

14. Sorenson D.S., Minich R.W., Romero J.L., Tunnell T.W., and Malone R.M., "Ejecta particle size distributions for shock-loaded Sn and Al metals," J. Appl. Phys. 92, 5830–5836 (2002).
15. Nevmerzhitskii N.V., Mikhailov A.L., Raevsky V.A., Sasik V.S. et al., "Microscopic electron-optical registration of particle ejection from free surface shocked lead," VANT: Theor. Appl. Phys., issue 3 (2010).
16. Antipov M.V., Georgievskaya A.B., Igonin V.V., Lebedev A.I. et al., "The model of particle ejection from a metal free surface," Proc. Inter. Conf. "XVII Khariton's topical scientific reading," pp. 666-674 (2013).
17. Asay J.R., "Thick-plate technique for measuring ejecta from shock surfaces," J. Appl. Phys, 49(12), 1978.
18. Zhernokletov M.V., Zubarev V.N., Telegin G.S., "Expansion isentropes of the explosion products of condensed explosives," J. Appl. Mech. Tech Phys, Vol. 10, Issue 4, pp. 650-655 (1969).
19. Mie G., "Zur kinetischen theorie der einatomigen korper," Ann. Phys. (Berlin, Ger.) 316, 657–697 (1903).
20. Gruneisen G., "Theorie des festen zustandes einatomiger elemente," Ann. Phys. (Berlin, Ger.) 344, 257–306 (1912).
21. Kanel G.I., Savinykh A.S., Garkushin G.B., Razorenov S.V., "Dynamic strength of tin and lead melts," JETP Lett., Vol 102, Issue 8, pp. 615–619 (2015).
22. Georgievskaya A.B. and Raevsky V.A., "Influence of shock wave profile on ejecta distribution by sizes (calculated and theoretical investigations)". Proc. Inter. Conf. "XVII Khariton's topical scientific reading," pp. 709-716 (2015).

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

А.В. Федоров, И.С. Гнутов, А.О. Яговкин

РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия

При ударно-волновом нагружении металлов происходит выброс частиц со свободной поверхности, этот процесс называют ударно-волновым пылением. При исследовании пыления различными методами определяются распределение массы и плотности потока частиц, скорость частиц, их размер и т.п. В настоящей работе исследовалось ударно-волновое пыление поверхности свинца. С помощью лазерного интерферометрического метода PDV определялись динамика движения частиц, а по закону торможения в газовой среде их размер.

Введение

При исследовании ударно-волнового пыления необходимо знать размер частиц, движущихся в газовой среде. Ряд методов позволяет непосредственно измерять размер частиц. Так, например, в [1] разработан импульсный голографический метод, который позволяет регистрировать частицы размером ≥ 1 мкм. При исследовании пыления используется 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).

Целью настоящей работы является разработка метода оценки размера частиц исходя из зависимостей их скорости движения от времени, регистрируемых методом PDV. Лазерный интерферометрический метод PDV [3-7] позволяет непрерывно регистрировать спектр скоростей облака частиц и их торможение в газовой среде. По известному закону торможения частиц в газе [8,9] и спектрограммам скорости проводились оценки размеров частиц, выброшенных со свободной поверхности при ударно-волновом пылении свинца.

1. 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 сопротивления частицы, ρ_1 – плотность газа, S_m – площадь миделева сечения частицы $W(t)$ – скорость частиц. Считая, что частицы имеют сферическую форму, 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 ρ_0 – плотность металла, d – диаметр частиц.

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

$$W(t) = \frac{1}{\frac{k}{d}t + \frac{1}{W_0}} \quad (4)$$

где коэффициент $k = \frac{3}{4} \frac{C_D \rho_1}{\rho_0}$.

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

формуле:

$$Re = \frac{\rho_1 W d}{\mu_{газа}} \quad (5)$$

где $\mu_{газа}$ – динамическая вязкость газа.

Значение коэффициента C_d зависит от числа Рейнольдса (Re) следующим образом[8,9]:

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

$$C_0 = 0,424, C_1 = 24, C_2 = 4.$$

На рисунке 1 представлена зависимость коэффициента торможения C_d от числа Рейнольдса [9].

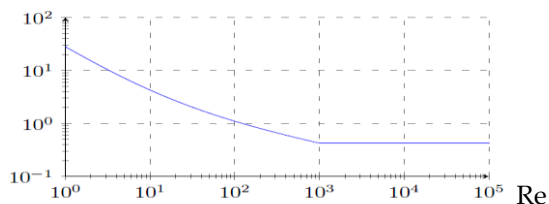


Рисунок 1. Зависимость коэффициента торможения C_d от числа Рейнольдса

Из рисунка 1 видно, что при увеличении числа Рейнольдса от 1 до 1000 коэффициент C_d уменьшается в 70 раз от 28 до 0,424. Из данных формулы (6) следует, что, коэффициент C_d при торможении частиц изменяется вместе с числом Рейнольдса,

В работе [9] приведена формула, где учтено изменение коэффициента C_d при изменении числа Рейнольдса.

$$W(t) = \frac{1}{\left[(W_0^{-2/3} + D^{-2/3}) \exp\left(\frac{2}{3} B(t-t_0)\right) - D^{-2/3} \right]^{3/2}} \quad (7)$$

где $B = \frac{18\mu_{\text{заза}}}{\rho_0 d^2}$ и $D = 6^{3/2} \frac{\mu_{\text{заза}}}{\rho_{\text{заза}} d}$

В настоящей работе размер частиц при $Re > 1000$ определялся по формуле (4) с коэффициентом $C_d = 0,424$, а при $Re \leq 1000$ по формуле (7). Для этого в формулах (4) или (7) выбиралось значение размеров частицы d таким образом, чтобы кривая их торможения совпадала с зарегистрированной экспериментальной кривой $W(t)$.

2. Постановка экспериментов

На рисунке 2 представлена схема постановки экспериментов. В экспериментах с образцами свинца ($\varnothing 90 \times 2$ мм, шероховатость Ra 5) выброс частиц происходил при выходе ударной волны (УВ) на свободную поверхность (СП). Ударная волна создавалась подрывом шашки ВВ на основе пластифицированного ($\varnothing 90 \times 10,40$ мм) со стороны тыльной поверхности образца. Для создания в заряде ВВ плоской детонационной волны использовался плосковолновой генератор. Регистрация скорости вылетевших с поверхности частиц осуществлялась коллиматорами методики PDV.

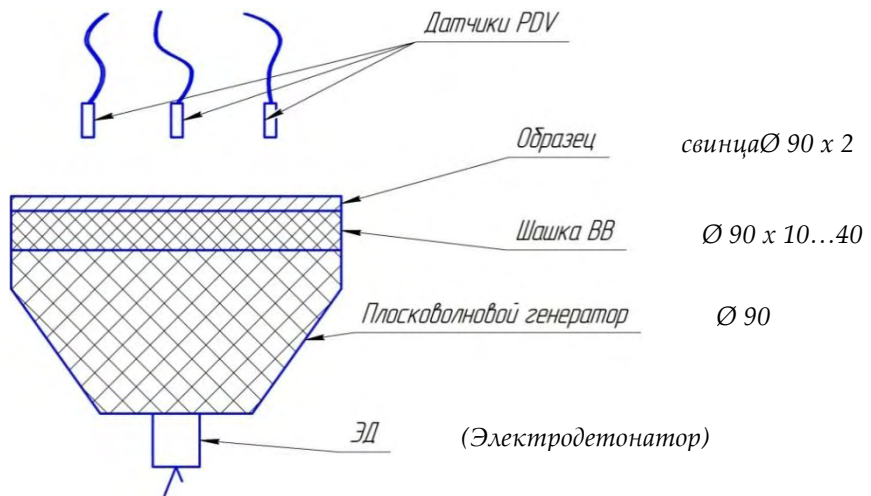


Рисунок 2. Схема экспериментальной сборки

Запись скорости в одном эксперименте происходила по нескольким каналам регистрации. Для создания в образцах из свинца различного давления нагружения варьировалась толщина шашки ВВ (10-40 мм). 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.

3. Экспериментальные результаты

На рисунке 3.1 для одного из опытов представлена картина образования поля скоростей и кривые торможения частиц свинца. В данном эксперименте зарегистрирована скорость СП $W_{\text{СП}} = 1,7$ км/с ($P_{\text{РВ}} = 31$ ГПа, $D_{\text{ВУВ}} = 2$ км/с). В данном опыте свинец находится в частично расплавленном состоянии. Параметры ударных волн в образце свинца определялись исходя из зарегистрированных скоростей

W_{сп}. Скорость воздушной ударной волны (ВУВ) определялась из данных [10] при известной массовой скорости газа, равной W_{сп} (скорости поршня). На рисунке 3.1 нанесены характерные кривые торможения частиц, скорость СП и скорость ВУВ. Треки скоростей частиц, которые выше скорости ВУВ в газе соответствуют участку BD, треки скорости частиц, которые тормозятся в сжатом УВ газе (в воздушной подушке) соответствуют участку DE. На начальном участке спектрограммы (рисунок 3.1) для примера представлены две огибающие поля скоростей для частиц разного размера, выходящие из точек В и С (кривые пересекаются в точке А).

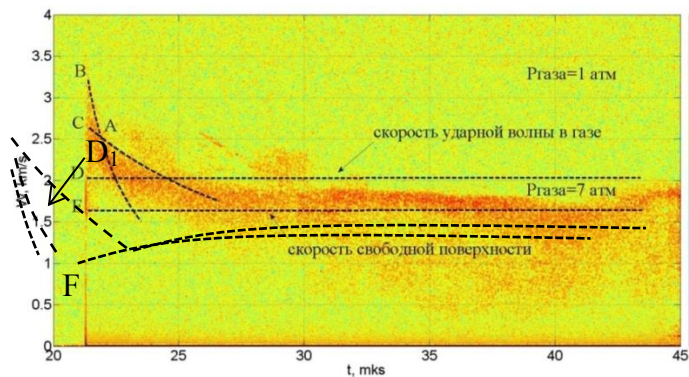


Рисунок 3.1. Пример спектрограммы поля торможения частиц

Кратко опишем образование перегибов на кривых торможения частиц. Для примера возьмем кривую BF. На участке BD₁ скорость частиц выше скорости ВУВ и частицы обгоняют её. На участке D₁F скорость ВУВ 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 догона ВУВ также фиксируются изломы. В конце спектрограммы видно, что частицы собираются в узкой области в непосредственной близости от СП.

В ряде опытов со свинцом на фоне поля скоростей удалось зарегистрировать треки скоростей отдельных частиц. Данные треки регистрируются, как правило, при малой плотности пылевого облака. В опыте № 1 зарегистрирована скорость СП W_{сп} = 0,67 км/с (P_{рб} = 9,5 ГПа, D_{ВУВ} = 0,94 км/с). Кривые торможения для четырех частиц представлены на рисунке 3.2. Начальная скорость частиц при выходе УВ на СП составляет 1,4-1,6 км/с. По закону торможения для данных треков скоростей размер частиц составил d=1,6 мкм, 1,9 мкм, 2,1 мкм, 2,4 мкм. Частицы, начальная скорость которых выше 1,6 км/с имеют меньший размер, их кривые торможения имеют более крутой спад и лежат внутри облака скоростей частиц.

Из рисунка 3.2 видно, что трек скоростей частиц размером 2,4 мкм хорошо совпадают с верхней огибающей поля скоростей частиц. Мы будем использовать этот факт при оценке размеров частиц по огибающей поля скорости в опытах, где треки скоростей частиц не зарегистрированы.

В опыте № 2 зарегистрирована скорость СП W_{сп} = 0,81 км/с (P_{рб} = 12 ГПа, D_{ВУВ} = 1,1 км/с). На рисунке 3.4 представлено три трека скорости и им соответствует размер частиц d=1,2 мкм, 1,7 мкм, 1,8 мкм.

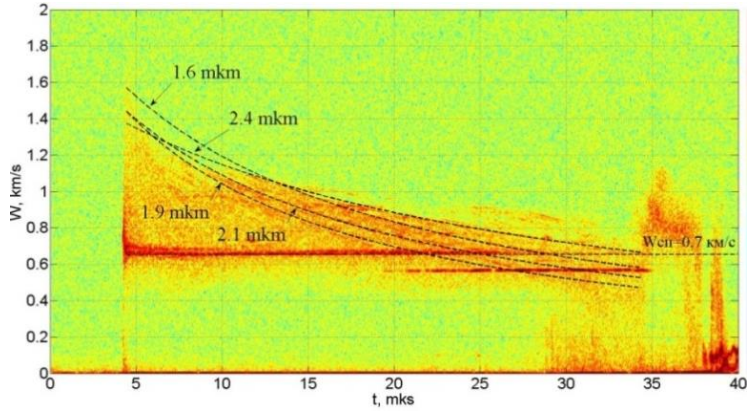


Рисунок 3.2. Спектрограмма опыта №1

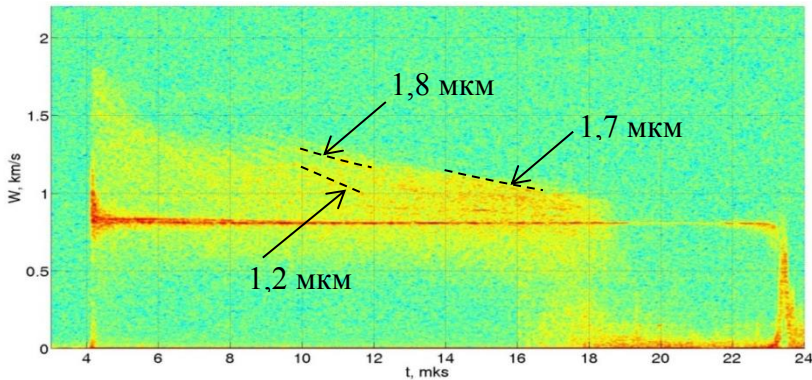


Рисунок 3.4. Спектрограмма опыта № 2

В опытах №3, №4, №5 треки скоростей частиц не зарегистрированы. В опыте № 3 зарегистрирована скорость СП $W_{СП} = 1$ км/с, ($P=14$ ГПа, $D_{ВУВ} = 1,27$ км/с.). Спектрограмма эксперимента представлена на рисунке 3.5. По двум огибающим облака скоростей частиц сделаны оценки размеров частиц ($d=1,4$ мкм и $0,7$ мкм), с начальными скоростями $1,8$ и $2,05$ км/с., причем начальный участок торможения ($\approx 0,6$ мкс) позволяет зарегистрировать размер мелких ($0,7$ мкм) частиц. Это обычно трудно сделать, т.к. огибающая кривых торможения мелких частиц может быть зарегистрирована в течении очень короткого периода в начале спектрограммы. Исходя из данных работ [1-2] следует, что в пылевом облаке должны присутствовать также крупные частицы размером $1-100$ мкм, но данные частицы имеют небольшую скорость, близкую к скорости СП и на фоне всего облака скоростей частиц их выделить невозможно, таким образом, в настоящей работе в основном регистрировался размер высокоскоростных частиц.

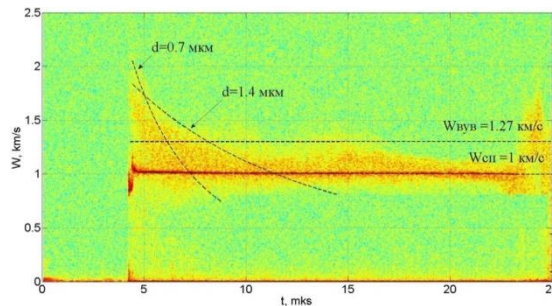


Рисунок 3.5. Спектрограмма опыта №3

На рисунке 3.6 представлена спектрограмма опыта № 4, где скорость СП составила $W_{СП} = 1,63$ км/с ($P_{р\bar{b}} = 29$ ГПа, $D_{ВУВ} = 1,95$ км/с) и давление нагружения выше точки плавления свинца на волне разгрузки. Кривым торможения соответствуют частицы размером $d=1,4$ мкм и $d=2$ мкм. Частицы размером 2 мкм движутся со скоростью меньшей $D_{ВУВ}$ и, следовательно, тормозятся в

воздухе сжатом ударной волной. В этом случае при массовой скорости газа ($U_{\text{ВУВ}} = 1,63$ км/с) в формулах (4) и (7) берется разность скорости частиц и скорости газа. Следует отметить, что из данных наших экспериментов [5,7] и из данных работ [1,2] в случае ударноволнового пыления металлов и торможения облака в газе размер жидких частиц, как правило, не превышает нескольких микрометров.

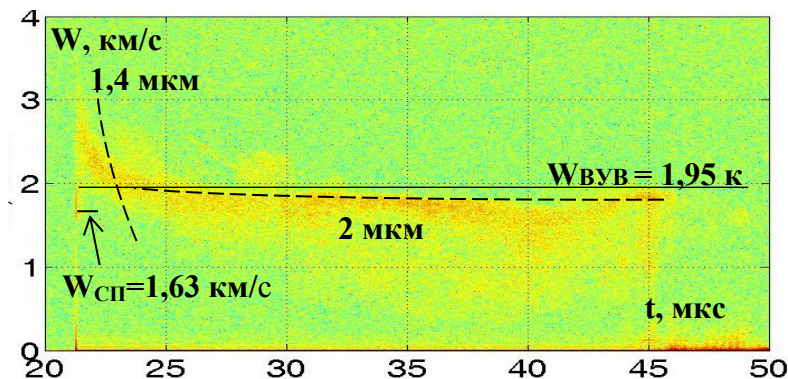


Рисунок 3.6. Спектрограмма опыта № 4

На рисунке 3.7 представлены спектрограммы опыта № 5, где скорость СП $W_{\text{СП}} = 1,55$ км/с ($P_{\text{Рь}} = 27,5$ ГПа, $D_{\text{ВУВ}} = 1,89$ км/с). Кривые торможения представлены на рисунке и им соответствует размер частиц $d=1,9$ мкм и $d=18$ мкм.

Датчик метода PDV в данном опыте регистрировал скорость особой точки (центр образца), где при токарной обработке образовывалась кумулятивная выемка из которой происходит выброс струи. В следствии этого крупные частицы размером 18 мкм (рисунок 3.7) имеют скорость больше скорости ВУВ.

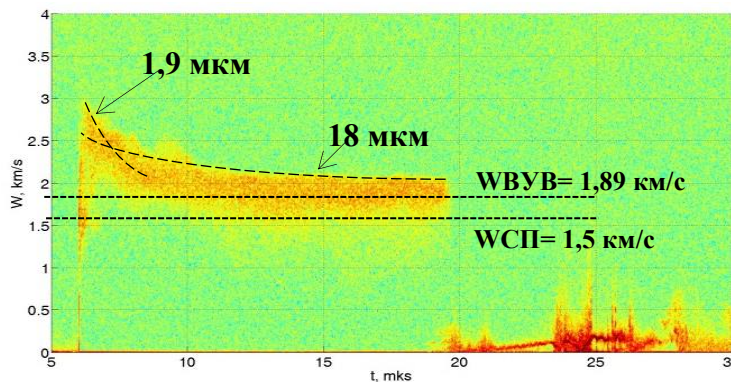


Рисунок 3.7. Спектрограмма опыта № 5

4. Обсуждение результатов

В работе [9] по зарегистрированным трекам скоростей определялся размер калиброванных частиц золота и меди, которые тормозились в различных газах при разном давлении. Треки скоростей были зарегистрированы благодаря низкой плотности потока частиц. На основании десятков треков скорости, полученных в нескольких экспериментах, построены гистограммы распределения частиц по размеру, которые сравнивались с гистограммами распределения частиц, полученными с помощью гранулометрии. Авторами отмечается хорошее совпадение для частиц со средним размером 4, 8, 10 мкм. Например для частиц золота 4 мкм (размером от 3 до 5,5 мкм) средний размер по закону торможения составил 4,9 мкм, а для частиц золота 8 мкм (размером от 5,5 до 9 мкм) средний размер составил 7,2 мкм. Видно, 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 размер >2 мкм) результаты по кривым торможения оказались выше и составили 2,7 мкм (от 2,3 до

3,2 мкм). Автор [9] объясняют это тем, что треки скорости принадлежат систематически самым крупным элементам облака, в то время, как мелкие частицы тормозятся наиболее быстро и не выделяются из остального облака. Таким образом, в работе [9] экспериментально показана правомерность определения размера частиц по их закону торможения. Следует отметить, что метод PDV не может зарегистрировать крупные (десятки микрон) частицы, т.к. они в большинстве случаев имеют скорость близкую к скорости СП и их практически невозможно выделить из облака скоростей частиц. Также трудно выделить субмикронные частицы, которые тормозятся быстрее всех и их треки скорости также находятся внутри облака скоростей частиц. В монографии [12] показано, что металлические частицы только размером более $\lambda/5$ (где λ - длина волны излучения лазера) хорошо отражают это излучение. Для метода PDV ($\lambda=1,55$ мкм) эта величина составляет 0,3 мкм, т.е. при $d < 0,3$ мкм эффективное поверхностное рассеяния излучения начинает резко падать (частицы перестают отражать свет) и определить размер частиц методом PDV невозможно.

Заключение

С помощью метода PDV проведены эксперименты по регистрации спектра скоростей облака частиц при ударно-волновом нагружении свинца до давлений 9-29 ГПа. Для определения характерного размера частиц использовался закон торможения частиц в воздухе. В серии опытов регистрировалась скорость потока частиц, размер которых составил: 0,7 – 18 мкм. Метод PDV при длине волны излучения 1,55 мкм может регистрировать скорость частиц, размером более 0,3 мкм.

Список литературы

- 1 D. S. Sorenson, P. Pazuchanics, R. P. Johnson, Los Alamos National Laboratory Report, LA-UR-14-24722 (2014).
- 2 Н.В. Невмержицкий и др. Сб. докладов XV Харитоновские чтения, Саров (2013), с. 655.
- 3 D.V. Holtkamp «Survey of Advanced Velocimetry Experiments: A Year (or Two) in the Life of Photon Doppler Velocimetry», доклад на международной конференции «MegaRayс 2007».
- 4 O.T. Strand, D.R. Goosman, C. Martinez, and T.L. Whitworth, «Rev. Sci. Instrum.», 77, pp. 083108-1 - 083108-8 (2006).
- 5 А.В. Федоров, А.Л. Михайлов, С.А. Финюшин, Д.А. Калашников и др., Регистрация параметров множественного откола и внутренней структуры облака частиц при ударно-волновом нагружении металлов, Журнал Экспериментальной и теоретической Физики, т. 149, выпуск 2, 2016 г.
- 6 А.В. Федоров, А.Л. Михайлов, С.А. Финюшин, Д.А. Калашников и др., Регистрация спектра скоростей частиц при выходе ударной волны на поверхность жидкостей различной вязкости, Физика Горения и Взрыва, т. 52, № 4, 2016 г.
- 7 А.В. Федоров, А.Л. Михайлов, Л.К. Антонюк, И.В. Шмелев, Экспериментальные исследования срывного разрушения капель и струй при их выбросе с поверхности жидкостей, Физика Горения и Взрыва, т. 52, № 4, 2016 г.
- 8 Л. И. Седов, Механика сплошной среды, Москва, Наука 1976.
- 9 Gabriel Prudhomme, Étude des nuages de particules éjectées sous choc: apports de la Vélocimétrie Hétérodyne, Thèse pour obtenir le grade de docteur délivré par, Paris. 2014.
- 10 Физика взрыва. С.Г. Андреев, А.В. Бабкин, Ф.А. Баум и др. В 2 т./Под. ред. Л.П. Орленко М.: ФИЗМАТЛИТ. 2002. Т. 1. С. 758-759.
- 11 Gabriel Prudhomme, Patrick Mercier, Jacky Benier, Pierre-Antoine Frugier. Frontal and Tilted PDV probes for measuring velocity history of laser-shock induced calibrated particles, PDV Workshop, Albuquerque, 2012
- 12 Г. ван де Хюлст, Рассеяние света малыми частицами, Издательство иностранной литературы, Москва. 1961 г.