

УДК 681.787.7

О ГОЛОГРАФИЧЕСКОМ ВОССТАНОВЛЕНИИ ДИНАМИКИ И ОБЪЕМНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ

© 2020 г. Ш. М. Исмаилов¹, *, Ю. Д. Арапов¹, В. Г. Каменев¹, В. Н. Туркин¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие

“Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики имени Н.Л. Духова”, Москва, Россия

*E-mail: ismailov@vniia.net

Поступила в редакцию 14.02.2020 г.

После доработки 16.03.2020 г.

Принята к публикации 27.03.2020 г.

Представлены результаты исследования восстановления динамики дисперсной фазы на основе анализа голографического изображения, полученного с использованием зеркального фотохронографа и объемного распределения частиц путем послойного восстановления исследуемого объема.

DOI: 10.31857/S0367676520070121

ВВЕДЕНИЕ

Для изучения свойств конструкционных материалов в условиях ударно-волнового нагружения в газодинамических экспериментах активно применяются различные лазерно-интерферометрические методы. Эффект пыления, наблюдаемый при выходе ударной волны на свободную поверхность образцов и проявляющийся как образование облака частиц дисперсной фазы [1–4], имеет важное значение для изучения свойств материалов и прогнозирования характеристик разрабатываемых из них конструкций. Связано данное явление преимущественно с развитием неустойчивости Мешкова–Рихтмайра и процессами микрокумуляции, и напрямую зависит от давления на фронте ударной волны и упругопластических свойств материала [5]. При этом скорость частиц может в 1.5 раза превышать скорость свободной поверхности, а концентрация частиц зависит от шероховатости образца. В ряде случаев – при высокой степени неоднородности поверхности или при достижении плавления вещества на фронте ударной волны концентрация частиц достигает таких значений, что облако полностью экранирует исследуемый образец от оптического излучения.

Для изучения условий возникновения пыления и анализа динамики пылевых частиц различные методы регистрации необходимо использовать комплексно, поскольку каждый из существующих методов имеет только ограниченную область применения и позволяет получить информацию только о некоторых параметрах пылевого облака. Использование комплекса лазерно-оптических методов диагностики параметров дисперсной фазы позволяет получить значительно более полную информацию о структуре и динамике данного явления.

В настоящей работе предложены и экспериментально отработаны принципы исследования быстротекающих процессов на основе цифровой голографии. Первый метод отличается тем, что для исследования динамики разлета продуктов взрыва проволоки применена фиксация голограмм зеркальным фотохронографом с кадровой регистрацией на матричные фотоприемники. Второй метод основывается на послойном восстановлении исследуемого объема путем последовательной математической обработки голограммы.

ПОСЛОЙНОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ ГОЛОГРАММ

Голограмма может быть рассмотрена как дифракционная решетка, на которую попадает опорная волна и в результате формирует восстановленное изображение. Согласно принципу Гюйгенса каждая точка волнового фронта может быть рассмотрена как источник вторичных волн. Пусть известна какая-либо волновая поверхность. Тогда каждую точку этой поверхности можно рассматривать как вторичный источник колебаний, а следующие волновые поверхности находить как огибающие сферических волн, испускаемых этими точечными источниками.

Таким образом, волновой фронт в каждой точке пространства есть суперпозиция вторичных волн. В этом случае, используя координатную систему, приведенную на рис. 1, где плоскость восстановления находится на расстоянии d от плоскости голограммы, можно воспользоваться интегралом Френеля–Кирхгофа для восстановления [6–9].

$$E(x, y, z) = -\frac{ik}{2\pi z} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} dx_0 dy_0 E_0(x_0, y_0) \frac{\exp\left[ik\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + z^2}\right]}{\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + z^2}}, \quad (1)$$

где $E_0(x_0, y_0)$ – оптическое поле, расположенное во входной плоскости Σ_0 при расстоянии $z = 0$, $E(x, y)$ – поле, расположенное в выходной плоскости Σ на расстоянии z с длиной волны $\lambda = 2\pi/k$.

В данном приближении используется $r \sim z$ в знаменателе, но не в числителе, т.е.:

$$E(x, y, z) = -\frac{ik}{2\pi z} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} dx_0 dy_0 E_0(x_0, y_0) \times \exp\left[ik\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + z^2}\right]. \quad (2)$$

Данный интеграл (1) может быть представлен как интеграл свертки:

$$E(x, y, z) = E_0 \odot S_H, \quad (3)$$

где S_H – функция распространения точки (более точно когерентная функция распространения):

$$S_H(x, y, z) = -\frac{ik}{2\pi z} \exp\left[ik\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}\right]. \quad (4)$$

Расчет интеграла Френеля–Кирхгофа методом свертки для заданного расстояния z равносильен расчету функции взаимной корреляции между изображением голограммы и рассчитанным для данного значения z изображением функции $S_H(x, y, z)$. Функция взаимной корреляции двух изображений относительно быстро рассчитывается поточечным перемножением их Фурье-образов с последующим обратным преобразованием Фурье.

Дифракционную картину, образующуюся на заданном расстоянии от голограммы, можно рассчитать, если поточечно умножить друг на друга Фурье-образы от функции $S_H(x, y, z)$, вычисленной

для заданного расстояния и амплитудной структуры голограммы, а затем произвести обратное Фурье-преобразование. Для каждого фиксированного расстояния значение функции $S_H(x, y, z)$ будет

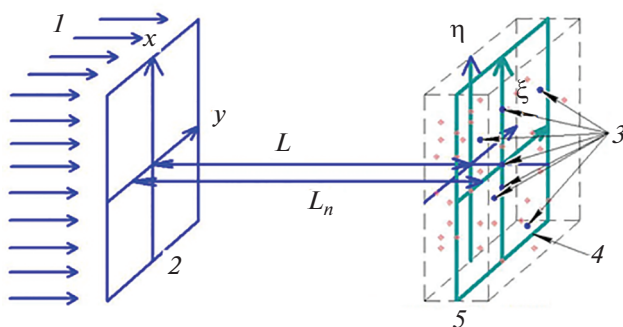


Рис. 1. Схема восстановления изображения пыли по голограмме: 1 – излучение, 2 – голограмма, 3 – частицы в слое n на дистанции L_n , 4 – восстанавливаемые слои на дистанции L_n , 5 – восстанавливаемый объем.

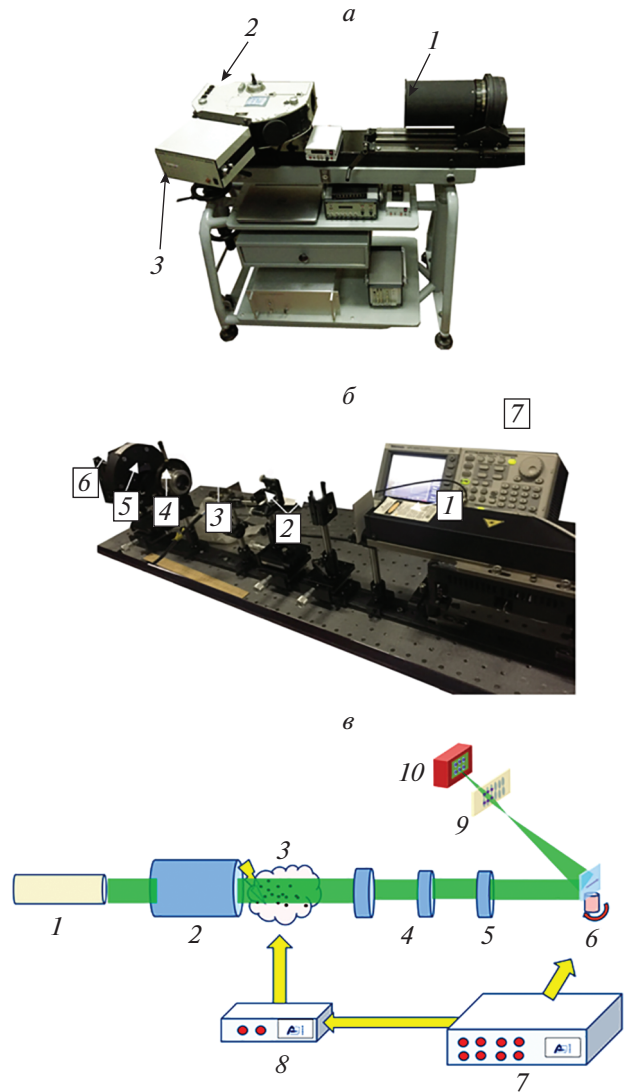


Рис. 2. (а) Общий вид цифрового фотохронографического комплекса: 1 – объектив, 2 – фотокамера с зеркальной разверткой, 3 – цифровая камера. (б) Общий вид прямого кадровой регистрации: 1 – лазер подсветки, 2 – телецентрическая система, 3 – объект, 4 – короткофокусный объектив, 5 – фильтр, 6 – цифровая матрица. (в) Схема постановки эксперимента с использованием фотохронографа: 1 – лазер подсветки, 2 – телецентрическая система, 3 – образование дисперсной фазы при взрыве проволоки, 4 – внешний объектив, 5 – внутренний объектив, 6 – вращающееся зеркало, 7 – блок синхронизации, 8 – блок подсветки, 9 – линзовая вставка, 10 – цифровая камера.

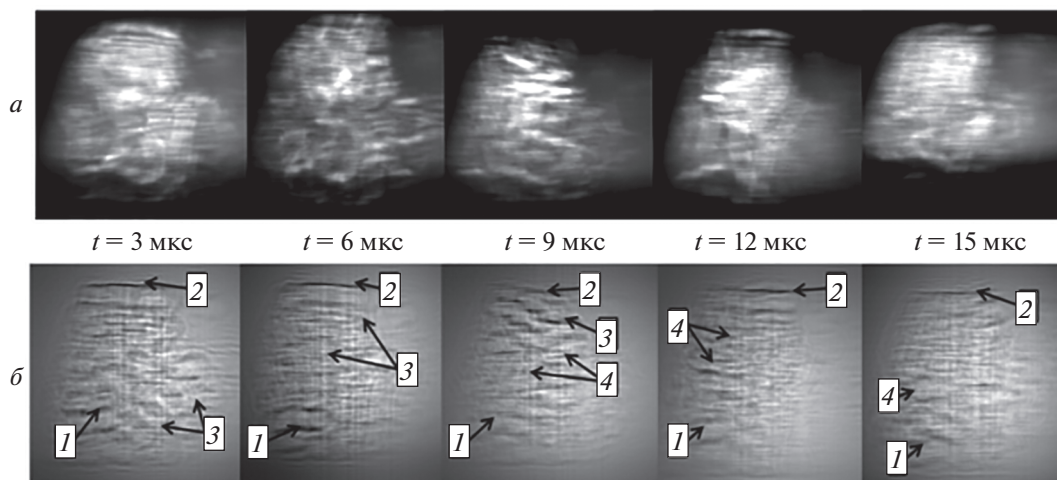


Рис. 3. Цифровые голограммы подрыва проволочки в различные моменты времени 3, 6, 9, 12, 15 мкс (*a*) и их восстановленное изображение в одной из плоскостей (*б*) (1 – фрагменты проволочки; 2 – граница крепления проволочки; 3 – продукты взрыва; 4 – микрочастицы материала проволочки).

различным, радиусы колец с ростом расстояния будут линейно возрастать. Если в слое есть частицы, то на восстановленном из голограммы изображении слоя появятся изображения частиц. Таким образом, данный метод может быть проинтерпретирован двумя способами: как послойное восстановление голограммы за счет дифракции опорной волны и как последовательный поиск корреляций с функциями рассеяния точки от каждого из пространственных слоев. Математически обе интерпретации идентичны.

Численное послойное восстановление изображений исследуемого объема по зафиксированной голограмме проводилось следующим образом:

1. На основе представленных выше соотношений, изображение голограммы, с использованием метода свертки подвергалось Фурье преобразованию на основе функции быстрого преобразования Фурье ($\text{cfft}()$), реализованной в программном комплексе Mathcad.

2. Посредством вложенных циклов вычисляется ядро свертки со сдвигом начала координат в центр матрицы изображения голограммы.

3. Затем выполняются прямое Фурье преобразование ядра и изображения голограммы и их поэлементное умножение.

4. После этого вычисляется обратное Фурье преобразование результата поэлементного умножения с помощью функции ($\text{icfft}()$).

5. Интенсивность в плоскости голограммы определяется квадратом модуля суммы комплексных амплитуд объектной и опорных волн.

6. Посредством вложенных циклов данная процедура повторялась для заданного количества дистанций от плоскости регистрации голограммы с пошаговым увеличением, что эквивалентно восста-

новлению изображений моделируемых плоскостей с пылью. В результате получалось определенное количество изображений восстановленных слоев модели дисперсной фазы в исследуемом объеме.

ЭКСПЕРИМЕНТ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведена серия экспериментов, в которых исследовался метод получения серии голографических изображений быстропротекающих процессов с помощью фотохронографа с зеркальной разверткой и регистрацией на матричные фотоприемники (рис. 2*a*) и метод прямой фиксации голограммы на матричный фотоприемник (рис. 2*б*). В качестве объекта использовалась медная проволочка диаметром 150 мкм, подрываемая импульсом тока, а период между кадрами составлял 1 мкс.

Схема постановки эксперимента представлена на рис. 2*б*. Для подсветки объекта использовался лазер 1 с длиной волны 532 нм. Объект 3 устанавливается в коллимированный с помощью телецентрической системы 2 пучок излучения. Изображение исследуемого процесса, проецируется на цифровую матрицу 6 с помощью короткофокусного объектива 4, после которого установлен фильтр.

В фотохронографическом комплексе зеркало обеспечивает поворот оптической оси, и ее совмещение в определенные моменты времени с оптическими осями элементов линзовой вставки. Каждый элемент линзовой вставки формирует на матрице отдельный кадр регистрируемого процесса. В случае прямой регистрации вместо линзовой вставки и матричного фотохронографа устанавливалась цифровая фотокамера. При этом часть света рассеивается на объекте и формирует сигнальную волну. Другая часть не взаимодействует с объектом и формирует опорную волну. Интерференция сиг-

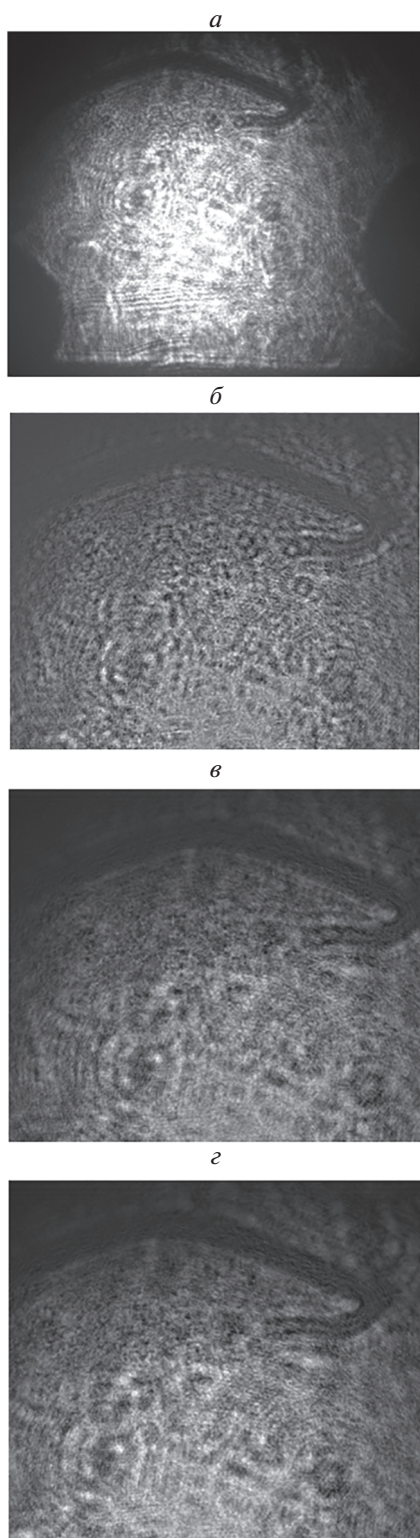


Рис. 4. Результаты обработки голограммы взрыва проволоки и послойного восстановления пылевого облака (*a* – исходная голограмма, *б* – слой, сдвинутый на 3 мм от базового слоя, *в* – слой, сдвинутый на 2 мм от базового слоя, *г* – слой, сдвинутый на 1 мм от базового слоя).

нальных и опорных волн содержит информацию об объемном распределении рассеивателей в исследуемом объекте.

В экспериментах с фотохронографом регистрировалась динамика разрушения проволочки, на которую подавался мощный импульс тока, приводящий к ее быстрому разогреву и разлету вещества в окружающее пространство.

На рис. 3*a* приведена последовательная серия кадров, содержащих цифровые голограммы подрыва проволочки в моменты времени от 3 до 15 мкс с момента подачи подрывного импульса. На рис. 3*б* приведены результаты восстановления данных цифровых голограмм в одной из плоскостей.

На восстановленных изображениях можно идентифицировать границу крепления проволочки, ее не разрушенные фрагменты, облако продуктов взрыва и микрочастицы материала проволочки. В центральной части наблюдаемого процесса разогретое облако продуктов взрыва приводит к столь сильным искажениям фазы, что не позволяет установить структурные особенности данной области. Относительно четко идентифицируема только граница разлета данных продуктов.

В экспериментах с прямой регистрацией голограммы исследовалась возможность послойного восстановления объема дисперсной фазы в различные моменты времени после подачи тока подрыва на проволоку. На рис. 4 представлены результаты обработки экспериментально зарегистрированной голограммы (рис. 4*a*) для различной глубины восстанавливаемого слоя исследуемого объема при взрыве проволоки относительно базового слоя, который совпадает с плоскостью, в которой находится проволочка. Полученная голограмма зафиксирована с временной задержкой относительно сигнала на подрыв, составляющей около 230 мкс.

В результате анализа полученных восстановленных слоев, видно, что продукты взрыва проволочки обладают размерами на порядок меньшими, чем ее диаметр. Оценки показали, что наименьший регистрируемый размер частичек составляет около 10 мкм. Результаты измерений предполагаемых частичек показывают, что на расстоянии 3 мм от базового слоя располагаются частички размерами около 10–20 мкм, в слое, расположенном на расстоянии 2 мм от базового – 20–30 мкм, а в слое, расположенном на расстоянии 1 мм – 25–30 мкм. Это объясняется тем, что более легкие маленькие частички быстрее разгоняются после взрыва проволочки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые экспериментально продемонстрировано использование динамической голографии с применением фотохронографа с зеркальной разверткой и кадровой регистрацией на матричные

фотоприемники. Что делает возможным послонное восстановление объема разлета продуктов взрыва проволоки в динамике.

В ходе экспериментальной отработки показано, что при взрыве проволоки с помощью голографического метода возможно восстановить объемное распределение продуктов разлета. Измеренные размеры частичек при этом составляют около 10 мкм.

Предложенные методы фиксации и обработки голограмм позволяют проводить анализ динамики распределения дисперсной фазы быстропротекающих процессов. Получаемая при этом информация позволит значительно продвинуть изучение газодинамических явлений при приведении исследований ударно-волнового нагружения различного рода конструкций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <http://www.ihed.ras.ru/flucome10/cd/papers/363r.pdf>.
2. Михайлов А.Л., Огородников В.А., Сасик В.С. и др. // ЖЭТФ. 2014. Т. 145. № 5. С. 892; Mikhailov A.L., Ogorodnikov V.A., Sasik V.S. et al. // JETP. 2014. V. 118. № 5. P. 785.
3. Огородников В.А., Иванов А.Г., Михайлов А.Л. и др. // ФГВ. 1998. Т. 34. № 6. С. 103; Ogorodnikov V.A., Ivanov A.G., Mikhailov A.L. et al. // Combust. Explos. Shock Waves. 1998. V. 34. № 6. P. 696.
4. Андрияш А.В., Асташкин М.В., Баранов В.К. и др. // ЖЭТФ. 2016. Т. 149. № 6. С. 1121; Andriyash A.V., Astashkin M.V., Baranov V.K. et al. // JETP. 2016. V. 122. № 6. P. 970.
5. Zellner M.B., Buttler W.T. // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 93. № 11. Art. № 114102.
6. Балтийский С.А., Гуров И.П., Де Никола С. и др. // Проблемы когерентной и нелинейной оптики: сб. статей. СПб: СПбГУ ИТМО, 2004. С. 91.
7. Андреева О.В. Прикладная голография. Уч. пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. 184 с.
8. Dvornichenko M.E., Kamenev V.G. // Sensors Transducers. 2018. V. 226. № 10. P. 83.
9. Lundin E., Kirchmann C.C., Andren J. A study of digital in-line holographic microscopy for malaria detection. Bachelor diploma project. Uppsala: Uppsala Univ., 2014. 63 p.