

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ ЧАСТИЦ, ВЫБРОШЕННЫХ С УДАРНО-НАГРУЖЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ ИХ ТОРМОЖЕНИИ В ГАЗОВОЙ СРЕДЕ

*A. B. Федоров<sup>\*</sup>, И. С. Гнутов, А. О. Яговкин<sup>a</sup>*

<sup>a</sup> Российский федеральный ядерный центр ВНИИЭФ  
607190, Саров, Нижегородская обл., Россия

Поступила в редакцию 27 июня 2017 г.

Исследовано ударно-волновое пыление поверхности свинца. С помощью лазерного интерферометрического метода PDV определена динамика движения частиц, а по закону торможения в газовой среде — их размер.

DOI: 10.7868/S004445101801008X

## 1. ВВЕДЕНИЕ

При ударно-волновом нагружении металлов происходит выброс частиц со свободной поверхности. Этот процесс называют ударно-волновым пылением. При исследовании ударно-волнового пыления необходимо знать размер частиц, движущихся в газовой среде. Ряд методов позволяет непосредственно измерять размер частиц. Так, например, в работе [1] разработан импульсный голограммический метод, который позволяет регистрировать частицы размером более 1 мкм. При исследовании пыления используются также теневые оптические методики. Минимальный размер частиц, определяемый с их помощью, составляет 3–5 мкм [2]. В облаке пыли по данным работ [1, 2] присутствуют частицы разного размера (от субмикронных до ста микрон).

Цель настоящей работы — создание нового метода оценки размера частиц (размером до 0.3 мкм) исходя из зависимостей скорости их движения от времени. Для этого применен современный лазерный высокочувствительный интерферометрический метод PDV (photon Doppler velocimetry) [3–7], с помощью которого можно непрерывно регистрировать как треки отдельных частиц, так и спектр скоростей облака частиц. Чувствительность других лазерных методов (VISAR, ORVIS, Фабри–Перо) не позволяет регистрировать скорости и размер частиц. Используя зарегистрированные спектрограммы скоро-

сти, по известному закону торможения частиц в газе [8, 9] проводились оценки размеров частиц, выброшенных со свободной поверхности при ударно-волновом пылении свинца.

## 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРА ЧАСТИЦ ПРИ ИХ ТОРМОЖЕНИИ В ГАЗЕ

Закон торможения частиц в газе имеет следующий вид [8]:

$$f_D = ma = m \frac{dW}{dt} = \frac{1}{2} C_d \rho_1 S_m W(t)^2, \quad (1)$$

где  $C_d$  — коэффициент торможения частицы в газе,  $\rho_1$  — плотность газа,  $S_m$  — площадь миделева сечения частицы,  $W(t)$  — скорость частиц. Считаем, что частицы имеют сферическую форму. Тогда для массы и миделева сечения частиц имеем соотношения

$$m = \frac{1}{6} \rho_0 \pi d^3, \quad (2)$$

$$S_m = \frac{\pi d^2}{4}, \quad (3)$$

где  $\rho_0$  — плотность металла,  $d$  — диаметр частиц.

Обозначая через  $W_0$  начальную скорость частиц при  $t = 0$  (время выхода ударной волны на свободную поверхность), уравнение (1) после интегрирования приводим к виду

$$W(t) = \left[ \frac{k}{d} t + \frac{1}{W_0} \right]^{-1}, \quad (4)$$

где  $k = 3C_d\rho_1/4\rho_0$ .

\* E-mail: ifvpostmaster@vniief.ru

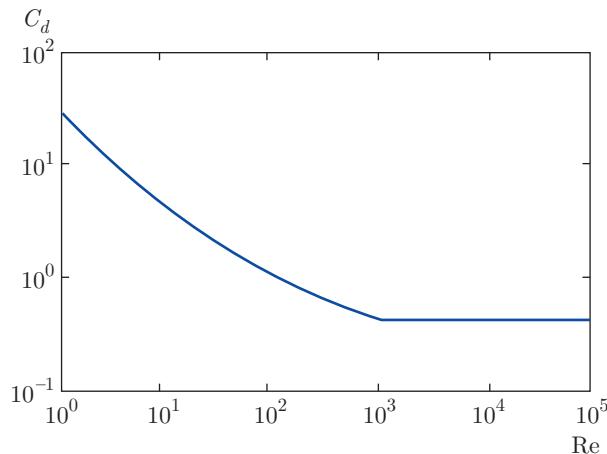


Рис. 1. Зависимость коэффициента торможения  $C_d$  от числа Рейнольдса

Число Рейнольдса — безразмерную величину, являющуюся одной из основных характеристик течения вязкой жидкости и равную отношению сил инерции к силам вязкости, определяем по формуле

$$\text{Re} = \frac{\rho_1 W d}{\mu_{\text{gas}}}, \quad (5)$$

где  $\mu_{\text{gas}}$  — динамическая вязкость газа.

Значение коэффициента  $C_d$  зависит от числа Рейнольдса следующим образом [8, 9]:

$$C_d = \begin{cases} \frac{C_1}{\text{Re}} + \frac{C_2}{\sqrt[3]{\text{Re}}}, & \text{Re} \leq 1000, \\ C_0, & \text{Re} > 1000, \end{cases} \quad (6)$$

$C_0 = 0.424$ ,  $C_1 = 24$ ,  $C_2 = 4$ .

На рис. 1 представлена зависимость коэффициента торможения  $C_d$  от числа Рейнольдса [9]. Видно, что при увеличении числа Рейнольдса от 1 до 1000 коэффициент  $C_d$  уменьшается в 70 раз от 28 до 0.424. Из формулы (6) следует, что коэффициент  $C_d$  при торможении частиц изменяется вместе с числом Рейнольдса.

В работах [9, 10] приведена формула, в которой учтено изменение коэффициента  $C_d$  при изменении числа Рейнольдса:

$$W(t) = \left[ \left( W_0^{-2/3} + D^{-2/3} \right) \exp \left( \frac{2}{3} B(t - t_0) \right) - D^{-2/3} \right]^{-3/2}, \quad (7)$$

где

$$B = \frac{18\mu_{\text{gas}}}{\rho_0 d^2}, \quad D = 6^{3/2} \frac{\mu_{\text{gas}}}{\rho_{\text{gas}} d}.$$

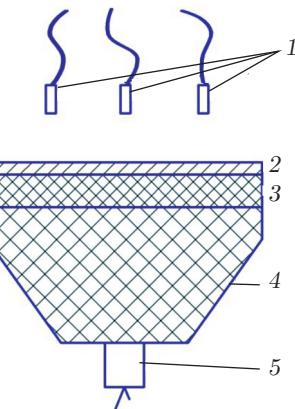


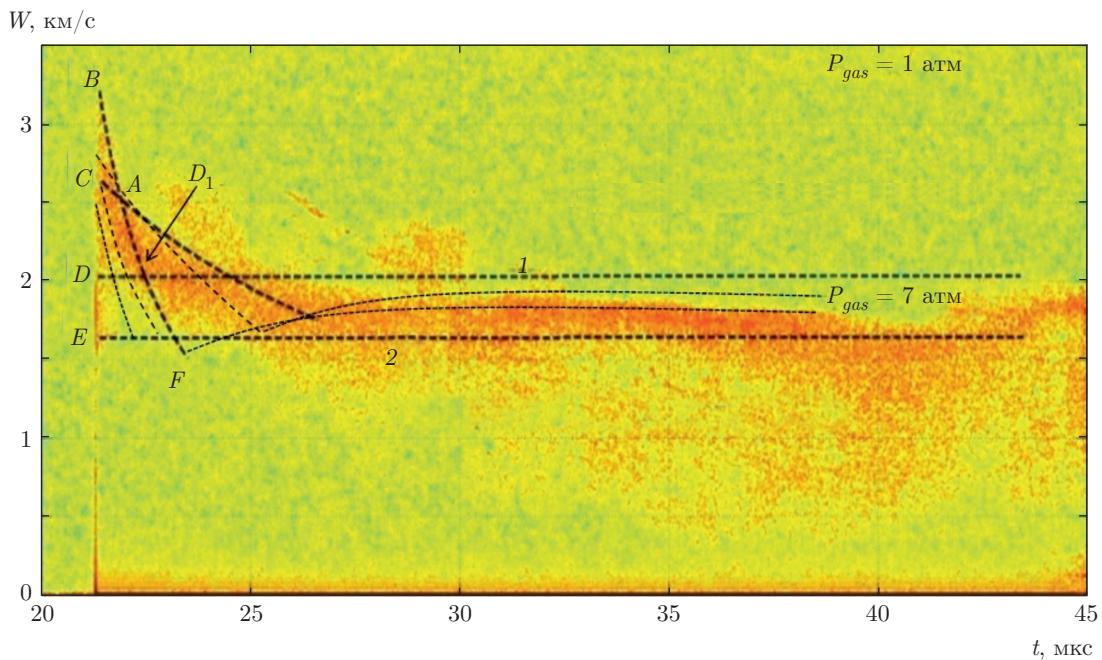
Рис. 2. Схема экспериментальной сборки: 1 — датчики PDV; 2 — образец свинца (диаметр 90 мм, толщина 2 мм); 3 — шашка ВВ (диаметр 90 мм, толщина 10–40 мм); 4 — плосковолновой генератор (диаметр 90 мм); 5 — электродетонатор

В настоящей работе размер частиц при  $\text{Re} > 1000$  определялся по формуле (4) с коэффициентом  $C_d = 0.424$ , а при  $\text{Re} \leq 1000$  — по формуле (7). Для этого в формулах (4) или (7) выбирались значения размеров  $d$  частицы таким образом, чтобы кривая торможения частиц совпадала с зарегистрированной экспериментальной кривой  $W(t)$ .

### 3. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На рис. 2 представлена схема экспериментов. В экспериментах с образцами свинца (диаметр 90 мм, толщина 2 мм, шероховатость Ra 5) выброс частиц происходил при выходе ударной волны (УВ) на свободную поверхность. УВ создавалась подрывом шашки взрывчатого вещества (ВВ) на основе пластифицированного октогена (диаметр 90 мм, толщина 10–40 мм) со стороны тыльной поверхности образца. Для создания в заряде ВВ плоской детонационной волны использовался плосковолновой генератор. Регистрация скоростей вылетевших с поверхности частиц осуществлялась с помощью методики PDV [5–7].

Запись скорости в одном эксперименте происходила по нескольким каналам регистрации. Для создания в образцах из свинца различного давления нагружения (9–31 ГПа) варьировалась толщина шашки ВВ. В области давлений  $P \leq 25$  ГПа материал оставался в твердом состоянии, при  $P > 25$  ГПа начиналось плавление свинца на волне разгрузки [5, 7]. Частицы во всех экспериментах тормозились в воздухе при нормальном давлении.



**Рис. 3.** (В цвете онлайн) Пример спектрограммы поля торможения частиц: 1 — скорость УВ в газе  $D_{gas}$ ; 2 — скорость свободной поверхности  $W_{FS}$

#### 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 3 для одного из опытов представлена картина образования поля скоростей и кривые торможения частиц свинца. В данном эксперименте зарегистрирована скорость свободной поверхности  $W_{FS} = 1.7$  км/с ( $P_{Рв} = 31$  ГПа, скорость УВ в газе  $D_{gas} = 2$  км/с). В данном опыте свинец находится в частично расплавленном состоянии. Параметры ударных волн в образцах свинца определялись исходя из зарегистрированных скоростей  $W_{FS}$ . Скорость воздушной УВ определялась из данных работы [11] при известной массовой скорости газа, равной  $W_{FS}$  (скорости поршня). На рис. 3 нанесены характерные кривые торможения частиц, скорость свободной поверхности и скорость воздушной УВ. Треки частиц со скоростями, которые выше скорости воздушной УВ в газе, соответствуют участку  $BD$ , треки скоростей частиц, которые тормозятся в сжатом УВ газе (в воздушной подушке) соответствуют участку  $DE$ . На начальном участке спектрограммы (рис. 3) для примера представлены две огибающие поля скоростей для частиц разного размера, выходящие из точек  $B$  и  $C$  (кривые пересекаются в точке  $A$ ).

Кратко опишем образование перегибов на кривых торможения частиц<sup>1)</sup>. Для примера возьмем

кривую  $BF$  на рис. 3. На участке  $BD_1$  скорость частиц выше скорости воздушной УВ, и частицы обгоняют ее. На участке  $D_1F$  скорость воздушной УВ выше скорости частиц, и в некоторый момент времени (в точке  $F$ ) воздушная волна догоняет частицы, и они из области покоящегося газа попадают в область сжатого газа. После этого торможение частиц сменяется ускорением. На всех кривых торможения частиц в момент, когда воздушная УВ догоняет частицы газа, также фиксируются изломы. В конце спектрограммы видно, что частицы собираются в узкой области в непосредственной близости от свободной поверхности.

В ряде опытов со свинцом на фоне поля скоростей удалось зафиксировать треки скоростей отдельных частиц. Данные треки регистрируются, как правило, при малой плотности пылевого облака. В опыте №1 скорость свободной поверхности составила  $W_{FS} = 0.67$  км/с ( $P_{Рв} = 9.5$  ГПа,  $D_{gas} = 0.94$  км/с). Кривые торможения для четырех частиц разного размера представлены на рис. 4. Начальная скорость частиц при выходе УВ на свободную поверхность составляет 1.4–1.6 км/с. По закону торможения для данных треков скоростей размер частиц составил  $d = 1.6, 1.9, 2.1, 2.4$  мкм. Частицы, начальная скорость которых выше 1.6 км/с, имеют меньший размер, их кривые торможения имеют бо-

<sup>1)</sup> В. С. Нефедов, частное сообщение.

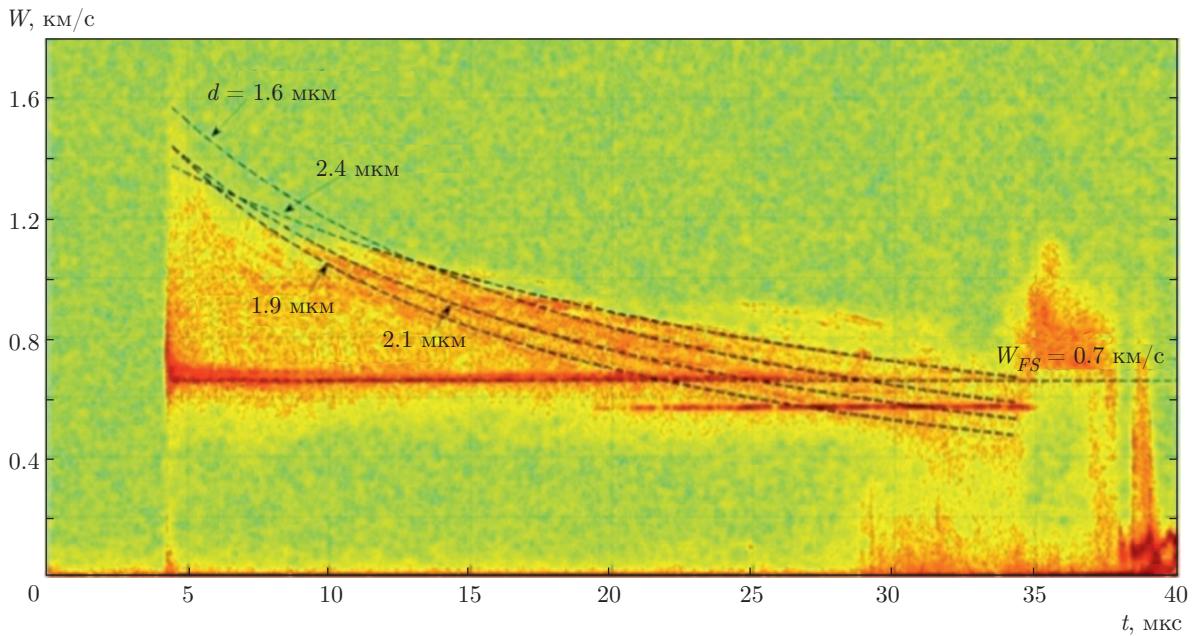


Рис. 4. (В цвете онлайн) Спектрограмма опыта №1 (на этом и других рисунках около кривых приведены размеры частиц)

лее крутой спад и лежат внутри облака скоростей частиц.

На рис. 4 видно, что трек скоростей частиц размером 2.4 мкм хорошо совпадает с верхней огибающей поля скоростей частиц. Будем использовать этот факт при оценке размеров частиц по огибающей поля скорости в опытах, где треки скоростей частиц не зарегистрированы.

В опыте №2 зафиксирована скорость свободной поверхности  $W_{FS} = 0.81$  км/с ( $P_{Pb} = 12$  ГПа,  $D_{gas} = 1.1$  км/с). На рис. 5 представлены три трека скоростей, и им соответствуют размеры частиц  $d = 1.2, 1.7, 1.8$  мкм.

В опытах №3, №4, №5 треки скоростей частиц не зафиксированы. В опыте №3 зарегистрирована скорость свободной поверхности  $W_{FS} = 1$  км/с ( $P_{Pb} = 14$  ГПа,  $D_{gas} = 1.27$  км/с). Спектрограмма эксперимента представлена на рис. 6. По двум огибающим облакам скоростей частиц сделаны оценки размеров частиц ( $d = 1.4$  мкм и  $d = 0.7$  мкм), с начальными скоростями 1.8 и 2.05 км/с, причем начальный участок торможения (примерно 0.6 мкс) позволяет определить размер мелких (0.7 мкм) частиц. Это обычно трудно сделать, поскольку огибающая кривых торможения мелких частиц может быть зарегистрирована в течение очень короткого периода в начале спектрограммы. Из данных работ [1, 2] следует, что в пылевом облаке должны присутствовать также крупные частицы размером 1–100 мкм, но та-

кие частицы имеют небольшую скорость, близкую к скорости свободной поверхности, и на фоне всего облака скоростей частиц их выделить невозможно. Таким образом, в настоящей работе в основном регистрировались размеры высокоскоростных мелких частиц.

На рис. 7 представлена спектрограмма опыта №4, в котором скорость свободной поверхности составила  $W_{FS} = 1.63$  км/с ( $P_{Pb} = 29$  ГПа,  $D_{gas} = 1.95$  км/с); давление нагружения выше точки плавления свинца на волне разгрузки. Кривым торможения соответствуют частицы размерами  $d = 1.4$  мкм и  $d = 2$  мкм. Частицы размером 2 мкм двигаются со скоростью, меньшей  $D_{gas}$  и, следовательно, тормозятся в воздухе скжатом УВ. В этом случае при массовой скорости газа  $U_{gas} = 1.63$  км/с в формулах (4) и (7) берется разность скоростей частиц и газа. Следует отметить, что из данных наших экспериментов [5, 7] и из данных работ [1, 2] в случае ударно-волнового пыления металлов размер жидких частиц, как правило, не превышал нескольких микрометров.

На рис. 8 представлены спектрограммы опыта №5, в котором скорость свободной поверхности  $W_{FS} = 1.55$  км/с ( $P_{Pb} = 27.5$  ГПа,  $D_{gas} = 1.89$  км/с). Приведены кривые торможения, им соответствуют размеры частиц  $d = 1.9$  мкм и  $d = 18$  мкм.

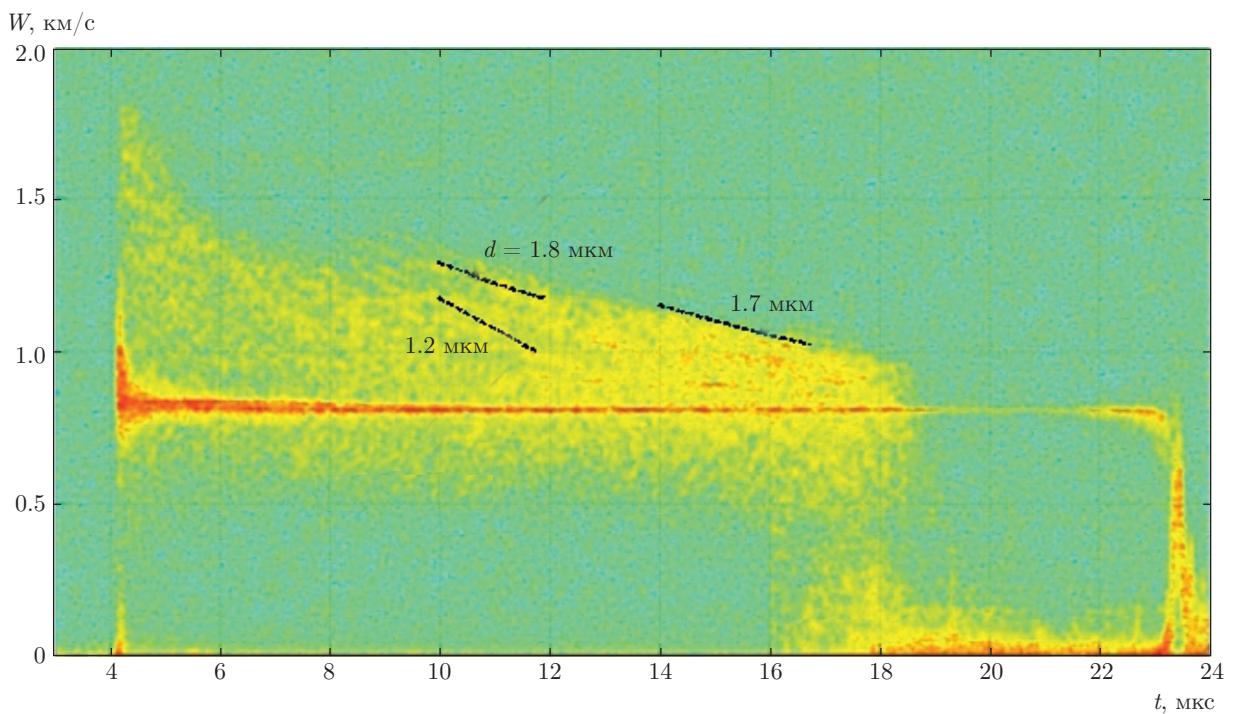


Рис. 5. (В цвете онлайн) Спектрограмма опыта № 2

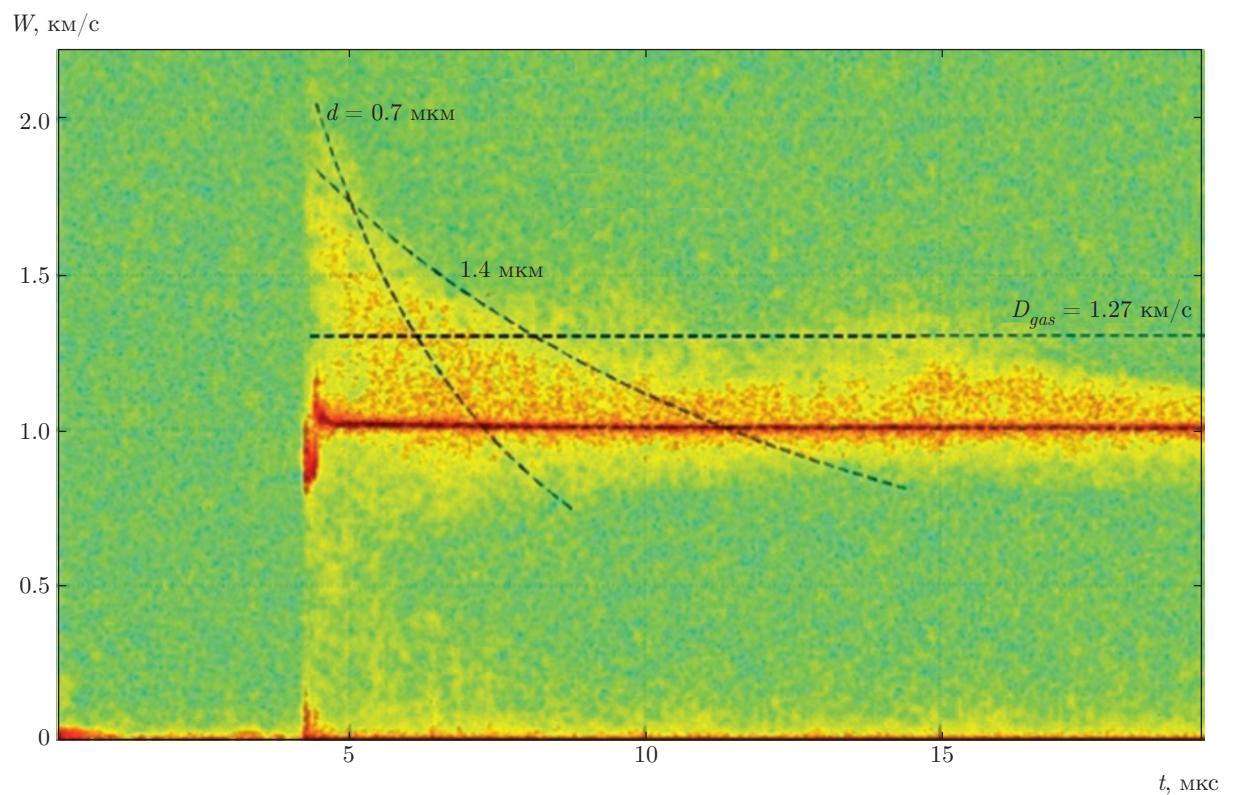


Рис. 6. (В цвете онлайн) Спектрограмма опыта № 3

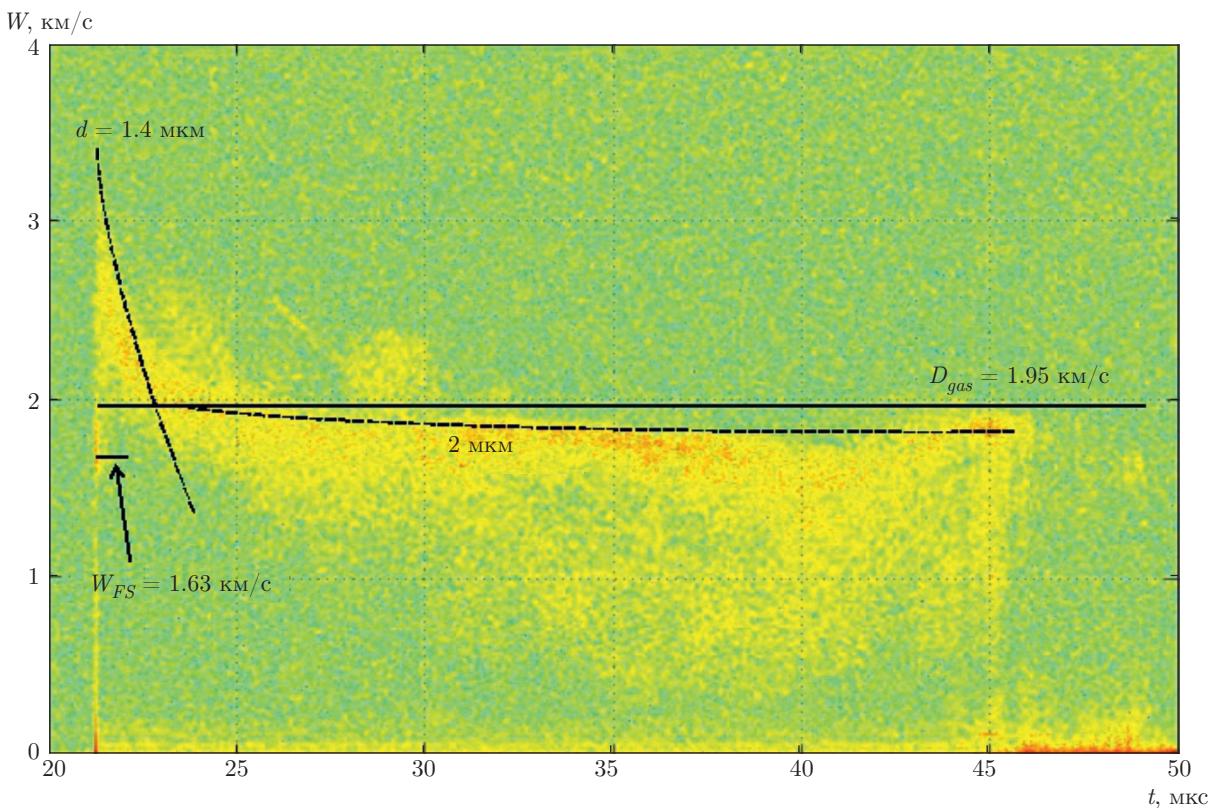


Рис. 7. (В цвете онлайн) Спектрограмма опыта № 4

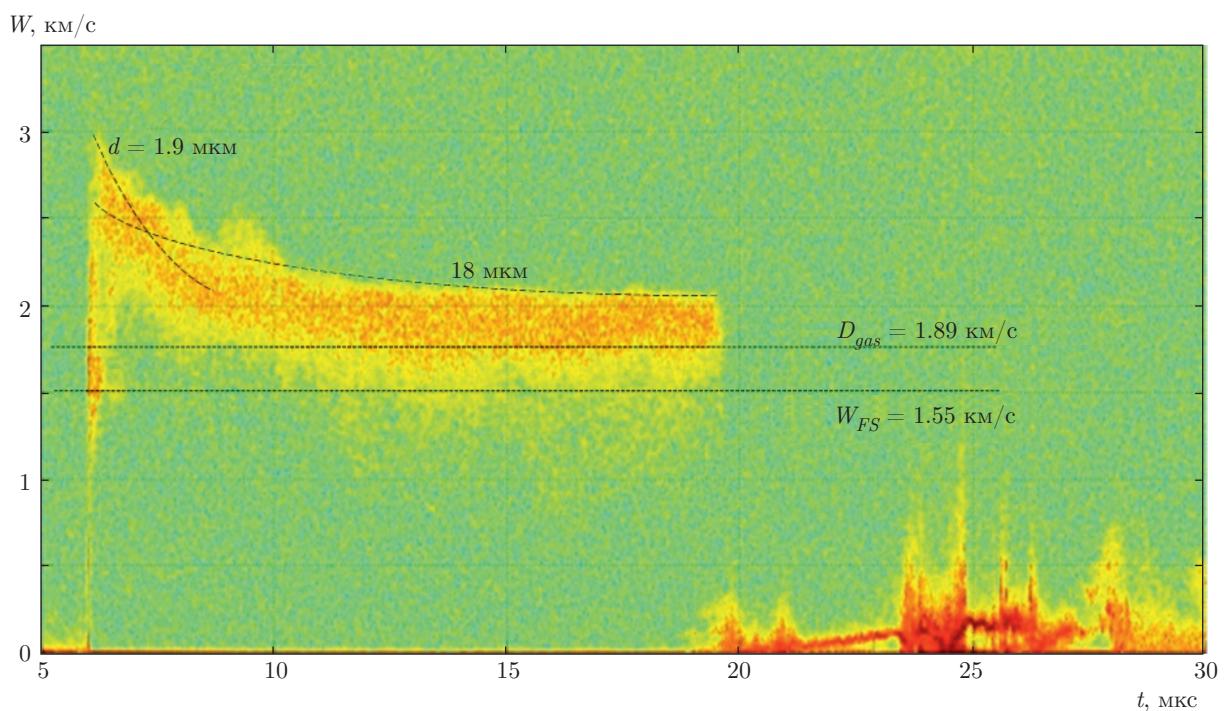


Рис. 8. Спектрограмма опыта № 5

Датчик метода PDV в данном опыте регистрировал скорость особой точки (центр образца), где при токарной обработке образовывалась кумулятивная выемка из которой происходил выброс струи. Вследствие этого крупные частицы размером 18 мкм (рис. 8) имеют скорость больше, чем скорость воздушной УВ.

Зарегистрированные методом PDV размеры частиц хорошо совпадают с данными, полученными другими методами. Так, например, в работе [6] на-ми определялся размер частиц и струй при ударно-волновом нагружении воды. В работе [2] в экспериментах, выполненных в аналогичной постановке, приведены результаты опытов, проведенных с помощью теневой оптической методики. Размер струй в работе [2] составил 7–19 мкм, что практически совпадает с нашими результатами (5–25 мкм).

Следует отметить, что при высокой плотности потока частиц метод PDV не может зарегистрировать крупные (размером в десятки микрометров) частицы, поскольку они в большинстве случаев имеют скорость, близкую к скорости свободной поверхности и их практически невозможно выделить из облака скоростей частиц. Также трудно выделить субмикронные частицы, которые тормозятся быстрее всех и треки скоростей которых также находятся внутри облака скоростей частиц. В монографии [12] показано, что металлические частицы только раз-мером более  $\lambda/5$  (где  $\lambda$  — длина волны излучения лазера) хорошо отражают это излучение. Для ме-тода PDV ( $\lambda = 1.55$  мкм) эта величина составляет 0.3 мкм, т. е. при  $d < 0.3$  мкм эффективное поверх-ностное рассеяние излучения начинает резко умень-шаться (частицы перестают отражать свет) и опре-делить размер частиц методом PDV невозможно.

## 5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В работе [9] по зарегистрированным трекам скро-ростей определялся размер калиброванных частиц золота и меди, которые тормозились в различных газах при разных давлениях. Треки скоростей были зафиксированы благодаря низкой плотности пото-ка частиц. На основании десятков треков скоростей, полученных в нескольких экспериментах, построены гистограммы распределения частиц по размеру, которые сравнивались с гистограммами распределе-ния частиц, полученными с помощью грануломет-рии. Автор работы [9] отмечают хорошее совпаде-ние для частиц со средними размерами 4, 8, 10 мкм. Например, для частиц золота со средним размером по гранулометрии 4 мкм (от 3 до 5.5 мкм) средний раз-мер по закону торможения составил 4.9 мкм, а для частиц золота со средним размером по грану-лометрии 8 мкм (от 5.5 до 9 мкм) — 7.2 мкм. Вид-но, что отличие не превышает 20 %. Для частиц со средним размером по гранулометрии 1.5 мкм (от 0.7 до 2 мкм, причем 5 % частиц имели раз-мер более 2 мкм) результаты по кривым торможения оказались выше и составили 2.7 мкм (от 2.3 до 3.2 мкм). Автор работы [9] объясняет это тем, что треки скро-ростей принадлежат систематически самим круп-ным элементам облака, в то время как мелкие час-тицы тормозятся наиболее быстро и не выделяются из остального облака. Таким образом, в работе [9] экспериментально показана правомерность опре-деления размера частиц по закону их торможения.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью метода PDV проведены эксперимен-ты по регистрации спектра скоростей облака частиц при ударно-волновом нагружении свинца в област-и давлений 9–31 ГПа. Для определения характерно-го раз-мера частиц использовался закон торможе-ния частиц в воздухе. В серии опытов определялась скро-ость потока частиц, раз-мер которых составил 0.7–18 мкм. Метод PDV при длине волны излуче-ния 1.55 мкм может регистрировать только скро-ость частиц раз-мером более 0.3 мкм.

## ЛИТЕРАТУРА

1. D. S. Sorenson, P. Pazuchanics, and R. P. John-son, Los Alamos National Laboratory Report LA-UR-14-24722 (2014).
2. Н. В. Невмержицкий и др., в Сб. докладов, XV Харитоновские чтения, Саров (2013), с. 655.
3. D. B. Holtkamp, in Internat. Conf. of Megagauss Magnetic, Field Generation (2007).
4. O. T. Strand, D. R. Goosman, C. Martinez, and T. L. Whitworth, Rev. Sci. Instrum. **77**, 083108 (2006).
5. А. В. Федоров, А. Л. Михайлов, С. А. Финюшин и др., ЖЭТФ **149**, 792 (2016).

6. А. В. Федоров, А. Л. Михайлов, С. А. Финюшин и др., Физика Горения и Взрыва **52**, 122 (2016).
7. А. В. Федоров, А. Л. Михайлов, Л. К. Антонюк, И. В. Шмелев, Физика Горения и Взрыва **52**, 115 (2016).
8. Л. И. Седов, *Механика сплошной среды*, Наука, Москва (1976).
9. G. Prudhomme, Thése pour obtenir le grade de docteur délivré par, Paris (2014).
10. G. Prudhomme, P. Mercier, J. Benier, and P.-A. Frugier, in *PDV Workshop*, Albuquerque (2012), p. 33.
11. С. Г. Андреев, А. В. Бабкин, Ф. А. Баум и др., в сб. *Физика взрыва*, т. 1, под ред. Л. П. Орленко, Физматлит, Москва (2002), с. 758.
12. Г. ван де Хюлст, *Рассеяние света малыми частицами*, Изд-во иностр. лит., Москва (1961).