

МЕТОД УСКОРЕНИЯ МИКРОЧАСТИЦ ДО СКОРОСТИ 400 М/С

*М. В. Асташкин¹, В. К. Баранов¹, Д. Е. Гук², С. А. Макаров², Е. Е. Мешков²,
С. Н. Степушкин¹, А. А. Щепелев²*

¹РФЯЦ ВНИИЭФ

²СарФТИ НИЯУ МИФИ

Введение

При выходе ударной волны на свободную границу конденсированной среды вследствие проявления таких явлений, как откольное разрушение, развитие неустойчивостей на поверхности среды, кавитация, образуется облако летящих микрочастиц. Это явление было обнаружено во ВНИИЭФ в 50-х годах прошлого века Ф. Григорьевым и С. Б. Кормером (информация об этом открытии приведена в [1]). В 70-х годах 20-го века независимо от советских ученых это явление было обнаружено в США Эсеем [2]. В этих и в многих более поздних исследованиях выполненных во ВНИИЭФ (см. напр. [3,4]) ударная волна, как правило, создается при помощи взрыва заряда ВВ. В лабораторных экспериментах в СарФТИ НИЯУ МИФИ [5–7] ударная волна в слое конденсированной среды создавалась с применением электрического взрыва [5, 6] и мощных импульсов лазерного излучения [6–8].

При регистрации облака частиц, вылетающих с поверхности конденсированной среды, обычно используются методы импульсной рентгенографии [3] и фотографии (с применением различных оптических методов регистрации) [1, 4]; при этом получается интегральная картина облака летящих микрочастиц. Метод PDV – лазерный доплеровский метод непрерывной регистрации скорости летящих объектов [8] существенно расширяет возможности экспериментального исследования этой задачи, поскольку позволяет одновременно и непрерывно регистрировать скорости многих частиц [6, 7].

Вместе с тем возникают некоторые вопросы к результатам этих регистраций. В частности, в качестве примера можно привести результат регистрации облака диспергированной воды (рис. 1), полученную методом PDV [7]. Здесь приведена фотография общего вида облака, возникающего при

выходе волны Тейлора (80 МПа, протяженность импульса 0,1 мм) на свободную границу слоя воды (толщиной 1 мм). Волна Тейлора создавалась под действием мощного импульса лазерного излучения на обратную сторону слоя воды. Приведенная $V(t)$ диаграмма ярко демонстрирует возможности метода PDV регистрировать одновременно много частиц с разными скоростями. Вместе с тем обращают на себя внимание особенности индивидуальных зависимостей скоростей частиц, «треков» отдельных частиц; длительность каждого такого «трека» $\sim 1 \div 2$ мкс или менее. Создается впечатление, что датчик PDV «видит» частицу только в течение этого времени и сразу же после этого перестает ее «видеть». При характерной регистрируемой скорости ~ 100 м/с за $1 \div 2$ мкс частица смещается на $0,1 \div 0,2$ мм, характерный размер поля зрения датчика PDV ~ 2 мм, т.е. краткость «треков» частиц не может быть объяснена вылетом частиц из поля зрения датчика. По результатам некоторых экспериментов¹ методика PDV иногда не «видит» частиц, которые регистрируются другими методами.

Вопрос о природе «слепоты» метода PDV представляет интерес не только сам по себе, но и с точки зрения возможностей практической применимости метода. Выяснить природу этого явления в экспериментах с образованием облака частиц представляется невозможным. Одним из возможных способов найти ответ являются эксперименты с одной и несколькими известными частицами, для которых априори известны параметры частиц: размер, форма, материал. Но при этом возникают задачи создания методики ускорения таких частиц до скорости порядка 100 м/с и более. В данной работе описана методика разгона давлением продуктов детонации смеси ацетилена с кислородом.

¹ Устное сообщение К. Н. Панова.

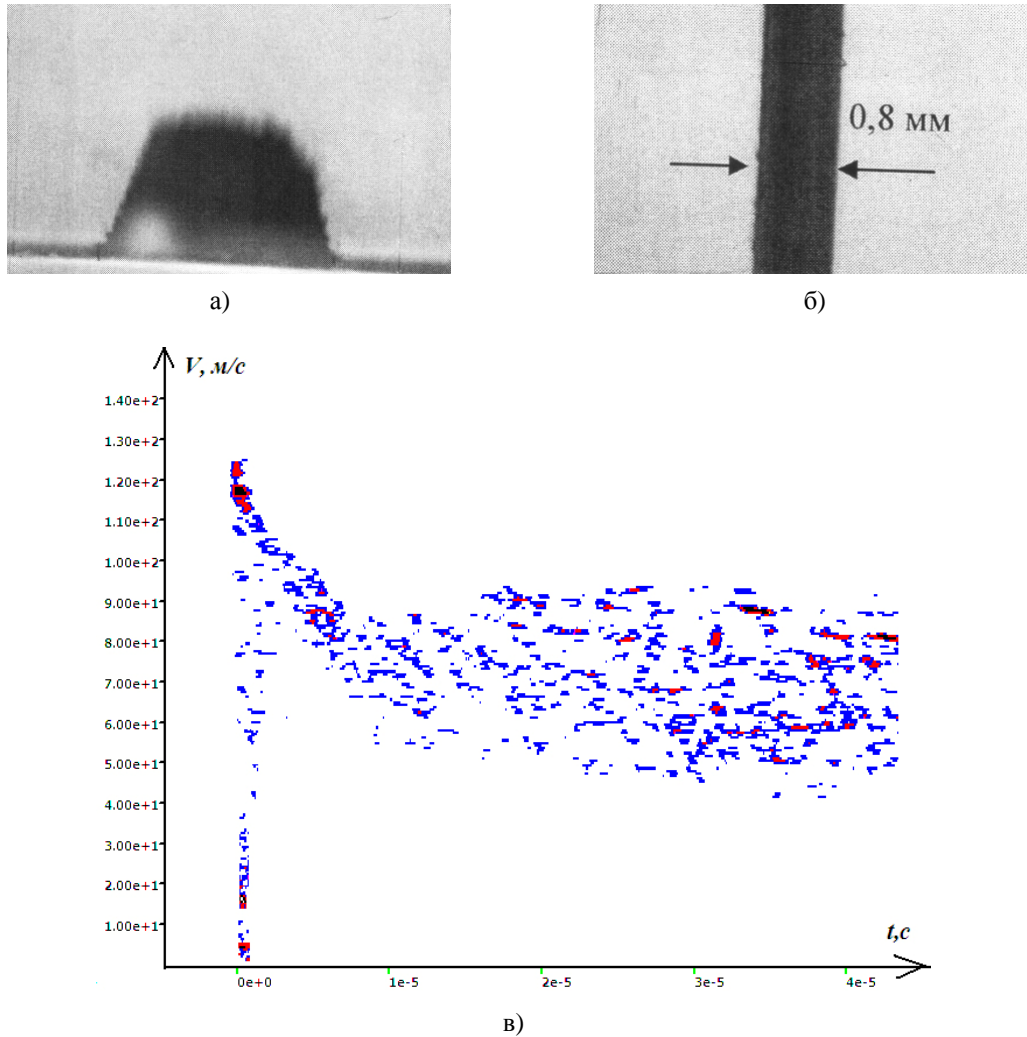


Рис. 1. а) Фотография облака диспергированной воды и б) масштабной проволочки на момент $t = 20$ мкс после воздействия импульса лазера. в) $V(t)$ диаграмма облака, полученная методом PDV.

Техника эксперимента

На рис. 2 приведена а) схема и б) фотография экспериментальной сборки.

В этой сборке внутренний объем камеры (1) из текстолита при проведении опыта заполняется стехиометрической смесью ацетилена с кислородом. Сверху камера прикрыта крышкой (3) из оргстекла толщиной 10 мм. В крышке имеется канал диаметром 2 мм для разгона частиц. Регистрация ускорения частиц производится датчиком PDV (5). На рисунке 3 приведены варианты установки частиц в канале (4).

Микропленка, применяемая в опытах, приготавливалась путем выливания капли цапон лака на поверхность воды. По интерференционным цветам толщина микропленки ≤ 1 мкм. По оценкам [10]

при выходе на поверхность такой пленки фронта детонации смеси ацетилена с кислородом она под действием высоких температур продуктов детонации подвергается деструкции в течении ~ 50 мкс и в дальнейшем частицу ускоряют газообразные продукты детонации, а пленка больше не влияет на измерения скорости частицы.

Было выполнено несколько серий экспериментов с различными частицами и различными их расположениями в ускорительном канале.

В первом варианте (рис. 3а) микропленка из цапон лака располагалась на торце крышки и частицы располагались на поверхности пленки.

Во втором варианте (рис. 3б) микропленка помещалась на торце камеры под крышкой толщиной 10 мм.

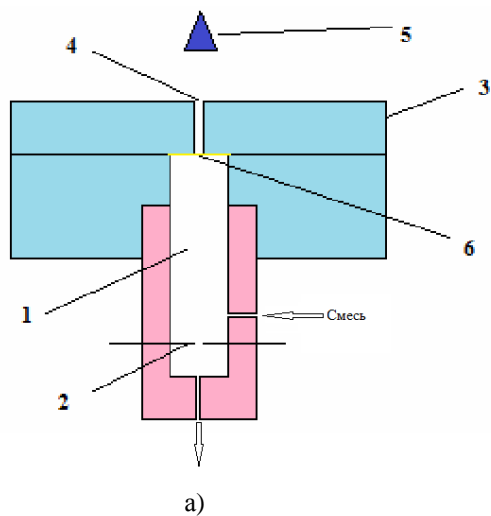


Рис. 2. а) Схема и б) фотография экспериментальной сборки. Обозначения: 1 – камера, заполненная газовой смесью; 2 – искровой зазор; 3 – крышка с каналом диаметром 2 мм; 4 – канал для разгона частиц; 5 – датчик PDV; 6 – пленка

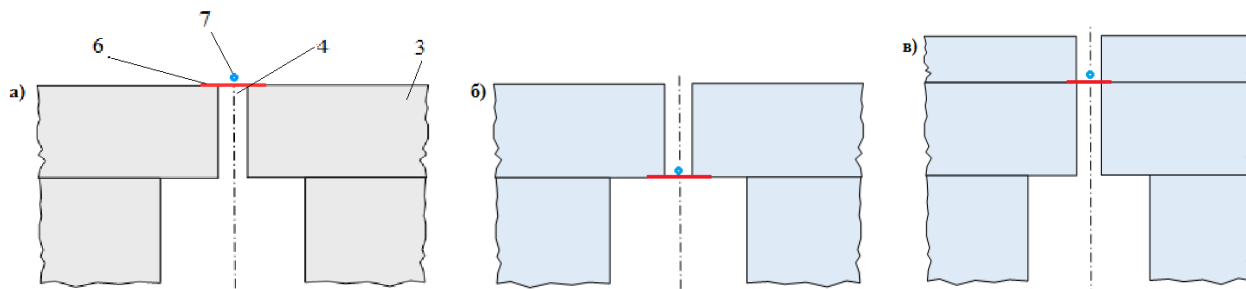


Рис. 3. Варианты установки частиц в канале (4) в сборке (показано сечение сборки). Обозначения: 3 – крышка с каналом диаметром 2 мм; 4 – канал для разгона частиц; 6 – пленка; 7 – частица

В третьем случае (рис. 3в) на поверхности крышки (3) устанавливалась пластина (7) с отверстием, продолжающим канал (4). Между крышкой и пластиной располагается микропленка с ускоримой частицей на ней.

Результаты экспериментов

В ходе выполнения экспериментов были получены зависимости скоростей различных частиц от времени для указанных вариантов расположе-

ния ускоримых частиц в экспериментальной сборке.

Вариант 1. На рисунке 4 представлен график зависимости скорости от времени для сферического шарика из полистирола диаметром $d=1\text{ мм}$. А на рисунке 5 показана аналогичная зависимость для частиц $d = 100\text{ мкм}$.

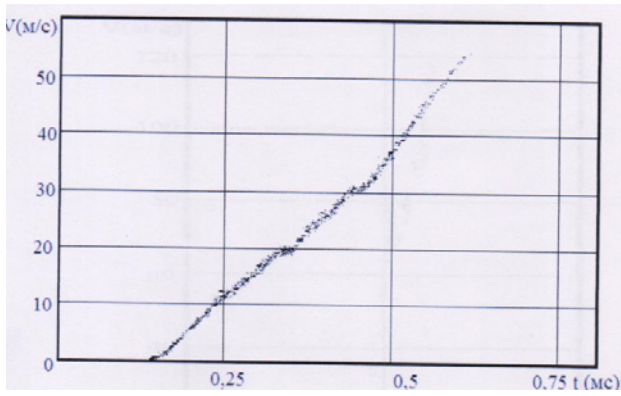


Рис. 4. Фурье-диаграмма движения сферического шарика из полистирола $d = 1$ мм

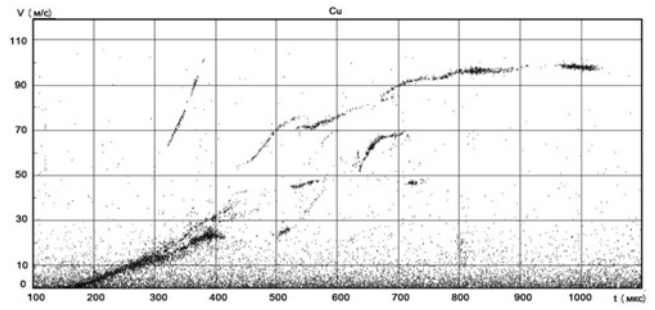


Рис. 7. Фурье-диаграмма движения фрагментов медной проволоки ($d = 0,14, l \leq 2$ мм)

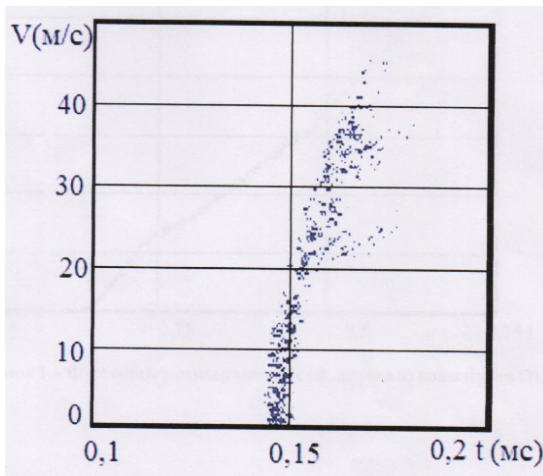


Рис. 5. Фурье-диаграмма движения частиц $d = 100$ мкм

Вариант 2.

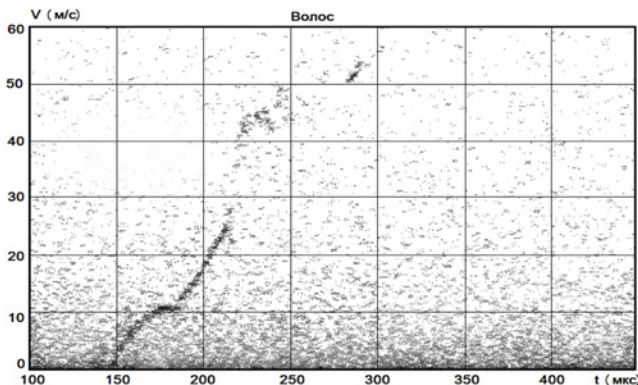


Рис. 6. Фурье-диаграмма движения фрагментов волоса ($d = 0,06, l \leq 2$ мм)

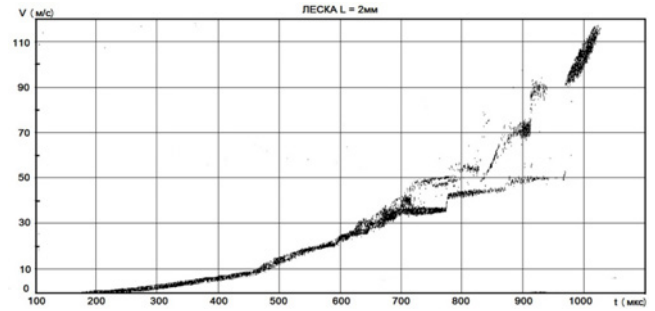


Рис. 8. Фурье-диаграмма движения фрагментов лески ($d = 0,4, l \leq 2$ мм)

Вариант 3.

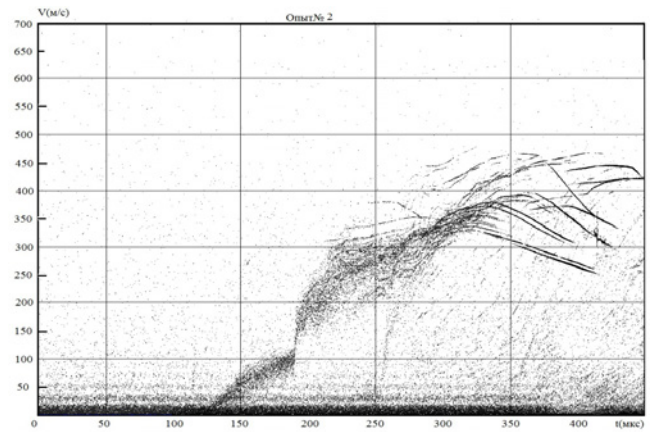


Рис. 9. Фурье-диаграмма ускорения и торможения микросфер диаметром 0,1 мм. В этом эксперименте достигается скорость более 400 м/с. Интересно отметить различие вида зависимостей $V(t)$ на стадии разгона и торможения частиц

Заключение

Разработана методика ускорения микрочастиц с характерным размером 1–2 мм и менее до скорости 400 м/с и более. Микрочастицы ускоряются

расширяющимися продуктами детонации смеси ацетилена с кислородом.

В экспериментах ускорялись микросферы диаметром 0,1 мм, фрагменты человеческого волоса диаметром 0,06 мм, фрагменты медной проволоки диаметром 0,14 мм, фрагменты лески диаметром 0,4 мм

Методика может в дальнейшем использоваться при разработке экспериментальной установки для регистрации света, рассеянного на микрочастице (для варианта летящей микрочастицы).

Список литературы

1. Огородников В. А., Иванов А. Г., Михайлов А. Л. и др. О выбросе частиц со свободной поверхности металлов при выходе на неё ударной волны и методах их диагностики // Физика горения и взрыва, 1998, т. 34, № 6, с. 103–107.

2. Asay J. R. and Barker L. M. // J. Appl. Phys. 1974. 45, 2540.

3. Mikhailov A. L., Ogorodnikov V. A., Sasik V. S., Raevsky V. A., Lebedev A. I., Zotov D. E., Erunov S. V., Si'runin M. A., Sadunov V. D., Nevmerzhitsky N. V., Lobastov S. A., Burtsev V. V., Mishanov A. V., Kulakov E. V., Satarova A. V., Georgievskaya A. B., Knyazev V. N., Klevevnikov O. A., Antipov M. V., Glushihin V. V., Yurtov I. V., Utenkov A. A., Sen'kovsky E. D., Abakumov S. A., Presnyakov D. V., Kalashnik I. A., Panov K. N., Arinin V. A., Tkachenko B. I., Filyaev V. N., Чапаев А. В., Andramanov A. V., Lebedeva M. O., Igonin V. V. // JETP, 2014. Vol. 145, No. 5, pp. 892–906

4. Невмержицкий Н. В., Сотсков Е. А., Сеньковский Е. Д., Абакумов С. А., Фролов С. В., Кривонос О. Л., Руднев А. В., Апрельков О. М., Георгиевская А. Б. Микроскопическая электронооптическая регистрация процесса выброса частиц с поверхности ударно нагружаемых металлов и жидкостей. // Труды XV Харитоновских тематических научных чтений, 2013. С. 655–666.

5. Bazarov Yu. B., Barsukov Yu. K., Georgievskaya A. B., Krasovsky G. B., Meshkov E. E., Sundyukov A. Yu. About Possibility of the Research of the Mechanisms of Formation of a Cloud of the Microparticles at a Shock Wave Exit on a Free Surface of a Layer of the Condensed Media in Laboratory Experiments. // Abstracts of 12th Intl. Workshop on the Physics of Compressible Turbulent Mixing. Moscow, July 2010, p.35.

6. Baranov V. K., Georgievskaya A. B., Golubinskii A. G., Irinichev D. A., Meshkov E. E., Stepushkin S. N., Syundyukov A. Yu., Khatunkin V. Yu. About some possibilities of PDV method application in hydrodynamic instabilities research // Abstracts of Turbulent Mixing and Beyond Workshop, 04–09 August 2014, Trieste, Italy, 2014, p. 1.

7. Асташкин М. В., Баранов В. К., Георгиевская А. Б., Голубинский А. Г., Ириничев Д. А., Мешков Е. Е., Степушкин С. Н., Сундюков А. Ю., Хатункин В. Ю. Неустойчивость свободной границы слоя воды, ускоряемой волной Тейлора. // Письма в ЖЭТФ, 2014, 99, № 3, с.165–168.

8. Strand O. T., Goosman D. R., Martinez C. «Compact system for high-speed Velocimetry using heterodyne techniques» // «Rev. Sci. Instrum.», 77, 2006, p. 083108-1 – 083108-8.