

УДК 532.529+533.6

РЕГИСТРАЦИЯ СПЕКТРА СКОРОСТЕЙ ЧАСТИЦ ПРИ ВЫХОДЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ НА ПОВЕРХНОСТЬ ЖИДКОСТЕЙ РАЗЛИЧНОЙ ВЯЗКОСТИ

А. В. Фёдоров, А. Л. Михайлов, С. А. Финюшин, Д. А. Калашников,
Е. А. Чудаков, Е. И. Бутусов, И. С. Гнутов

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607190 Саров, avfedorov@vniief.ru

Приведены результаты экспериментов по исследованию кавитационного механизма разрушения жидкостей в широкой области ударно-волнового нагружения. Методом лазерного гетеродин-интерферометра (PDV) регистрировались скорость свободной поверхности жидкостей и спектр скоростей облака частиц и струй, определялся их размер. Определена величина откольной прочности дистиллированной воды.

Ключевые слова: ударная волна, метод PDV, ударно-волновое пыление, откольная прочность, микрокумулятивные струи, спектр скоростей частиц, механизм пыления.

DOI 10.15372/FGV20160412

ВВЕДЕНИЕ

Существует несколько механизмов ударно-волнового пыления: выброс частиц с шероховатой поверхности, откольное дробление материала за счет внутренних растягивающих напряжений, микрокумулятивные струи, возникающие в пузырьках газа, пыление из-за неоднородности структуры материала и т. д. [1–17]. Особый интерес при исследовании ударно-волнового пыления жидкостей и расплавов металлов представляет случай, когда их поверхность гладкая и зеркальная. В этом случае отсутствует выброс частиц, обусловленный шероховатостью поверхности. Известно, что реальные жидкости находятся в двухфазном состоянии и содержат микронеоднородности в виде микропузырьков свободного газа, твердых частиц или их комбинаций, которые играют роль ядер кавитации. При приложении растягивающих напряжений на ядрах кавитации начинают развиваться парогазовые пузырьки: в жидкости формируются пузырьковые кластеры, которые в дальнейшем развиваются в пузырьковую структуру, переходя в газонакапельную фазу [10, 11].

Цель работы — исследование процесса образования капельного облака и регистрация спектра скоростей частиц в результате кавита-

ционного разрушения жидкостей, вязкость которых может отличаться на три порядка.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для экспериментов выбраны жидкости с разной вязкостью при нормальной температуре (дистиллированная вода — $0.8 \cdot 10^{-3}$ Па·с, этанол — $1.07 \cdot 10^{-3}$ Па·с, глицерин — 1.21 Па·с, масло VM1 — 0.3 Па·с). На рис. 1 представлена схема экспериментов при двух уровнях давления нагружения. Эксперименты проводились при температуре $+10$ °С.

Жидкости нагружались до высоких ($p = 7 \div 11$ ГПа) и низких ($p = 0.1 \div 0.9$ ГПа) давлений. В первом случае (см. рис. 1, а) нагружение осуществлялось плоской стационарной ударной волной (УВ) от взрывчатого вещества ($\varnothing 120 \times 40$ мм) через алюминиевый диск ($\varnothing 120 \times 1$ мм), во втором случае (см. рис. 1, б) — расходящейся волной треугольного профиля от взрыва электродетонатора через алюминиевый или стальной диск ($\varnothing 120 \times 1$ мм). В одном из опытов (опыт № 8) под электродетонатор дополнительно помещали слой взрывчатого вещества размером $\varnothing 25 \times 2$ мм. Толщина слоя жидкости варьировалась в пределах $5 \div 30$ мм. Скорости облака частиц и свободной поверхности регистрировались лазерным гетеродин-интерферометром (метод PDV [18, 19]). Погрешность измерения скорости для метода PDV в экспериментах состав-

Скорость частиц при нагружении жидкостей

Давление	Номер опыта	Жидкость	Размер кюветы, мм	$p_{УВ}$, ГПа	$W_{СП}$, км/с	$V_{ФП}^{max}$, км/с
Высокое	1	Вода	$\varnothing 80 \times 12$	10.3	4.44	5.03
	2	Этанол	$\varnothing 80 \times 12$	9.7	4.98	5.9
	3	Глицерин	$\varnothing 80 \times 12$	10.7	4.07	5.02
	4	Масло	$\varnothing 80 \times 12$	7.3	4.08	4.95
Низкое	5	Вода	$\varnothing 85 \times 20$	0.18	0.195	0.25
	6	Вода	$\varnothing 30 \times 5$	0.86	0.76	0.78
	7	Вода	$\varnothing 70 \times 10$	0.093	0.11	0.3
	8	Глицерин	$\varnothing 70 \times 30$	0.22	0.17	—
	9	Глицерин	$\varnothing 70 \times 20$	0.35	0.26	0.25

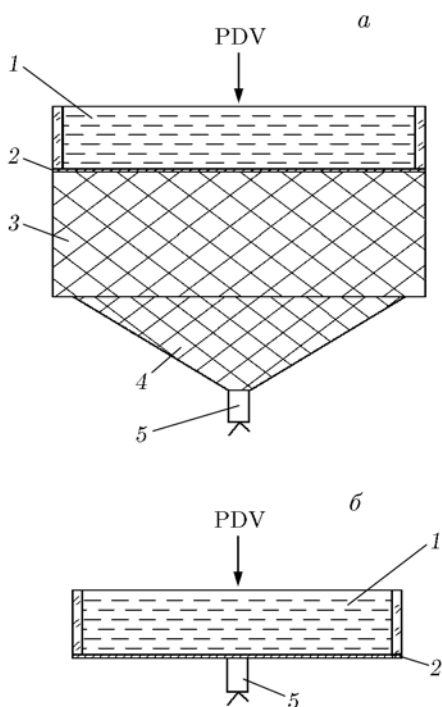


Рис. 1. Схемы постановки эксперимента:

1 — кювета с жидкостью (размер кювет представен в таблице), 2 — металлический диск $\varnothing 100 \times 1$ мм, 3 — взрывчатое вещество октоген $\varnothing 120 \times 40$ мм, 4 — плосковолновый генератор, 5 — электродетонатор

ляла 10 м/с. Датчик метода PDV располагался на расстоянии $35 \div 50$ мм от поверхности.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В таблице представлены результаты экс-

периментов: $W_{СП}$, $p_{УВ}$ — скорость движения свободной поверхности и давление УВ в жидкостях, $V_{ФП}^{max}$ — максимальная скорость фронта потока частиц при выходе УВ на свободную поверхность.

На рис. 2 представлена спектрограмма скорости облака капель этанола, зарегистрированная в опыте № 2. Аналогичные спектрограммы получены для воды, глицерина и масла. Метод PDV, кроме скорости свободной поверхности, регистрирует момент удара и время пролета свободной поверхности жидкости и фронта потока до коллиматора, что при известной базе позволяет определить $W_{СП}$ и среднюю скорость полета капель $\langle V_{ФП} \rangle$. Для воды, глицерина и масла $\langle V_{ФП} \rangle = 4.6 \div 5.0$ км/с, для этанола $\langle V_{ФП} \rangle = 5.6$ км/с (выше, чем у остальных жидкостей). Эти значения в пределах погрешности совпали со значением $\langle V_{ФП} \rangle$, определенным по спектрограммам. Исходя из определенных скоростей $W_{СП}$ оценивались параметры УВ при выходе ее на свободную поверхность.

На спектрограммах первых четырех опытов (см. таблицу) зарегистрированы высокие начальные скорости выбрасываемых жидких частиц ($V_{ФП}^{max} = 4.9 \div 5.9$ км/с). Согласно закону торможения частиц в неподвижном воздухе, при таких высоких скоростях частицы должны иметь высокий градиент спада скорости, что видно в начальный момент времени, например, в опыте № 2. Процедура определения размера частиц по кривым их торможения в газе описана в работе [12]. Картина торможения капель этанола представлена на рис. 2, б.

При резком торможении частиц в газе их

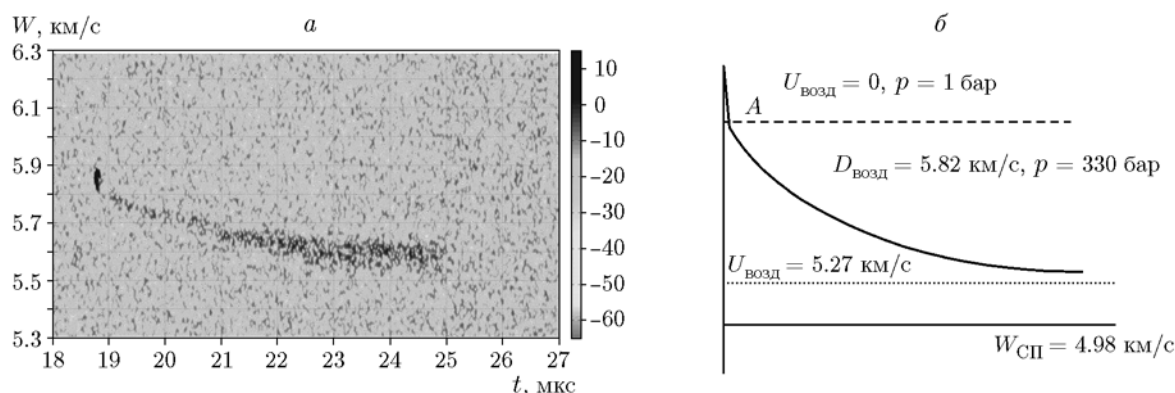


Рис. 2. Спектрограмма (а) и картина торможения капель этанола в воздухе (б)

быстро догоняет воздушная УВ и они попадают в область сжатого ударной волной воздуха ($p = 330$ бар), где скорость газа $U_{\text{возд}}$ должна быть равна скорости поршня $W_{\text{СП}} = 4.98$ км/с. Так как сила торможения частиц в газе пропорциональна величине $(U_{\text{частиц}} - U_{\text{возд}})^2$, то при переходе через фронт воздушной УВ сила торможения и градиент спада скорости частиц резко уменьшаются и на кривой торможения фиксируется резкий излом (точка А на рис. 2). По величине скорости в точке А можно определить скорость воздушной УВ ($D_{\text{возд}} = 5.82$ км/с) и затем из известных справочных данных для этой УВ [20] оценить массовую скорость воздуха ($U_{\text{возд}} = 5.27$ км/с). При этом значения $U_{\text{возд}}$ и $W_{\text{СП}}$ должны совпадать между собой. Но скорость свободной поверхности ($W_{\text{СП}} = 4.98$ км/с) оказалась на 6 % ниже значения $U_{\text{возд}}$. Это превышение связано, по нашему мнению, с тем, что облако капель жидкости, имеющих большие плотность и скорость, дополнительно разгоняет воздух и увеличивает его скорость на ≈ 6 %. То есть метод PDV регистрирует не параметры воздушной УВ, а параметры газокапельной среды как целого.

По времени пролета фронта потока частиц и свободной поверхности жидкости до коллиматора можно определить толщину облака частиц Δx . В опыте № 2 с этанолом свободная поверхность отставала от фронта потока капель на 5 мм. Для воды, глицерина, масла толщина облака равнялась 4, 4.5 и 5.4 мм соответственно. Превышение максимальной скорости фронта потока частиц над скоростью свободной поверхности в опытах составило $25 \div 35$ %.

Реально методом PDV скорость свободной поверхности в опытах не регистрировалась.

Это связано с большой плотностью выбрасываемых частиц, которую лазерный луч не может просветить. В опыте № 1 с водой при толщине облака частиц 4 мм лазерный луч в момент подлета частиц к коллиматору просвечивает ≈ 1 мм (≈ 25 % толщины облака). Величина просвечиваемого лазерным излучением слоя облака определялась из зарегистрированной на спектрограмме дисперсии скорости частиц. Из работ [13, 14] известно, что плотность облака частиц возрастает по мере приближения к свободной поверхности, т. е. лазерный луч просвечивает самую малоплотную часть облака.

Механизм образования плотного капельного облака при выходе УВ на свободную поверхность жидкостей описан в [11], где показано, что кавитационные кластеры растут в поле растягивающих напряжений и жидкость постепенно переходит в своеобразную пенную фазу в виде тонких пленок и сетки из жидких жгутиков. Элементы жидкой сетки при дальнейшем растяжении разделяются на отдельные фрагменты, затем на струйки, которые в силу неустойчивости и поверхностного натяжения разрушаются на отдельные капли. Характерно, что после разрушения даже в капельном состоянии поток сохраняет ячеистый рисунок структуры в течение длительного времени. В нашем случае при нагружении глицерина, воды, спирта и масла до высокого давления реализуется высокая интенсивность фазы разрежения и весь спектр зародышей может достичь видимого размера одновременно. То есть за фронтом сильных волн разрежения плотность насыщения зоны кавитации пузырьками достигает максимального значения и все пузырьки любого размера становятся видимыми.

ми практически одновременно.

РЕГИСТРАЦИЯ СПЕКТРА СКОРОСТЕЙ ЧАСТИЦ ПРИ МАЛЫХ ДАВЛЕНИЯХ НАГРУЖЕНИЯ

В диапазоне малых давлений нагружения ($p \approx 0.1 \div 0.9$ ГПа) проведено три опыта с водой (рис. 3) и два опыта с глицерином (рис. 4). От электродетонатора распространяется расходящаяся УВ треугольного профиля, которая по мере движения в жидкости сильно затухает.

Скорость свободной поверхности зарегистрирована в опытах № 5 и 7 (см. рис. 3). В опыте № 6 плотный слой жидких частиц перекрывает лазерное излучение. Из зарегистрированных в опытах № 5 и 7 значений $W_{СП}$ определяем давление и массовую скорость УВ в воде. Среднее превышение скорости потока частиц над скоростью свободной поверхности в данных опытах составило $\approx 10\%$. Исходя из измеренного значения скорости потока частиц в опыте № 6, считаем, что $W_{СП}$ также на 10% ниже скорости потока частиц. Параметры ударной волны в остальных опытах, представлены в таблице.

На спектрограмме опытов № 5 и 7 (см. рис. 3, а, в) после выхода УВ на поверхность воды зарегистрированы треки скорости. Согласно трекам размер капель или струй в опыте № 5 составил $7 \div 19$ мкм, в опыте № 7 — $5 \div 25$ мкм. Размер капель в этих опытах определялся с учетом влияния сжатия газа после прохождения воздушной УВ (т. е. капли движутся внутри так называемой «воздушной подушки»). В опыте № 6 (см. рис. 3, б) зарегистрировано кавитационное разрушение воды, и на спектрограмме видно облако капель,двигающееся с максимальной скоростью фронта 0.68 км/с и дисперсией скорости облака ≈ 120 м/с. Высокая скорость капельного облака по сравнению с остальными опытами обусловлена более высоким градиентом спада и параметрами УВ. Следует отметить, что такая картина разрушения наблюдается во всех опытах с водой при $p > 0.2 \div 0.3$ ГПа. В опытах с водой при выходе УВ на свободную поверхность отчетливо виден откольный импульс (см. рис. 3). Величина откольной прочности воды определялась по формуле

$$\sigma_{отк} = (1/2)\rho_0 C_l \Delta W$$

и составила 30 МПа. Здесь ρ_0 — начальная плотность материала, C_l — скорость упругой

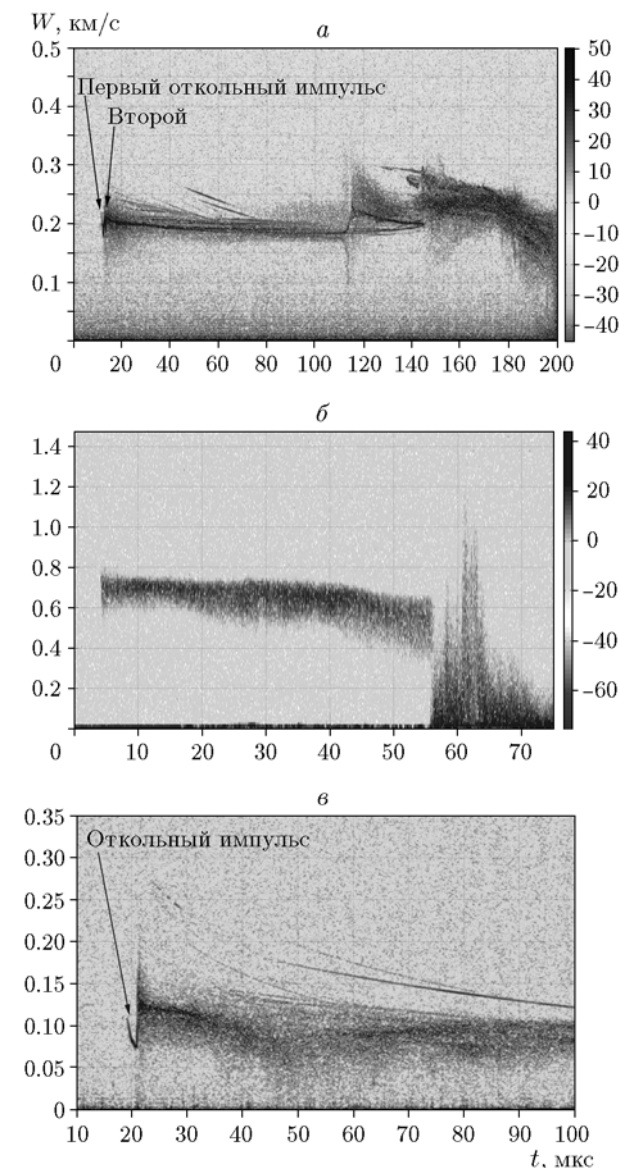


Рис. 3. Спектрограммы экспериментов с водой (а, б, в — опыты № 5, 6, 7 соответственно)

волны в материале, ΔW — величина откольного импульса. Толщина откольного слоя определялась по формуле

$$h = \Delta t / (1/C_l + 1/C_b),$$

где Δt — время действия откольного импульса, C_b — скорость пластической волны в материале. Толщина откольных слоев в разных опытах составила $0.1 \div 0.25$ мм.

На спектрограмме опыта № 5 метод регистрирует скорости трех откольных слоев ($W = 0.19, 0.2$ и 0.205 км/с), поверхности которых отражают лазерное излучение. Во время движе-

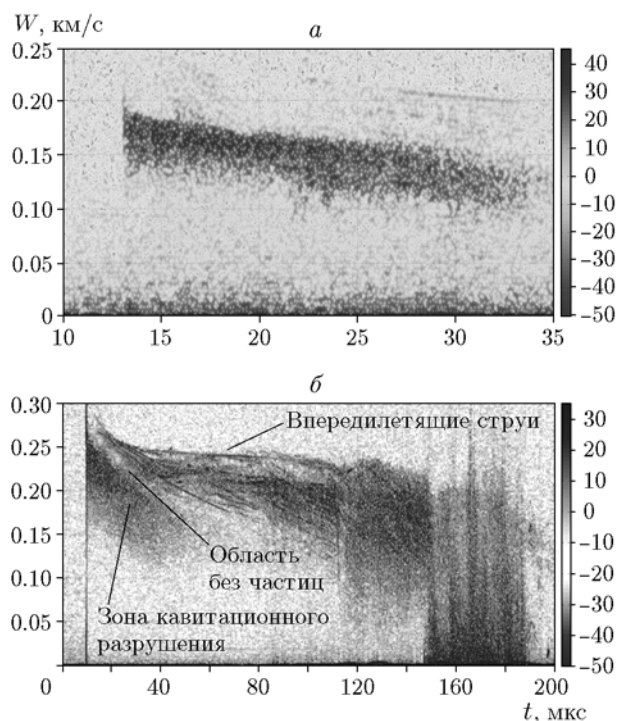


Рис. 4. Спектрограммы экспериментов с глицерином (*a* — опыт № 8, *б* — опыт № 9)

ния откольные слои в течение $\Delta t = 80$ мкс пролетают соответственно 15.2, 16 и 16.8 мм. Видно, что в интервале времени $t = 80 \div 100$ мкс лазерный луч начинает отражаться не от свободной поверхности откольных слоев, а от облака частиц, т. е. за счет сил поверхностного натяжения и неустойчивостей границ происходит дробление таких откольных слоев на капли.

Треки скорости капель или струй глицерина хорошо видны на спектрограмме опыта № 9, приведенной на рис. 4, *б*. В экспериментах треки скоростей чаще регистрируются при «малых» скоростях $\approx 100 \div 200$ м/с и «малом» количестве пыли и редко при больших скоростях. Отсутствие треков в опыте № 8 является предметом дальнейших исследований. На спектрограмме опыта № 9 видны две области: впередилетающих струй и кавитирующей жидкости. В первые 30 мкс движения передний фронт кавитирующей жидкости смещается на 6.6 мм, а фронт самых медленных струй — на 7.8 мм, т. е. струи отрываются от основной массы жидкости на 1.2 мм. Фронт более быстрых струй отрывается на еще большее расстояние. Таким образом, метод PDV регистрирует область, в которой дисперсия скорости равна ≈ 30 м/с (об-

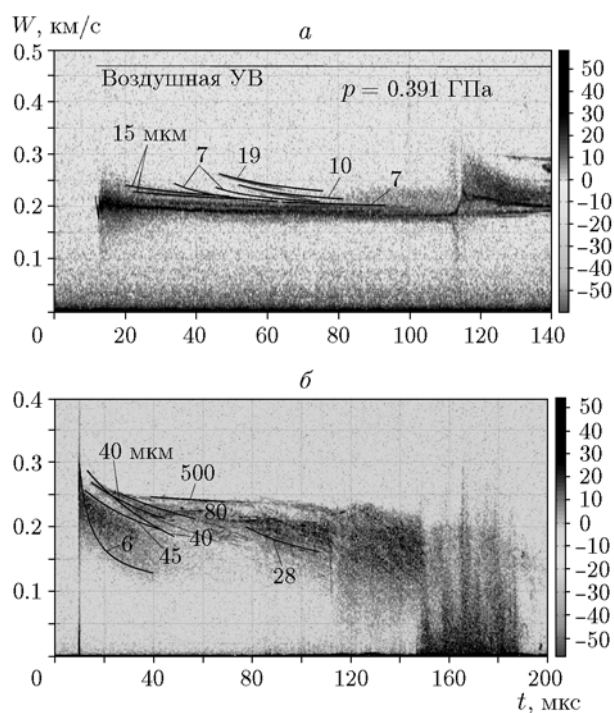


Рис. 5. Спектрограммы экспериментов с водой (*a*, опыт № 5) и глицерином (*б*, опыт № 9) с нанесенными на них треками скоростей частиц

ласть без частиц). Размер мелких капель в опыте № 9 составил $28 \div 80$ мкм. Также видны треки, соответствующие крупным струям размером $200 \div 550$ мкм. Большой по сравнению с водой размер струй глицерина, вероятно, связан с большей вязкостью жидкости.

Доказательством струйного механизма пыления жидкостей является оценка смещения головы самых быстрых струй. Для струй с характерным размером 500 мкм зарегистрирована максимальная скорость 0.25 мм/мкс, тогда на интервале времени движения 100 мкс эти струи пролетают 25 мм. Средняя скорость фронта кавитирующей жидкости не превышает 0.18 км/с, т. е. составляет менее 18 мм в интервале времени движения 100 мкс. Таким образом, крупные струи будут отрываться от остального облака частиц на 7 мм. Этот эффект зарегистрирован также в работе [3], где приведены результаты аналогичных опытов, выполненных с помощью теневой оптической методики. На рис. 5 сопоставлены спектрограммы опытов с водой и глицерином. Черными линиями показаны треки частиц. Размер струй в работе [3] для аналогичных

опытов с глицерином составил от 100 мкм до 1 мм, с водой — $7 \div 19$ мкм, что практически совпадает с нашими результатами. Тонкие струи воды при движении в газовой среде распадаются на капли, а струи глицерина не распадаются.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Известно, что для воды средний размер пузырьков газа составляет $R_0 \approx 1.5$ мкм (спектр распределения размера частиц от их количества приведен на рис. 1 статьи [10]), и кумулятивные струи, возникшие в пузырьках при выходе УВ на свободную поверхность, не могут пробить слой воды, примыкающий к поверхности (на спектрограмме в начале записи процесс пыления не регистрируется). В случае вязкого глицерина размер пузырьков составляет $d = 30 \div 550$ мкм и пыление регистрируется сразу при выходе УВ на свободную поверхность. Таким образом, у глицерина и воды разные механизмы пыления. У глицерина выброс микроструй происходит из пузырьков воздуха, примыкающих к поверхности. У воды свободная поверхность вначале зеркальная и выброса частиц нет, после реверберации волн в первом откольном слое поверхность становится шероховатой и при выходе с нее последующих волн сжатия идет выброс частиц.

В работах [15, 16] показано, что при ударно-волновом плавлении металлов ($p = 30$ ГПа) время изменения структуры струи жидкого олова на ячеистую и газочапельную составляет около 20 мкс. Выброс жидкого металла происходит из одной кумулятивной канавки, и струя в виде плоского листа быстро приобретает ячеистую структуру. Аналогичная сетчатая (ячеистая) структура в экспериментах с $p = 5$ МПа, где вода разрушается сначала на струйки, а затем на капли, зарегистрирована в работе [11]. Таким образом, при изменении давления нагружения на три порядка и более механизм разрушения расплавов металлов и жидкостей на капли идентичен.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью метода PDV проведены эксперименты по регистрации выброса частиц с поверхности жидкостей различной вязкости в широком диапазоне давления нагружения. Показано, что под действием растягивающих

напряжений происходит кавитационное разрушение жидкостей. Зарегистрированы спектры скоростей облака частиц жидкостей и треки скоростей струй и капель, оценен их размер. Размер струй воды составил $5 \div 25$ мкм, глицерина — $30 \div 550$ мкм. Разница в размере частиц может быть обусловлена существенным различием вязкости глицерина и воды. Определена откольная прочность воды, которая составила 30 МПа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Prudhomme G., Mercier P., Benier L., Frugier P.-A. Frontal and tilted PDV probes for measuring velocity history of laser-shock induced calibrated particles // J. Phys. Conf. Ser. — 2014. — V. 500.
2. Loison D., de Resseguier T., et al. Laser shock-induced melting and fragmentation in metals // Proc. SCCM. — Chicago, 2001. — P. 1545–1548.
3. Невмержицкий Н. В., Сотсков Е. А., Сеньковский Е. Д., Абакумов С. А. и др. Микроскопическая электронно-оптическая регистрация процесса выброса частиц со свободной поверхности ударно-нагруженных металлов и жидкостей // XV Харитоновские научные чтения. — Саров, 2013.
4. Невмержицкий Н. В., Михайлов А. Л., Раевский В. А. и др. Микроскопическая электронно-оптическая регистрация процесса выброса частиц со свободной поверхности ударно-нагруженного свинца // ВАНТ. — 2010. — № 3. — С. 3.
5. Бойко В. М., Поплавский С. В. Экспериментальное исследование двух типов срывного разрушения капли в потоке за ударной волной // Физика горения и взрыва. — 2012. — Т. 48, № 4. — С. 76–82.
6. Бойко В. М., Поплавский С. В. К вопросу о динамике ускорения капли на ранней стадии скоростной релаксации в ударной волне // Физика горения и взрыва. — 2009. — Т. 45, № 2. — С. 101–108.
7. Кедринский В. К. Пузырьковый кластер, кумулятивные струи и кавитационная эрозия // ПМТФ. — 1996. — Т. 37, № 4. — С. 22.
8. Бойко В. М., Поплавский С. В. Динамика частиц и капель в потоке за ударной волной // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. — 2007. — № 3. — С. 110–120.
9. Gelfand V. E. Droplet breakup phenomena in flows with velocity lag // Prog. Energy Combust. Sci. — 1996. — V. 22. — P. 201–265.
10. Кедринский В. К., Вшивков В. А., Дудникова Г. И. Роль кавитационных эффектов в механизмах разрушения и в крупномасштабных взрывных процессах // Вычислит. технологии. — 1997. — Т. 2, № 2. — С. 63.

11. **Кедринский В. К.** Гидродинамика взрыва. Эксперимент и модели. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000.
12. **Федоров А. В., Михайлов А. Л., Антонюк Л. К., Шмелев И. В.** Экспериментальное исследование срывного разрушения капель и струй при их выбросе с поверхности жидкостей // Физика горения и взрыва. — 2016. — См. настоящий выпуск. — С. 115–121.
13. **Buttler W. T., Oró D. M., Preston D. L., Mikaelian K. O., Cherne F. J., Hixson R. S., Mariam F. G., Morris C., Stone J. B., Terrones G., Tupa D.** Unstable Richtmyer — Meshkov growth of solid and liquid metals in vacuum // J. Fluid Mech. — July 2012. — V. 703. — P. 60–84. — DOI: <http://dx.doi.org/10.1017/jfm.2012.190>.
14. **Buttler W. T., Oró D. M., Preston D. L.** The study of high speed surface dynamics using a pulsed proton beam // Proc. SCCM. — 2011. — Chicago, 2011.
15. **Sorenson D. S., Pazuchanics P., Johnson R.** Ejecta particle formation from micro-jets (U) // Proc. NEDPC. — Los Alamos, 2013.
16. **Sorenson D. S., Minich R. W., Romero J. L., et al.** Ejecta particle size distributions for shock loaded Sn and Al metals // J. Appl. Phys. — 2002. — V. 92, N 10. — P. 5830.
17. **Георгиевская А. Б., Раевский В. А.** Оценка спектральных характеристик частиц, выбрасываемых со свободной поверхности металлов и жидкостей под действием ударной волны // XIII Харитоновские научные чтения. — Саров, 2011. — С. 597.
18. **Jensen B. J., Holtkamp D. B., Rigg P. A., Dolan D. G.** Accuracy limits and window corrections for photon Doppler velocimetry // J. Appl. Phys. — 2007. — V. 101. — 013523.
19. **Strand O. T., Goosman D. R., Martinez C., Whitworth T. L.** Compact system for high-speed velocimetry using heterodyne techniques // Rev. Sci. Instrum. — 2006. — V. 77. — P. 083108-1–083108-8.
20. **Физика взрыва** / под ред. Л. П. Орленко. — М.: Физматлит, 2002. — Т. 1.

*Поступила в редакцию 11/VII 2015 г.,
в окончательном варианте — 17/II 2016 г.*
