

УДК 778.3

Неустойчивость свободной границы слоя воды, ускоряемой волной Тейлора*

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 метода PDV [1] для исследования этой задачи.

**М. В. Асташкин, В. К. Баранов,
А. Б. Георгиевская, А. Г. Голубинский,
Д. А. Ириничев, Е. Е. Мешков,
С. Н. Степушкин, А. Ю. Сюндюков,
В. Ю. Хатункин**

При выходе ударной волны на свободную *невозмущенную* поверхность конденсированной среды вследствие проявления таких сложных явлений, как откольное разрушение, развитие неустойчивостей на поверхности среды, кавитация, образуется облако летящих микрочастиц. Несмотря на длительную историю изучения этого процесса [2–5], многие вопросы остаются открытыми. Особый интерес представляет 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 [6] и фотографии [7]; при этом получается интегральная картина облака летящих микрочастиц. Применение метода PDV – лазерного доплеровского метода непрерывной регистрации скорости летящего объекта [1] – существенно расширяет возможности экспериментального исследования указанной проблемы.

В методике PDV один из сигналов, создаваемый оптоволоконным эрбиевым лазером с длиной волны 1550 нм, выполняющий функции гетеродинного, имеет постоянную во времени несущую частоту, а второй, отраженный от движущегося объекта и имеющий доплеровский сдвиг частоты, является носителем информации о скорости объекта. Детектирование частоты биения этих сигналов осуществляется на нелинейном элементе, которым в методике PDV является фотодиод. Изменение во времени амплитуды суммарного сигнала $I(t)$, регистрируемое фотодиодом, определяется выражением

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

* Письма в ЖЭТФ, 2014, № 3, т. 99, с. 165–168.

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

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

В исходном лазерном излучении с длиной волны $\lambda = 1550$ нм гетеродинная частота составит $f_0 = 193414$ ГГц. Не сложно оценить, что при скорости измеряемого объекта $V(t) = 1$ км/с биение сигналов происходит 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 исследования подобных задач. В этих экспериментах нестационарная затухающая ударная волна (волна Тейлора) создавалась в слое воды толщиной 1 мм при испарении тонкой (~ 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 горизонтально расположенной опорной пластине из оргстекла толщиной 10 мм. В качестве мишени, поглощающей лазерный импульс, использовался эмульсионный слой засвеченной и проявленной фотопленки. При этом эмульсионный слой был обращен к слою воды. Импульс лазерного излучения направлялся на мишень через опорную пластину. В экспериментах использовался 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 ~ 10 нс. Для сглаживания интенсивности излучения по сечению пучка использовалась ребристая линза. При площади нагружаемого пятна $S = 4 \times 4$ мм² интенсивность лазерного излучения составляла $I = 2,1 \cdot 10^8$ Вт/см². При такой интенсивности лазерного излучения давление создаваемой плазмы $P_{пл}$ примерно равно давлению ударной волны $P_{УВ}$ [8],

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

где I выражается в Вт/см², λ – в мкм, $P_{пл}$ – в 10^2 ГПа.

По этой оценке на нижней границе слоя воды под действием импульса лазерного излучения формировался импульс давления амплитудой $P_{пл} \sim 0,27$ 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, протяженность импульса $\Delta x = 100$ мкм. Время выхода ударной волны составляет $t = 0,6$ мкс, скорость свободной поверхности после выхода ударной волны на свободную поверхность $V \approx 90$ м/с, скорость деформации за фронтом ударной волны $\dot{\epsilon} = 10^6$ 1/с. При этом образуется откольный слой толщиной 10 мкм при откольной прочности $P_{отк} = -10$ МПа.

Регистрация интегральной картины разлета облака микрокапель производилась оптическим методом в однокадровом режиме в направлении, параллельном поверхности слоя воды, с использованием камеры pco.2000, имеющей ПЗС матрицу с 2048×2048 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 ~ 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 приведена фотография облака микрокапель воды для инъекций на момент времени

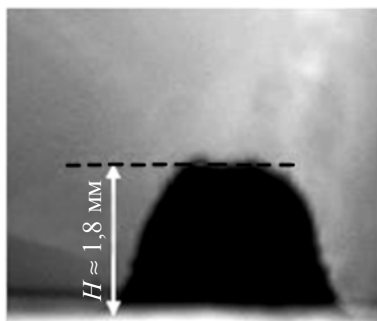


Рис. 1. Фотография процесса разлета в воздух слоя воды (для инъекций) на момент времени $t = 25$ мкс

$t = 25$ мкс (время t отсчитывается от момента после 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 формируется 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 часть 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, затем фронт облака практически распадается на ряд струй.

Дополнительную и существенную информацию об этих процессах дают результаты измерений в этом же опыте методом PDV (рис. 2). Приведенная здесь зависимость имеет необычный вид – с самого начала на каждый момент времени на приведенных осциллограммах наблюдается не одно значение, а целый набор значений скоростей, т. е. можно предположить, что *практически* одновременно регистрируются скорости разных микрокапель, попадающих в поле пятна луча эрбиевого лазера*. Значения скоростей на осциллограмме представляют собой облако точек, в начальный момент времени лежащих в пределах от ~ 90 до 0 м/с, а затем в интервале ~ 70 до ~ 50 м/с.

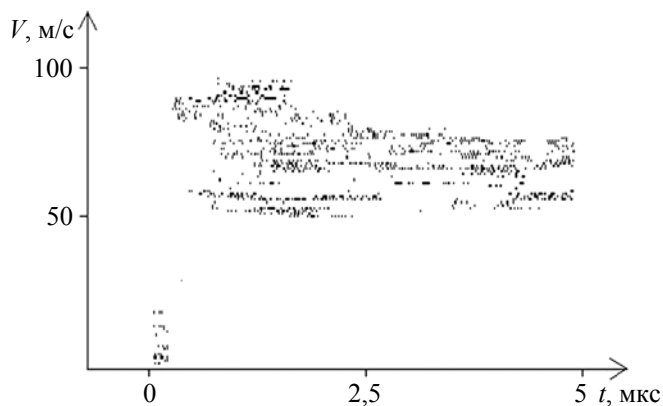


Рис. 2. Результаты измерений зависимости от времени t скорости облака капель воды V , полученных методом PDV в опыте с водой (для инъекций). В экспериментах с такой водой максимальная скорость оказывается на уровне ~ 90 м/с

*Это предположение косвенным образом подтверждается другим экспериментом авторов, в котором методом PDV *одновременно и непрерывно* регистрировалась скорость полупрозрачной кальки, разгоняемой плоским ударником (первоначально отделенного от кальки воздушным промежутком), и самого ударника (т. е. датчик PDV «видит» ударник через кальку).

Возникает вопрос: что является источником начального возмущения и каков механизм его развития. За время, равное 1 мкс, поверхность воды смещается на расстояние ≤ 90 мкм. Точки на рис. 2, представляющие скорость отдельных капель, имеют протяженность порядка $\sim 0,01$ мкс (т. е. ~ 10 нс), за такое время смещение капель составляет ≤ 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 ~ 90 м/с до 0, т. е. в самом начале движения эта поверхность оказывается сильно возмущенной. Возникает вопрос о происхождении этого возмущения, ведь до выхода волны на поверхность слоя воды поверхность является невозмущенной; фронт волны Тейлора если и имеет в момент формирования начальное мелкомасштабное возмущение, то при прохождении слоя воды оно должно достаточно быстро затухать. На этом фоне можно предположить, что источником начального возмущения является откол. Если первый откольный слой имеет в 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 и разрушение этого слоя на капли, и одновременно торможение этих капель воздухом.

На рис. 3 приведена зависимость от времени пути, пройденного поверхностью облака диспергированной воды. Верхняя кривая $H_1(t)$ была получена путем интегрирования зависимости $V(t)$, огибающей верхнюю границу облака точек на рис. 2. Нижняя кривая $H_2(t)$ получена путем интегрирования зависимости $V(t)$, огибающей нижнюю границу облака точек на рис. 2. На этом графике приведена также высота факела облака капель H на момент времени $t = 25$ мкс, полученная фотографическим методом (рис. 1). Это значение H 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.

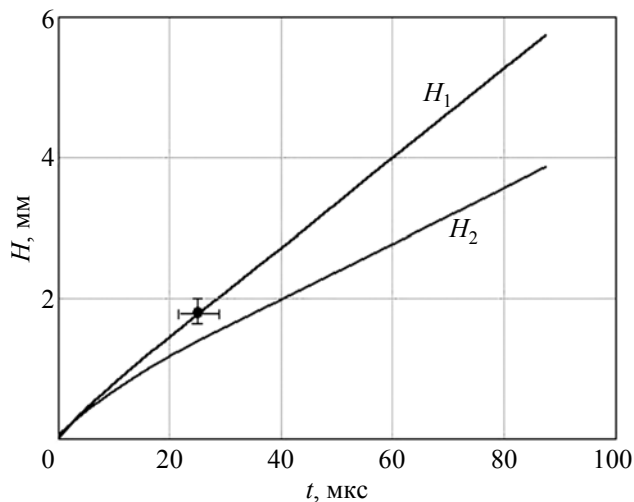


Рис. 3. Зависимость от времени пути, пройденного границей летящего облака диспергированной воды для инъекций $H_1(t)$, полученная интегрированием зависимости $V(t)$ (рис. 2) (верхней границы облака точек). Нижняя кривая $H_2(t)$ получена интегрированием зависимости огибающей нижней границы облака точек $V(t)$. ● – результат опыта, полученный фотографической регистрацией (рис. 1)

Картина течения в экспериментах с водопроводной водой в общих чертах имеет сходный характер с экспериментами с водой для инъекций, но скорость облака капель оказывается 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 по четырем опытам). Необходимо проведение дополнительных экспериментов для выяснения причины этого расхождения.

Список литературы

1. Strand O. T., Goosman D. R., Martinez C. Compact system for high-speed Velocimetry using heterodyne technique // Rev. Sci. Instrum, 2006, 77, p. 083108-1 – 083108-8.
2. Кедринский В. К. Гидродинамика взрыва: эксперимент и модели. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. 435 с.
3. Огородников В. А., Михайлов А. Л. и др. Регистрация выброса частиц со свободной поверхности ударно-нагруженных образцов // ЖЭТФ. 2009. Т. 136. Вып. 3(9). С. 1–6.
4. Раевский В. А., Георгиевская А. Б. Оценка спектральных характеристик частиц, выбрасываемых со свободной поверхности жидкости под действием ударной волны // XI Харитоновские тематические научные чтения. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2009. С. 514–521.
5. Георгиевская А. Б. Расчетно-теоретическое исследование развития возмущений на свободной поверхности твердого вещества при выходе на нее ударной волны // XI Харитоновские тематические научные чтения. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2009. с. 382–389.
6. Buttler W. T., Zellner M. B. et al. Dynamic comparisons of piezoelectric ejecta diagnostics // J. Appl. Phys. 2007. 101, 063547.
7. Невмержицкий Н. В., Михайлов А. Л., Раевский В. А. и др. Микроскопическая электронно-оптическая регистрация процесса выброса частиц со свободной поверхности ударно-нагруженного свинца // XIII Харитоновские тематические научные чтения. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2011. С. 604–608.
8. Krasnyuk I. K. et al. Experimental investigation of mechanical strength of polimetilmetacrilat under high strain rate // 8 Workshop complex systems of charges particles and their interaction with electromagnetic interaction. Moscow, 2010.
9. Руденко В. В., Шабуров М. В., Чехунов Е. В. Учебно-исследовательский программный комплекс MASTER по физике сплошных сред // Труды региональной конференции по научному программному обеспечению. – Санкт-Петербург: Изд-во Политехнического университета, 2006. С. 121–124.

Instability of the free boundary of a water layer accelerated by a Taylor wave

M. V. Astashkin, V. K. Baranov, A. B. Georgievskaya, A. G. Golubinskii,
D. A. Irinichev, E. E. Meshkov, S. N. Stepushkin, A. Yu. Syundyukov,
V. Yu. Khatunkin

The instability of the free boundary of a thin (1 mm) water layer under the action of a Taylor wave (0,185 GPa), which is created by a laser pulse, has been experimentally studied. The experimental results demonstrate the capabilities of the laser Doppler method for the continuous recording of a flying object (PDV method) [7] for studying this problem.