрана выдержка при той же частоте съемки была уменьшена на порядок, что позволило повысить разрешение положения переднего края

ВУВ.

Зависимость $R(t)$ была использована для оценки максимального избыточного давления в шести точках расположения датчиков давления. Расчеты оказались в хорошем согласии с пиковыми давлениями, измеренными датчиками давления, и временами прихода волны.

Оптические методы позволяют охватить все стадии развития взрыва и могут, в частности, быть полезны для идентификации ударных волн в геометрии со множественными отражениями и при оперативном получении большого количества уровней давления в заданных точках в различных направлениях от источника энерговыделения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анисимов С. И., Зельдович Я. Б. Релей-тейлоровская неустойчивость границы между продуктами детонации и газом при сферическом взрыве // Письма в ЖТФ. — 1977. — Т. 3, вып. 20.
2. Dewey J. M. The properties of a blast wave obtained from an analysis of the particle trajectories // Proc. Roy. Soc. A. — 1981. — V. 324 (1558). — P. 275–299.
3. Dewey J. M. Expanding spherical shocks (blast waves) // Handbook of Shock Waves / G. Bendor, O. Igra, E. Elperin (Eds). — London: Acad. Press, 2001. — V. 2. — P. 441–481.
4. Glass I. I. Aerodynamics of blasts // Can. Aeronaut. J. — 1961. — V. 7. — P. 109–135.
5. Clarke S., Bolme C., Murphy M., Landon C., Mason T., Adrian R., Akin-ci A., Martinez M. Using schlieren visualization to track detonator performance // AIP Conf. Proc. — 2007. — N 955. — P. 1089–1092.
6. Steward B. J., Gross K. C., Perram G. P. Optical characterization of large caliber muzzle blast waves // Propell., Explos., Pyrotech. — 2011. — N 36. — P. 564–575.
7. Sommersel O., Bjerketvedt D., Christensen S., Krest O., Vaagsaether K. Application of background oriented schlieren for quantitative measurements of shock waves from explosions // Shock Waves. — 2008. — N 18. — P. 291–297.
8. Mizukaki T., Tsukada H., Wakabayashi K., Matsumura T., Nakayama Y. Quantitative visualization of open-air explosions by using background-oriented schlieren with natural background // Proc. of the 28th Intern. Symp. on Shock Waves, Manchester. — 2012. — V. 1. — P. 465–470.
9. Kleine H., Dewey J. M., Ohashi K., Mizukaki T., Takayama K. Studies of the TNT equivalence of silver azide charges // Shock Waves. — 2003. — N 13. — P. 123–138.

10. **Hargather M. J.** Background-oriented schlieren diagnostics for large-scale explosive testing // Shock Waves. — 2013. — V. 23, N 5. — P. 529–536.
11. **Meier G. E. A.** Hintergrund-Schlierenverfahren: Deutsche Patentanmeldung DE 19942856A1. — 1999.
12. **Richard H., Raffel M.** Principle and applications of the background oriented schlieren (BOS) method // Meas. Sci. Technol. — 2001. — N 12. — P. 1576–1585.
13. **Meier G. E. A.** Computerized background-oriented schlieren // Exp. Fluids. — 2002. — V. 33. — P. 181–187.
14. **Richard H., Raffel M., Rein M., Kompenhans J., Meier G. E. A.** Demonstration of the applicability of a background oriented Schlieren (BOS) method // Proc. of the 10th Intern. Symp. on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon. — Berlin; Heidelberg; New York: Springer, 2000.
15. **Герасимов С. И., Файков Ю. И.** Теневое фотографирование в расходящемся пучке света. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2010.
16. **Физика взрыва** / под ред. Л. П. Орленко. — Изд. 3-е, перераб. — М.: Физматлит, 2002. — Т. 1.

*Поступила в редакцию 12/I 2017 г.,
в окончательном варианте — 15/III 2017 г.*
