

# Неустойчивость свободной границы слоя воды, ускоряемой волной Тейлора

М. В. Асташкин, В. К. Баранов, А. Б. Георгиевская, А. Г. Голубинский, Д. А. Ирриничев, Е. Е. Мешков<sup>+1)</sup>,  
С. Н. Степушкин, А. Ю. Сюндюков, В. Ю. Хатункин

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,  
607188 Саров, Россия

<sup>+</sup>Саровский физико-технический институт, национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”,  
607186 Саров, Россия

Поступила в редакцию 30 декабря 2013 г.

Приведены результаты экспериментального исследования неустойчивости свободной границы тонкого (1 мм) слоя воды при выходе на нее волны Тейлора (80 МПа), создаваемой импульсом лазерного излучения. Результаты экспериментов демонстрируют возможности лазерного доплеровского метода непрерывной регистрации скорости летящего объекта (метода PDV) [1] для исследования этой задачи.

DOI: 10.7868/S0370274X14030072

При выходе ударной волны на свободную *невозмущенную* поверхность конденсированной среды вследствие проявления таких сложных явлений, как откольное разрушение, развитие неустойчивостей на поверхности среды и кавитация, образуется облако летящих микрочастиц. Несмотря на длительную историю изучения этого процесса [1–4], многие связанные с ним вопросы остаются открытыми. Особый интерес представляют образование и распределение мелких фракций по размерам и скоростям, зависящим от параметров течения и реологических свойств среды.

При регистрации облака частиц, вылетающих с поверхности конденсированной среды, обычно используются методы импульсной рентгенографии [5] и фотографии [6]. При этом получается интегральная картина облака летящих микрочастиц. Применение метода PDV – лазерного доплеровского метода непрерывной регистрации скорости летящего объекта [7] – существенно расширяет возможности экспериментального исследования указанной проблемы.

В методике PDV один из сигналов, создаваемый оптоволоконным эрбиевым лазером с длиной волны 1550 нм и выполняющий функции гетеродинного, имеет постоянную во времени несущую частоту. Другой сигнал, отраженный от движущегося объекта и имеющий доплеровский сдвиг частоты, служит носителем информации о скорости объекта. Детектирование частоты биения этих сигналов осуществляется на нелинейном элементе, которым в методи-

ке PDV является фотодиод. Изменение во времени амплитуды суммарного сигнала  $I(t)$ , регистрируемое фотодиодом, определяется следующим выражением:

$$I(t) = I_0 + I_d + (I_0 I_d)^{1/2} \sin[f_b(t) + \theta], \quad (1)$$

где  $I_0$ ,  $f_0$  и  $I_d$ ,  $f_d$  – амплитуды и частоты гетеродинного и отраженного от движущегося объекта излучений соответственно,  $\theta$  – сдвиг фазы между этими излучениями,  $f_b(t) = |f_d(t) - f_0|$  – частота доплеровского сдвига, зависящая от скорости измеряемого объекта  $V(t)$  как

$$F_b(t) = 2[V(t)/c]f_0. \quad (2)$$

В исходном лазерном излучении с длиной волны  $\lambda = 1550$  нм гетеродинная частота составит  $f_0 = 193414$  ГГц. Несложно оценить, что при скорости измеряемого объекта  $V(t) = 1$  км/с биение сигналов будет происходить с частотой  $f_b = 1.29$  ГГц.

В данной работе на примере экспериментов по исследованию процессов диспергирования слоя воды, нагружаемого лазерным импульсом малой длительности, демонстрируются возможности методики PDV для решения подобных задач. Нестационарная затухающая ударная волна (волна Тейлора) создавалась в слое воды толщиной 1 мм при испарении тонкой ( $\sim 10$  мкм) мишени, расположенной на нижней поверхности слоя воды, под действием мощного импульса лазерного излучения. Проводились опыты с двумя типами воды: вода для инъекций (из ампул, приобретенных в аптеке) и водопроводная вода.

Кювета для слоя воды (плоское кольцо из оргстекла толщиной 1 мм) помещалась на горизонталь-

<sup>1)</sup>e-mail: eemeshkov@gmail.com, meshkov@sarfti.ru

но расположенной опорной пластине из оргстекла толщиной 10 мм. В качестве мишени, поглощающей лазерный импульс, использовался эмульсионный слой засвеченной и проявленной фотоэмульсии. При этом эмульсионный слой был обращен к слою воды. Импульс лазерного излучения направлялся на мишень через опорную пластину. В экспериментах применялся лазер LF-117 с активной средой Nd:YAG. Ударная волна (УВ) создавалась импульсом лазерного излучения с длиной волны  $\lambda = 532$  нм и энергией  $E = 0.35$  Дж. Длительность импульса составляла  $\sim 10$  нс. Для сглаживания интенсивности излучения по сечению пучка использовалась ребристая линза. При площади нагружаемого пятна  $S = 4 \times 4$  мм<sup>2</sup> интенсивность лазерного излучения составляла  $I = 2.1 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>. При такой интенсивности лазерного излучения давление создаваемой плазмы  $P_{\text{plas}}$  примерно равно давлению ударной волны  $P_{\text{BW}}$  [8]:

$$P_{\text{plas}} = 14 \cdot (I/10^{14})^{2/3} (\lambda)^{-2/9}, \quad (3)$$

где  $I$  выражается в Вт/см<sup>2</sup>,  $\lambda$  – в мкм, а  $P_{\text{plas}}$  – в  $10^2$  ГПа.

В соответствии с этой оценкой на нижней границе слоя воды под действием импульса лазерного излучения формировался импульс давления с амплитудой  $P_{\text{plas}} \sim 0.27$  ГПа. Образующаяся при этом волна Тейлора проходила через слой воды. Согласно численным расчетам с применением программного комплекса MASTER [9] давление на фронте волны Тейлора при выходе ее на свободную поверхность слоя воды было равно  $P = 80$  МПа, а протяженность импульса  $\Delta x = 100$  мкм. Время выхода ударной волны составляет  $t = 0.6$  мкс. Скорость свободной поверхности после выхода на нее ударной волны  $V \approx 90$  м/с. Скорость деформации за фронтом ударной волны  $\dot{\epsilon} = 10^6$  1/с. При этом образуется откольный слой толщиной 10 мкм при величине откольной прочности  $P_{\text{spall}} = -10$  МПа.

Регистрация интегральной картины разлета облака микрокапель производилась оптическим методом в однокадровом режиме в направлении, параллельном поверхности слоя воды, с помощью камеры pco.2000, имеющей ПЗС-матрицу с  $2048 \times 2048$  пикселей, с длительностью экспозиции 10 мкс. Для регистрации скорости облака микрокапель методом PDV луч оптоволоконного эрбиевого лазера направлялся навстречу фронту летящего облака в направлении нормали к поверхности слоя воды. Пятно луча лазера на поверхности слоя воды имело диаметр  $\sim 2$  мм. Регистрация суммарного сигнала осуществлялась осциллографом LeCroy с шириной полосы регистрации 2 ГГц и периодом оцифровки сигнала 40 пс.

В экспериментах облако микрокапель разлеталось в воздух при атмосферном давлении. На рис. 1 приведены фотографии облака микрокапель воды

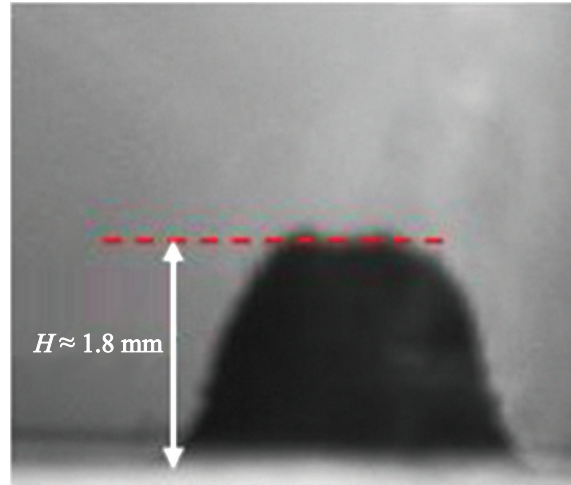


Рис. 1. Фотография процесса разлета в воздух слоя воды (для инъекций) на момент времени  $t = 25$  мкс

для инъекций на момент времени  $t = 25$  мкс (время  $t$  отсчитывается от момента воздействия лазерного импульса на мишень). Изображение облака имеет достаточно четко выраженную форму трапеции. Такая форма определяется тем, что в процессе движения волны Тейлора по слою воды формируются плоская неразгруженная область волны (плоская вершина трапеции) и подвергнувшиеся боковой разгрузке края (боковые скошенные участки). Фронт облака выступает над поверхностью слоя воды на высоту  $H \approx 1.8$  мм. Плоский участок фронта облака в большей части слабо возмущен (левая и центральная части фронта). Правый край фронта имеет несколько большую величину возмущения. Возможно, эта неравномерность связана с некоторой неравномерностью распределения интенсивности импульса лазерного излучения по сечению пучка. На более поздние моменты времени возмущение фронта облака в неразгруженной части нарастает. В дальнейшем фронт облака практически распадается на ряд струй.

Дополнительную существенную информацию об этих процессах дают результаты измерений в этом же опыте методом PDV (рис. 2). Приведенная на рисунке зависимость имеет необычный вид: с самого начала на каждый момент времени на осциллограммах наблюдается не одно, а целый набор значений скоростей. Можно предположить, что практически одновременно регистрируются скорости разных микрокапель, попадающих в поле пятна луча эрбиевого

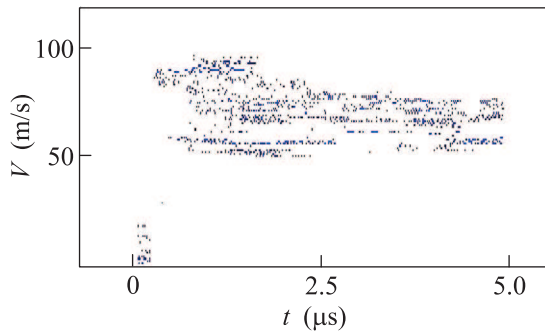


Рис. 2. Зависимости от времени скорости облака капель воды, полученные методом PDV в опыте с водой для инъекций. В экспериментах с такой водой максимальная скорость оказывается на уровне  $\sim 90$  м/с

лазера. (Это предположение косвенным образом подтверждается другим экспериментом авторов. В нем методом PDV *одновременно и непрерывно* регистрировалась скорость полупрозрачной кальки, разгоняемой плоским ударником, первоначально отделенным от кальки воздушным промежутком, и самого ударника. Таким образом датчик PDV “видит” ударник через кальку.) Значения скоростей на осциллограмме представляют собой облако точек, в начальный момент времени лежащих в пределах от  $\sim 90$  до 0 м/с, а затем – в интервале от  $\sim 70$  до  $\sim 50$  м/с.

Возникает вопрос: что является источником начального возмущения и каков механизм его развития? За время, равное 1 мкс, поверхность воды смещается на расстояние  $\leq 90$  мкм. На графике 2 различаются скорости отдельных капель в виде коротких линий протяженностью  $\sim 0.01$  мкс (т.е.  $\sim 10$  нс). Смещение капель за такое время составляет  $\leq 1$  мкм. Регистрация скорости капель начинается практически с момента выхода фронта волны Тейлора на поверхность слоя воды. Весьма характерно, что уже в самый начальный момент времени наблюдается набор скоростей свободной поверхности слоя воды от  $\sim 90$  м/с до 0, т.е. в самом начале движения эта поверхность оказывается сильно возмущенной. Возникает вопрос о происхождении подобного возмущения. Действительно, до выхода волны на поверхность слоя воды она является невозмущенной. Если же фронт волны Тейлора и имеет в момент формирования начальное мелкомасштабное возмущение, то при прохождении слоя воды оно должно достаточно быстро затухать. Можно предположить, что источником начального возмущения является откол. Если первый откольный слой имеет на разных участках разную толщину (что вполне естественно), то и скорость этих участков должна быть разной: там, где

откольный слой тоньше, скорость будет больше, и наоборот. Практически сразу же после скачка скорости начинается торможение откольного слоя атмосферным воздухом и, соответственно, развитие неустойчивости Рэля–Тейлора, формирование струй, распад данного слоя на капли и одновременное торможение этих капель воздухом.

На рис. 3 приведена зависимость от времени пути, пройденного поверхностью облака диспергированной

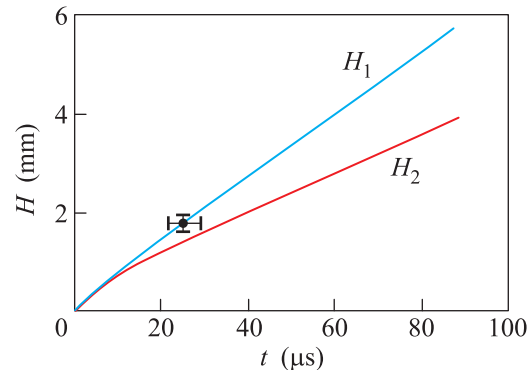


Рис. 3. Зависимости от времени пути, пройденного границей летящего облака диспергированной воды для инъекций:  $H_1(t)$ , получена путем интегрирования зависимости  $V(t)$  с рис. 2, огибающей верхнюю границу облака точек,  $H_2(t)$  – огибающей нижнюю границу облака точек. Черный кружок – результат опыта, полученный фотографической регистрацией (рис. 1)

воды. Кривая  $H_1(t)$  была получена путем интегрирования зависимости  $V(t)$ , огибающей верхнюю границу облака точек на рис. 2, а кривая  $H_2(t)$  – путем интегрирования зависимости  $V(t)$ , огибающей нижнюю его границу. На графике также приведено значение высоты  $H$  факела облака капель на момент времени  $t = 25$  мкс, полученное фотографическим методом (см. рис. 1). Оно согласуется с зависимостью  $H_1(t)$ . Зависимость  $a(t) = H_1(t) - H_2(t)$  дает оценку амплитуды возмущения поверхности облака диспергированной воды как функции времени.

Картина течения в экспериментах с водопроводной водой в общих чертах имеет характер, сходный с экспериментами с водой для инъекций. Однако скорость облака капель оказывается в этих случаях существенно разной. Скорость облака капель в опытах с водой для инъекций  $V_{\max} = 90.5 \pm 3.3$  м/с, а в опытах с водопроводной водой  $V_{\max} = 127 \pm 1.2$  м/с (в обоих случаях оценка проводилась по четырем опытам). Для выяснения причины этого расхождения необходимо проведение дополнительных экспериментов.

Авторы выражают признательность С.В. Бондаренко и В.Д. Урлину за полезные обсуждения и Ю.В.Алеханову и С.А. Ломтеву за техническую помощь. Работа выполнена частично при поддержке гранта РФФИ # 13-08-01441.

1. В. К. Кедринский, *Гидродинамика взрыва: эксперимент и модели*, Изд-во СО РАН, Новосибирск (2000), 435 с.
2. В. А. Огородников, А. Л. Михайлов, В. В. Бурцев, С. А. Лобастов, С. В. Ерунов, А. В. Романов, А. В. Руднев, Е. В. Кулаков, Ю. Б. Базаров, В. В. Глушихин, И. А. Калашник, В. А. Цыганов, Б. И. Ткаченко, *ЖЭТФ* **136**, 1 (2009).
3. В. А. Раевский, А. Б. Георгиевская, *Оценка спектральных характеристик частиц, выбрасываемых со свободной поверхности жидкости под действием ударной волны*, XI Харитоновские тематические научные чтения (2009), с. 514–521.
4. А. Б. Георгиевская, *Расчетно-теоретическое исследование развития возмущений на свободной поверхности твердого вещества при выходе на нее ударной волны*, XI Харитоновские тематические научные чтения (2009), с. 382.
5. W. T. Buttler, M. B. Zellner, R. T. Olson, P. A. Rigg, R. S. Hixson, J. E. Hammerberg, A. W. Obst, J. R. Payton, A. Iverson, and J. Young, *J. Appl. Phys.* **101**, 063547 (2007).
6. Н. В. Невмержицкий, А. Л. Михайлов, В. А. Раевский, В. С. Сасик, Ю. М. Макаров, Е. А. Сотсков, А. В. Руднев, В. В. Бурцев, С. А. Лобастов, А. А. Никулин, Е. Д. Сеньковский, С. А. Абакумов, О. Л. Кривонос, А. А. Половников, О. Н. Апрелько., *Микроскопическая электронно-оптическая регистрация процесса выброса частиц со свободной поверхности ударно-нагруженного свинца*, XIII Харитоновские тематические научные чтения (2011), с. 604.
7. O. T. Strand, D. R. Goosman, and C. Martinez, *Rev. Sci. Instrum.* **77**, 083108-1 (2006).
8. K. V. Khishchenko, I. K. Krasnyuk, P. P. Pashinin, A. Yu. Semenov, and V. I. Vovchenko, *Experimental investigation of mechanical strength of polimetilmetacrilat under high strain rate*, 8 Workshop complex systems of charges particles and their interaction with electromagnetic interaction, M., April 14, 15, 2010.
9. В. В. Руденко, М. В. Шабуров, Е. В. Чехунов, *Учебно-исследовательский программный комплекс MASTER по физике сплошных сред*, Труды Региональной конференции по научному программному обеспечению, 2, 3 февраля, 2006, Изд-во Политехнического университета, С.-Петербург (2006), с. 121.