

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РЕГИСТРАЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ УДАРНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ПОТОКОВ МИКРОЧАСТИЦ ПО РАЗМЕРАМ И СКОРОСТЯМ МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОЙ ГОЛОГРАФИИ

*Федосеев Александр Владимирович<sup>1</sup> (postmaster@ifv.vniief.ru), Антипов Михаил Владимирович<sup>1</sup>, Подувалов Александр Николаевич<sup>1</sup>, Огородников Владимир Александрович<sup>1,2</sup>, Блинов Андрей Вениаминович<sup>1</sup>, Утенков Александр Алексеевич<sup>1</sup>, Согрина Ольга Борисовна<sup>1</sup>, Вавилова Татьяна Александровна<sup>2</sup>, Пошников Дмитрий Алексеевич<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.  
<sup>2</sup>СарФТИ НИЯУ МИФИ, г. Саров Нижегородской обл.

В последнее время интенсивно исследуется процесс ударно-индуцированного выброса частиц с поверхности металлов при выходе на нее ударной волны (УВ). Наиболее интересными и малоисследованными характеристиками этого процесса являются распределения частиц по скоростям и размерам. Использование теневых методов фоторегистрации не позволяет получить такие данные о потоке частиц в целом из-за ограничений, связанных с глубиной резкости теневых изображений микрочастиц ( $\leq 0,5$  мм) и небольшого поля обзора ( $\sim 4 \times 4$  мм) при больших увеличениях. Голографический метод позволяет устранить эти недостатки. В проводимых исследованиях потоки частиц создавали при помощи электровзрыва проволок или ударно-волновым нагружением свинцовых образцов. Голографическую регистрацию проводили при помощи разработанного в ИФВ мобильного регистратора с использованием метода осевой голографии Фраунгофера. В качестве регистрирующей среды использовали КМОП матрицу или голографические пластины. Восстановление изображений, записанных на голограммах, проводили на стационарной части макета голографического комплекса с использованием аналоговых или численных методов. В докладе в качестве результатов исследований представлены примеры голографической регистрации ударно-индуцированных пылевых потоков частиц с размерами от 4 мкм и более, движущихся со скоростями от 0,1 до 2,0 км/с, при этом поперечный размер регистрируемой области достигал  $\varnothing 19$  мм, а глубина регистрации была порядка 20 мм.

**Ключевые слова:** голография, осевая голография Фраунгофера, пыление.

## EXPERIMENTAL CONFIRMATION OF POSSIBILITY FOR RECORDING DISTRIBUTION OF SHOCK-INDUCED FLOWS OF MICROPARTICLES IN SIZES AND VELOCITIES BY THE PULSE HOLOGRAPHY METHOD

*Fedoseev Aleksandr Vladimirovich<sup>1</sup> (postmaster@ifv.vniief.ru), Antipov Mikhail Vladimirovich<sup>1</sup>, Poduvalov Aleksandr Nikolaevich<sup>1</sup>, Ogorodnikov Vladimir Aleksandrovich<sup>1,2</sup>, Blinov Andrej Veniaminovich<sup>1</sup>, Utenkov Aleksandr Alekseevich<sup>1</sup>, Sogrina Olga Borisovna<sup>1</sup>, Vavilova Tatiana Aleksandrovna<sup>2</sup>, Polshkov Dmitriy Alekseevich<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>FSUE «RFNC-VNIIEF», Sarov Nizhny Novgorod region  
<sup>2</sup>SarFTI NRNU MEPhI, Sarov Nizhny Novgorod region

Recently process of shock-induced emission of particles from a metals surface at an exit on it shock wave is intensively investigated. The most interesting and slightly researched characteristics of this process are distributions of the particles in speeds and sizes. A shadow methods use of photo registration don't permit to obtain such data a particles flow as a whole because of the restrictions coupled with the depth of shadow images sharpness of a micro particles ( $\leq 0,5$  mm) and a little field of vision ( $\sim 4 \times 4$  mm) at the great magnifications. The holographic method allows to eliminate these lacks. In carried out researches the particles flow created by wires electric explosion or shock-wave loaded

lead samples. The holographic registration made by means of developed in IPE the mobile device using in-line Fraunhofer holography method. For the registering environment used a CMOS matrix or holographic plates. Restoration of the images which have been written down on holograms realized on a stationary part of a breadboard model of a holographic complex using analogue or numerical methods. In the report as results of the researches are presented holographic images examples of the shock-induced «dust» flows of particles with the sizes from 4  $\mu\text{m}$  and more, moving with speeds from 0,1 to 2,0 km/s, thus the cross-section size of registered area reached  $\varnothing 19$  mm and depth of registration was about 20 mm.

**Keywords:** holography, in-line Fraunhofer holography, ejecta.

В последнее время интенсивно исследуется явление ударно-индуцированного пыления [1, 2], заключающееся в выбросе со свободной поверхности (СП) конденсированного вещества потока микрочастиц при выходе на нее ударной волны. Образующиеся при этом пылевые потоки характеризуются большими скоростями – до  $10^3$ – $10^4$  м/с, малыми плотностями  $\sim 0,1$ – $100$  мг/см<sup>3</sup> и малыми размерами  $\sim 10^{-5}$ – $10^{-7}$  м выбрасываемых частиц. Скорости потоков, их плотности и массы измеряют с помощью таких методов как: радиографический, в том числе с использованием протонного и синхротронного излучения, пьезоэлектрический, метод индикаторных фольг и лазерный-гетеродин-интерферометрический метод (PDV) [3, 4, 5].

Одной из важных и мало исследованных характеристик процесса пыления является распределение частиц по скоростям и размерам. Эти параметры измеряют с помощью теневой микрофоторегистрации, голографии, измерения интенсивности проходящего света и обратного рассеяния Ми [3, 6, 7, 8]. С учетом возможной чистоты обработки свободных поверхностей лайнеров в реальных конструкциях и интенсивности УВ наибольший интерес представляют потоки частиц с размерами от долей до десятков микрометров. Использование теневых методов фоторегистрации не позволяет получить данные о размерах частиц в таких потоках из-за ограничений, связанных с глубиной резкости теневых изображений микрочастиц ( $\leq 0,5$  мм) и небольшого поля обзора ( $\sim 4 \times 4$  мм) при больших увеличениях, а измерения по рассеянию Ми и затуханию света позволяют получить только усредненные данные. Глубина резкости получаемых изображений зависит от размеров объектов и ее можно оценить с помощью выражения:

$$\delta_{\text{гр}} \sim \frac{d^2}{\lambda} \quad (1)$$

где  $d$  – диаметр частицы,  $\lambda$  – длина волны лазерного света. Если объекты менее миллиметра, то глубина резкости будет сильно зависеть от их размеров. Для частиц диаметром  $d = 1, 10$  и  $100$  мкм, при  $\lambda = 0,5$  мкм (зеленый цвет), глубина контрастного изображения будет равна 0,002, 0,2 и 20 мм, соответственно. Вероятность зарегистрировать мелкие частицы фотографическим методом и представительность получаемых данных уменьшается с уменьше-

нием размеров частиц. При фоторегистрации объектов с размерами  $\sim 10$  мкм и менее они должны находиться точно в плоскости фокусировки, при незначительном удалении от которой будут видны их сильно размытые изображения или они будут неотличимы от фона.

Голографический метод позволяет увеличить глубины резкости и размер регистрируемой области потока. Для голографической регистрации частиц обычно используют метод осевой голографии Фраунгофера. Этот метод является наиболее простым методом получения голограмм, нетребовательным к качеству лазерного пучка и хорошо подходящим для регистрации микрообъектов [7, 8, 9, 10]. Метод осевой (in-line) голографии Фраунгофера для регистрации потоков частиц упрощенно можно представить следующим образом: плоский когерентный монохроматический световой поток проходит сквозь поток непрозрачных частиц. На расстоянии  $z$  от потока, на котором выполняется условие дифракции Фраунгофера, устанавливается фоточувствительная пластина, на которой регистрируется голограмма, представляющая собой интерференционную картину, возникшую вследствие интерференции нерассеянного света, прошедшего мимо частиц, со светом рассеянным на частицах. При регистрации, нерассеянный свет играет роль опорного луча, а рассеянный – предметного. Условие дифракции Фраунгофера выполняется при:

$$z \gg \frac{d^2}{\lambda} \quad (2)$$

где  $z$  – расстояние от объекта до плоскости наблюдения,  $d$  – диаметр частицы,  $\lambda$  – длина волны света.

При последующем освещении зарегистрированной голограммы на пластине только опорной волной, в плоскости голограммы возникает такое же амплитудно-фазовое пространственное распределение интенсивности света, которое создавала при записи предметная волна. Поэтому, в соответствии с принципом Гюйгенса–Френеля, голограмма преобразует опорную волну в копию предметной волны. Таким образом, можно сказать, что при освещении зарегистрированной голограммы, опорным пучком возникает объемное изображение объекта (потока частиц). Если голограмма оцифрована или получена на ПЗС (или КМОП) матрице, то восстановление записанно-

го изображения может быть проведено с использованием численных методов, использующих интеграл Френеля–Кирхгофа.

Во взрывных экспериментах схема регистрации несколько усложняется: дополнительно используют оптическую систему, предающую изображение интерференционной картины на расстояние, где регистрирующая среда защищена от воздействия ударных волн и осколков, образующихся при взрыве. Для защиты от свечения, возникающего во взрывных опытах, устанавливают фильтры пропускающие свет только с длиной волны лазерного пучка. Метод осевой голографии Фраунгофера в настоящее время используется для исследования ударно-волнового «пыления» в США и Китае [7, 8]. В данном докладе представлена реализация данного метода в России, в РФЯЦ ВНИИЭФ.

Наилучшее разрешение изображений частиц  $\sim 0,5$  мкм может быть достигнуто при использовании ультрафиолетового излучения и оптической системы с большой эффективной апертурой  $D$ , малым относительным фокусным расстоянием  $f/f/D_B$ , максимально приближенной к регистрируемому потоку частиц. Однако такая система регистрации не мобильна, имеет высокую стоимость, при проведении опытов могут повреждаться дорогостоящие линзы, располагающиеся вблизи от потока, что существенно ограничивает возможность ее применения [7].

В РФЯЦ-ВНИИЭФ разработана мобильная голографическая установка (регистратор) с габаритами  $1500 \times 200 \times 400$  мм, позволяющая надежно регистрировать частицы с размерами от 5 мкм и более, движущиеся со скоростями до нескольких километров в секунду. Схемы мобильного голографического регистратора и системы восстановления изображений частиц показаны на рис. 1.

В основе установки (рис. 1,а) два объектива 4 и 7, расположенные по телескопической схеме. Благодаря этому, регистрируемый объект можно располагать максимально близко к первому объективу 4, а также коэффициент увеличения, определяемый как  $k = f_2/f_1$ , не зависит от расстояния от объекта до первого объектива. Подсветку пылевого потока

в опытах проводили с помощью импульсного лазера 1 с энергией в пучке от нескольких десятков мДж, длительностью 4 нс и длиной волны  $\lambda = 532$  нм. Пятно лазерного пучка увеличивали с помощью расширителя до размера  $\varnothing 35$  мм. Для предотвращения возникновения лазерного пробоя в плоскости заднего фокуса первого объектива установлена вакуумируемая камера 5 с окнами. Перед вторым объективом 7 расположен полосовой фильтр 6, пропускающий только излучение с длиной волны лазерного пучка. Регистрацию увеличенного изображения интерференционной картины, формирующегося на расстоянии  $v$  от оптической плоскости второго объектива, в этой плоскости осуществляли с помощью голографические пластинки или на КМОП матрицу. В наших экспериментах обычно использовали пластины ВРП-М или матрицу фотоаппарата Nikon B5300.

Требуемый коэффициент увеличения устанавливается подбором объективов с соответствующими фокусными расстояниями  $f_1$  и  $f_2$ . Обычно устанавливали  $k = 1,9$  и  $k = 4,7$  раз, с помощью объективов с  $f_1 = 210$  мм (И-51  $f = 210$  мм  $f/4,5$ ) или  $f_1 = 85$  мм (МС Гелиос 40-2  $f = 85$  мм  $f/1,5$ ) и  $f_2 = 400$  мм (Canon EF 400 mm  $f/2.8$ ).

Восстановление изображений частиц при регистрации на КМОП матрицу проводили численным методом углового спектра [11, 12]. Этот метод позволяет проводить вычисления волнового фронта с использованием быстрых дискретных преобразований Фурье, без необходимости использования приближения Фраунгофера. Метод углового спектра реализован на языке Java в расширении Numerical Propagation [12] программы ImageJ. Для восстановления цифровых голограмм, полученных в наших экспериментах, использовали программу собственной разработки и расширение Numerical Propagation.

Изображения из голограмм, записанных на голографических пластинах, восстанавливали, освещая их световым пучком от непрерывного лазера, по схеме (рис. 1,б). Восстановленные изображения частиц фиксировали при помощи цифрового микроскопа, сделанного на основе объектива 11 и цифровой

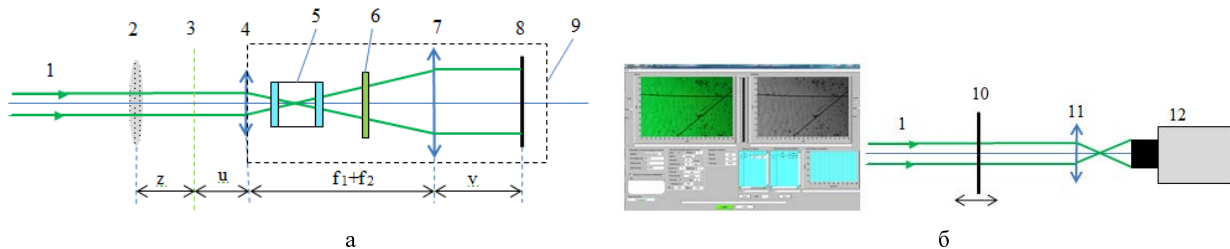


Рис. 1. Схема: а – мобильного голографического регистратора: 1 – коллимированный лазерный луч; 2 – исследуемый поток частиц; 3 – транслируемая интерференционная картина (плоскость фокусировки системы); 4 – оптическая плоскость первого объектива  $f_1$ ; 5 – вакуумируемая камера; 6 – полосовой интерференционный фильтр; 7 – оптическая плоскость второго объектива  $f_2$ ; 8 – плоскость регистрации голограммы; 9 – корпус установки; 10 – зарегистрированная голограмма; 11 – объектив; 12 – фотокамера ВИДЕОСКАН-2; б – системы восстановления изображений частиц

камеры 12. Процесс сканирования восстановленного изображения автоматизирован: пластина с голограммой смещается по заданному алгоритму, изменяя, таким образом, положение восстановленного объемного изображения относительно фокуса микроскопа.

Для настройки мобильного регистратора в месте предполагаемого расположения пылевого потока устанавливали никелевую проволоку диаметром 50 мкм, на которую подавали импульс тока  $\sim 1$  кА и регистрировали одну из фаз взрыва проволоки.

На рис. 2 показаны голограмма проволоки до подачи тока, рис. 2,а, и через 1,5 мкс после подачи импульса тока, рис. 2,б, и увеличенный фрагмент изображения, восстановленного из голограммы процесса взрыва проволоки, рис. 2,в. Продукты взрыва проволоки на полученном кадре непрозрачны, видна их структура. Размеры отдельных фрагментов составляют от 10 до 600 мкм. Расширяющиеся продукты взрыва инициируют появление воздушной УВ, на снимке виден ее фронт.

На рис. 3 показаны схема и результаты опыта, в котором частицы в виде порошка тонера разгоняли

до скорости 100 м/с. Скорость определяли по времени регистрации и расстоянию относительно начального положения частиц. Предварительно частицы помещали в паз, в котором располагалась никелевая проволока  $\varnothing 50$  мкм 3 (рис. 3,а). При подаче на проволоку импульса тока от генератора (10 кВ), проволока взрывалась, от чего частицы ускорялись, и образовывалась воздушная УВ. Регистрацию проводили на КМОП матрице при коэффициенте увеличения  $k = 4,7$ . Тест объект 1 (проволока диаметром 30 мкм) располагался на расстоянии  $z = 25$  мм от плоскости фокусировки.

На рис. 3,б представлена предварительная цифровая голограмма. На экспериментальной голограмме (рис. 3, в) видны дифракционные картины выброшенных частиц. Поток зарегистрированных частиц пролетал, в основном, на расстоянии  $z = 10$ –28 мм от плоскости фокусировки. На рис. 3,г показаны восстановленные изображения частиц, на которых хорошо видны относительно крупные частицы порошка тонера с размерами  $\sim 20$ –100 мкм и тест-объект (проволока  $\varnothing 30$  мкм). На восстановленных

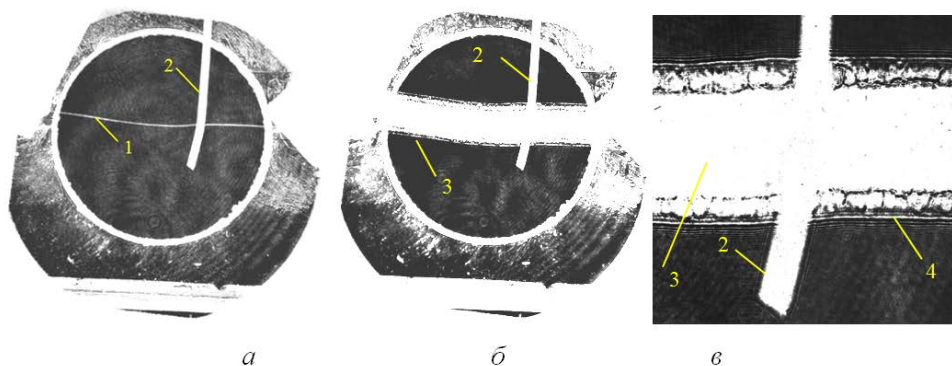


Рис. 2. Экспериментальные голограммы проволоки: а - до подачи тока: 1 – взрывающаяся проволока; 2 – тест-объект проволока  $\varnothing 0,7$  мм; б – через 1,5 мкс после подачи тока: 2 – тест-объект проволока  $\varnothing 0,7$  мм, 3 – проволока на момент регистрации  $t = 1,5$  мкс; в – увеличенное изображение взрывающейся проволоки: 2 – тест-объект проволока  $\varnothing 0,7$  мм, 3 – проволока на момент регистрации  $t = 1,5$  мкс, 4 – фронт воздушной УВ

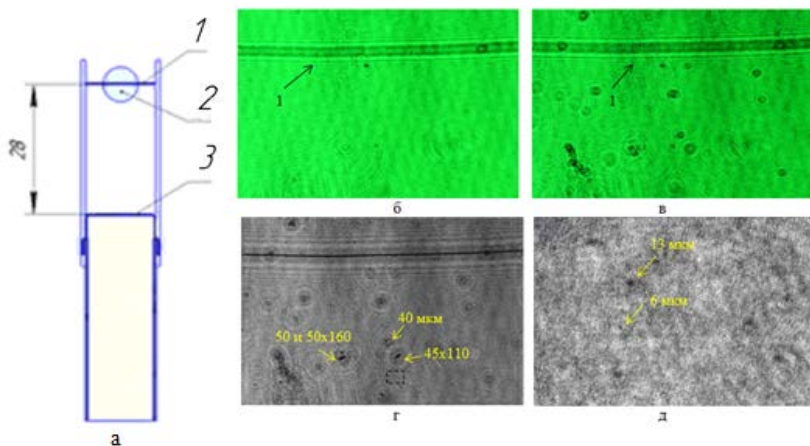


Рис. 3. Схема и результаты опыта: а – схема устройства для создания потоков микрочастиц: 1 – тест-объект  $\varnothing 30$  мкм; 2 – поле обзора; 3 – взрывающаяся проволока с насыпанными на нее частицами; б, – предварительная цифровая голограмма: 1 – тест-объект  $\varnothing 30$  мкм; в – экспериментальная цифровая голограмма: 1 – тест-объект  $\varnothing 30$  мкм; г – кадр, восстановленный на расстоянии  $z = 25,1$  мм; д – увеличенное изображение мелких частиц

изображениях присутствуют множество мелких частиц от 3 до 20 мкм. Увеличенные изображения таких частиц показаны на рис. 3,д.

На рис. 4 показаны предварительная, рис. 4,а, и экспериментальная, рис. 4,б, голограммы, полученные в аналогичном опыте с регистрацией на голографических пластинах ВРП-М. Скорость регистрируемых частиц была равна  $\sim 130\text{--}180$  м/с.

На предварительной (рис. 4,а) и экспериментальной (рис. 4,б) голограммах видны дифракционные картины тест объекта – проволоки  $\varnothing 30$  мкм и дефектов оптики. Голограммы на пластинах ВРП-М имеют размер  $\sim \varnothing 35$  мм, что соответствует области  $\sim \varnothing 7,4$  мм в пылевом потоке. На рис. 4,в показаны некоторые восстановленные частицы для области, выделенной на голограмме белым прямоугольником. Из полученных в динамических экспериментах голограмм можно восстанавливать изображения частиц с размерами от 5 мкм и более (рис. 4,г).

На рис. 5 представлены результаты применения мобильного голографического регистратора для голографической съемки ударно-индуцированных пылевых потоков с СП образцов из свинца толщиной 2 мм, нагружаемых УВ от контактного взрыва заряда взрывчатого вещества (ВВ)  $\varnothing 6 \times 8$  мм. Схема экспериментальной сборки показана на рис. 5,а. Пространство перед СП образцов вакуумировали до  $\sim 5$  мм. рт. ст. На образец 4 по диаметру наносили риску, из которой происходил выброс микрочастиц. Для определения расстояния от начального положения поверхности образцов по регистрируемому голограммам, а также для определения ожидаемого положения пылевого потока, вылетающего из риски, над образцом в поле обзора устанавливали тест-объект 3 в виде проволоки толщиной 50 мкм. Вертикальный репер 1 толщиной 0,7 мм устанавливали для

удобства наведения регистратора на интересующую область.

Перед экспериментами сборку выставляли таким образом, чтобы проволока и репер находились рядом с плоскостью фокусировки оптической системы. В опытах использовали оптическую систему с коэффициентом увеличения  $k = 1,9$  раз. В результате взрывного опыта с образцом, на котором была нанесена риска с  $a_0/\lambda = 40/250$  мкм, ( $a_0$  – глубина,  $\lambda$  – ширина) получены голограмма, рис. 5,б, а также фрагменты восстановленных изображений, рис. 5,в. В опыте расстояние от образца до тест-объекта равнялось 25 мм. Момент регистрации голограммы равен 18,4 мкс относительно выхода УВ из СП.

На голограмме рис. 5,б виден поток частиц и раздробленная часть образца. Плоскость фокусировки оказалась расположена точно на тест-объекте, также в фокус попали некоторые частицы. Самая быстрая зарегистрированная часть потока имела скорость равную 1,65 мм/мкс. Скорость движения поверхности образца, показанная на рис. 5,б пунктирной линией, равна 1 мм/мкс.

Восстановленные действительные изображения потока фотографировали через микроскоп с оптическим увеличением 5,4 раз. На рис. 5,г, крупным планом показано восстановленное изображение области, обозначенной прямоугольником (пунктир) на рис. 5,в.

На кадрах (рис. 5,в и рис. 5,г) видны и микро-частицы и нитевидные структуры с диаметром «нитей»  $\sim 3\text{--}10$  мкм. Из-за малого размера этих объектов, при смещении фокуса на 0,6 мм, изображения одних объектов размываются, а другие становятся четко видны. Эти кадры демонстрируют возможность голографии, позволяющей регистрировать микрообъекты, не находившиеся в плоскости фокусировки.

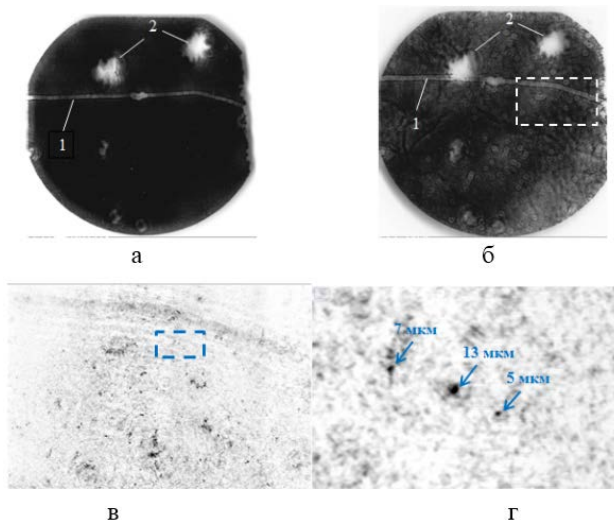


Рис. 4. Голограммы частиц ускоренных взрывом проволоки, зарегистрированные на пластине ВРП-М и вид восстановленных частиц: а – предварительная голограмма: 1 – тест-объект  $\varnothing 30$  мкм; 2 – дефекты оптики; б – экспериментальная голограмма: 1 – тест-объект  $\varnothing 30$  мкм; 2 – дефекты оптики; в – вид частиц, восстановленных на расстоянии  $\sim 4$  мм от тест-объекта; г – увеличенные изображения частиц с размерами от 3 до 13 мкм

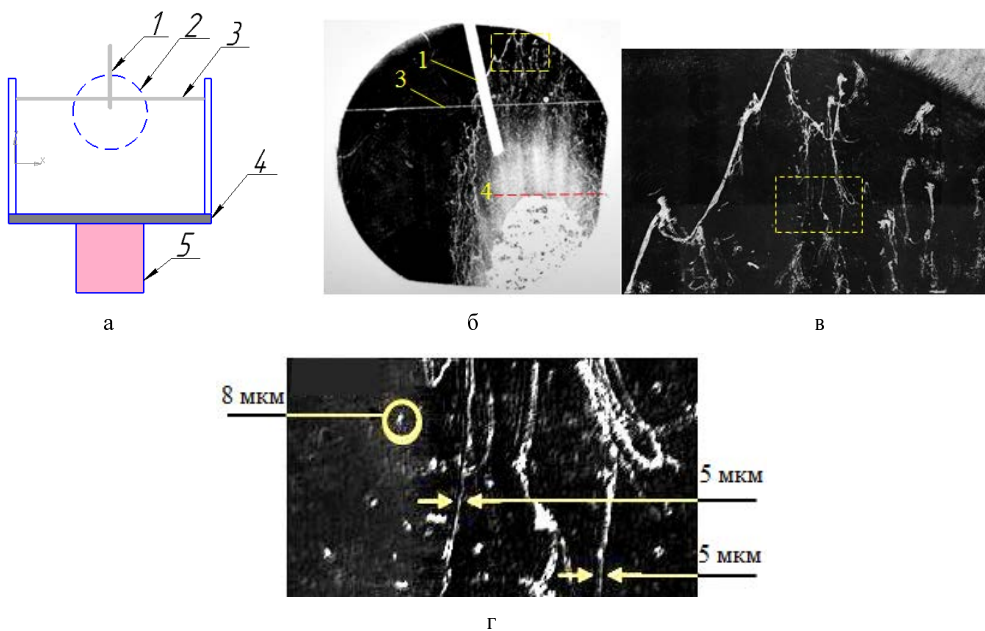


Рис. 5. Схема и результаты опыта: а – схема экспериментальной сборки: 1 – репер  $\varnothing 0,7$  мм; 2 – область регистрации; 3 – тест-объект проволока  $\varnothing 50$  мкм; 4 – образец; 5 – заряд ВВ; б – голограмма, полученная в опыте, в – фрагмент восстановленного из голограммы изображения потока, г – увеличенные изображения фрагмента, полученные при смещении фокуса сканирующего микроскопа на 0,6 мм

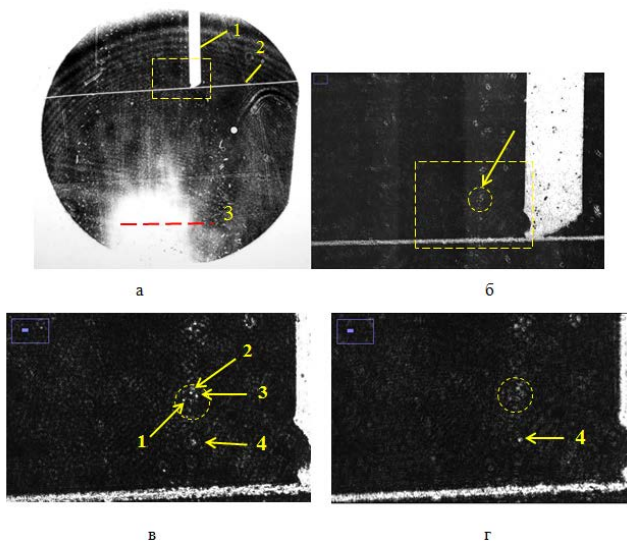


Рис. 6. Голограмма и восстановленные изображения потоков: а – голограмма пылевого потока: 1, 2, 3 – частицы  $\sim 10$  мкм; б – фрагмент восстановленного изображения (прямоугольник–пунктир) с рис. 6, а; в – увеличенное изображение фрагмента (окружность–пунктир) с рис. 6, б; 1, 2, 3 – частицы  $\sim 10$  мкм, 4 – частица  $\sim 16$  мкм; г – увеличенное изображение фрагмента (окружность–пунктир) с рис. 6, в, полученное при смещении фокуса сканирующего микроскопа на 1 мм: 4 – частица  $\sim 16$  мкм

На рис. 6 представлены вид голограмм и восстановленные из них изображения потоков, полученные в аналогичном опыте с образцом, на котором была нанесена риска с  $a_0/\lambda = 20/100$ .

В опыте расстояние от образца до тест-объекта равнялось 25 мм. Момент регистрации голограммы равен 14 мкс относительно выхода УВ из СП.

На голограмме (рис. 6,а) виден поток частиц и основная часть образца. Поскольку плоскость фоку-

сировки располагалась в месте предполагаемого появления потока, многие фрагменты потока, имеют резкие изображения на самой голограмме. Самая быстрая зарегистрированная часть потока двигалась со скоростью 2,2 мм/мкс. Скорость движения СП, показанной на рисунке пунктирной линией, равна 1,1 мм/мкс. На изображениях видны и более мелкие частицы. На рис. 6,б показано восстановленное изображение для области, показанной прямоугольником (пунктир) на рис. 6,а.

На рис. 6,в представлено увеличенное изображение выделенной области прямоугольником (пунктир) на рис. 6, б, на котором видны частицы (1, 2, 3 с рис. 6,в) с размерами  $\sim 10$  мкм. При смещении фокуса на 1 мм изображения частиц (1, 2, 3 с рис. 6,в) размываются, но становится лучше видна частица 4 с размерами  $\sim 16$  мкм (рис. 6,г).

### Заключение

Разработанный в РФЯЦ-ВНИИЭФ мобильный голографический регистратор позволяет получать импульсные голограммы ударно-индуцированных потоков микрочастиц с размерами от 3 мкм и более, движущихся со скоростями до 2,2 км/с, при поле обзора до  $\varnothing 20$  мм. По зарегистрированным голограммам можно восстанавливать изображения микрочастиц, находящихся на расстоянии до нескольких сантиметров от плоскости фокусировки оптической системы, что позволяет определять распределение частиц во всем потоке, имеющем достаточную прозрачность, по размерам и скоростям.

Представленные результаты демонстрируют основные преимущества голографического способа регистрации: возможность восстановления изображений микрообъектов, не попавших в плоскость фокусировки и регистрации с микронным разрешением большого поля обзора (в проведенных опытах  $\varnothing 20$  мм).

Использование для регистрации голограмм КМОП матриц позволяет регистрировать быстро движущиеся потоки микрочастиц, однако наиболее четкие изображения частиц и наибольшее поле обзора получаются при использовании голографических пластин.

### Список литературы

1. Огородников В. А., Иванов А. Г., Михайлов А. Л., Крюков Н. И., Толочко А. П., Голубев В. А. О выбросе частиц со свободной поверхности металлов при выходе на нее ударной волны и методах диагностики этих частиц // Физика горения и взрыва. 1998. Т. 34, № 6. С. 103–107.

2. Огородников В. А., Михайлов А. Л., Ерунов С. В., Антипов М. В., Федоров А. В. и др. Выброс частиц со свободной поверхности ударно-нагруженных образцов из свинца в вакуумированную и газовую среду // ЖЭТФ. 2017. Т. 152, № 6.

3. Михайлов А. Л., Огородников В. А., Сасик В. С. и др. Экспериментально-расчетное моделирование процесса выброса частиц с ударно-нагруженной поверхности // ЖЭТФ. 2014. Т. 145, № 5.

4. Тен К. А., Прууэл Э. Р., Антипов М. В., Георгиевская А. Б., Михайлов А. Л., Спирин И. А. и др. Регистрация выброса частиц из ударно-нагруженных металлов методами синхротронного излучения // ФГВ. 2018. Т. 54, № 5. С. 103–111.

5. Антипов М. В., Утенков А. А., Юртов И. В., Огородников В. А., Михайлов А. Л. и др. Применение пьезоэлектрического метода для измерения параметров ударно-индуцированных пылевых потоков // ФГВ. 2018. Т. 54, № 5.

6. Monfared S. K., Buttler W. T., Frayer D. K., Grover M., LaLone B. M., Stevens G. D., Stone J. B., Turley W. D., and Schauer M. M.. Ejected particle size measurement using Mie scattering in high explosive driven shockwave experiments // Journal of Applied Physics 117, 2015.

7. Sorenson D. S., Pazuchanics P. D., Johnson R. P., et al. Ejecta particle size measurements from the breakup of micro-jets in vacuum and helium gas using ultraviolet in-line Fraunhofer holography AIP Conference Proceedings 1793, 2017.

8. Zuoyou Li, Zhenxiong Luo, Zhenqing Liu, et al. High-speed microjet particles measurement using in-line pulsed holography. Journal of Applied Physics 108, 2010.

9. Бразовский В. В., Евстигнеев В. В., Кашкаров Г. М., Тубалов Н. П. Исследование методом цифровой голографии процессов очистки отработанных газов // Известия Томского политехнического университета. Физика. 2008. Т. 313, № 3. С. 107–112.

10. Демин В. В., Ольшукоев А. С., Наумова Е. Ю., Мельник Н. Г. Цифровая голография планктона // Оптика атмосферы и океана. 2008. Т. 21, № 12. С. 1089–1095.

11. Kazuo Ohmi, Sanjeeb Prasad Panday and Basanta Joshi Digital holography based particle tracking velocimetry. 10<sup>th</sup> International Conference on Fluid Control, Measurements, and Visualization (FLUCOME 2009). Moscow, Russia. August 17–21, 2009.

12. Castañeda R., Piedrahita-Quintero P., and Garcia-Sucerquia J. Image processing and computing for digital holography with ImageJ // Opt. Pura y Apl. 2015. Vol. 48. P. 77–84.