

УДК 532.529+533.6

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СРЫВНОГО РАЗРУШЕНИЯ КАПЕЛЬ И СТРУЙ ПРИ ИХ ВЫБРОСЕ С ПОВЕРХНОСТИ ЖИДКОСТИ

А. В. Фёдоров, А. Л. Михайлов, Л. К. Антонюк, И. В. Шмелёв

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

Приведены результаты экспериментов по исследованию динамики разрушения капель и струй, движущихся в газовой среде после их ударно-волнового выброса с поверхности жидкости и расплавленного металла. Методом лазерного гетеродин-интерферометра (PDV) регистрировались скорости струй, облака капель и свободной поверхности, а также параметры торможения капель и струй в газе. Определялось время периода индукции срыва и размеры капель после дробления.

Ключевые слова: ударная волна, свободная поверхность, число Вебера, взрывчатое вещество, гетеродин-интерферометр, спектрограмма.

DOI 10.15372/FGV20160411

ВВЕДЕНИЕ

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 [1–7]. В работе [7] показано, что при выходе ударной волны (УВ) на свободную поверхность жидкости происходит выброс струй, их размер определяется вязкостью жидкости. Под действием аэродинамических сил в газовой среде струи разрушаются и дробятся на мелкие капли [2–9]. В соответствии с [6, 8] в зависимости от числа Вебера (We) существует шесть основных механизмов или режимов дробления:

- 1) вибрационное дробление (vibrational breakup), $We = 8 \div 12$;
- 2) дробление по типу «парашют» (bag breakup), $12 < We < 50$;
- 3) дробление по типу «парашют» со струйкой (bag-and-stamen breakup), $50 < We < 100$;
- 4) срыв пограничного слоя жидкости с экватора капли (sheet stripping), $100 < We < 350$;
- 5) срыв микрокапель с гребней волн, возникающих на наветренной поверхности капли (wave crest stripping), $We > 350$;
- 6) катастрофическое дробление (catastrophic breakup), $We > 1400$.

Авторы [6] отмечают, что, к сожалению, характер и возможные разновидности разру-

шения капель и струй жидкости в потоке газа и спектр частиц, возникающих в результате разрушения, пока еще исследованы недостаточно.

Цель работы — исследование процесса срывного разрушения капель и струй расплавленного металла и вязкой жидкости, определение спектра частиц, параметров дробления и времени индукции срыва.

МЕТОД PDV

Лазерный гетеродин-интерферометр (метод PDV — photon Doppler velocimetry) основан на использовании оптического гетеродина с анализом амплитудно-частотных характеристик интерференционного сигнала от опорной волны ($f_{\text{пр}}$) и волны, отраженной ($f_{\text{отр}}$) от движущейся поверхности. Отраженная сигнальная волна (зондирующий луч) непрерывно меняет свою фазовую составляющую, а при рекомбинации с опорной волной образуется сигнал с биениями интенсивности определенной частоты. Эта частота прямо пропорциональна скорости движущейся поверхности и может быть определена при помощи современного оборудования для оцифровки и спектрального анализа сигнала с результатом на выходе в виде спектрограммы профиля скорости от времени.

Принципиальная схема методики лазерного гетеродин-интерферометра представлена на рис. 1.

Излучение по оптоволоконному каналу передается от лазера к датчику. Собранный с

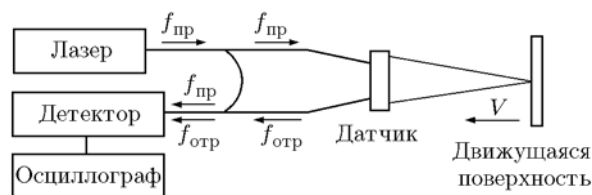


Рис. 1. Принципиальная схема лазерного гетеродин-интерферометра

движущейся поверхности свет с доплеровским сдвигом передается по оптоволокну к детектору. Часть зондирующего (опорного) излучения по отводящей схеме также передается непосредственно от лазера к детектору без фазового сдвига. Далее посредством интерференции отраженного и опорного лучей, идущих в одном направлении в одном волокне, реализуется амплитудная модуляция результирующего сигнала по изменению фазы, регистрируемая детектором. Регистрация сигнала с детектора осуществляется с помощью широкополосного осциллографа. Фактически гетеродин-интерферометр представляет собой классический интерферометр Майкельсона, целиком построенный на оптоволоконном оборудовании (рис. 2).

Зависимость скорости исследуемого объекта от частоты регистрируемого интерференционного сигнала в каждый момент времени для интерферометра Майкельсона можно выразить следующим образом. При перемещении исследуемого объекта на расстояние Δx раз-

ность фаз в плечах интерферометра изменяется на величину

$$\Delta\varphi = 2\frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta x,$$

где λ_0 — длина волны излучения. Продифференцировав данное выражение по времени, получаем

$$\frac{\delta\varphi}{\delta t} = \omega = 2\pi f = 2\frac{2\pi}{\lambda_0} \frac{\delta x}{\delta t} = 2\frac{2\pi}{\lambda_0} \nu,$$

и окончательно зависимость скорости объекта от частоты принимает вид

$$\nu = f\lambda_0/2.$$

Погрешность измерения скорости методом PDV в экспериментах составляла 10 м/с.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для экспериментов выбраны легкоплавкий галлий (вязкость $\eta = 2 \cdot 10^{-3}$ Па·с) и вязкие жидкости (глицерин, жидкая эпоксидная смола, мед) ($\eta = 1 \div 100$ Па·с). На рис. 3 представлены схемы постановки экспериментов при двух уровнях давления нагружения.

Исследуемые жидкости нагружались до давления 0.1 ÷ 3 ГПа расходящейся ударной волной треугольного профиля от взрыва электродетонатора через стальной диск (рис. 3,а). Галлий нагружался ударом стального диска, который разгонялся продуктами взрыва взрывчатого вещества (ВВ) (рис. 3,б). Пара-

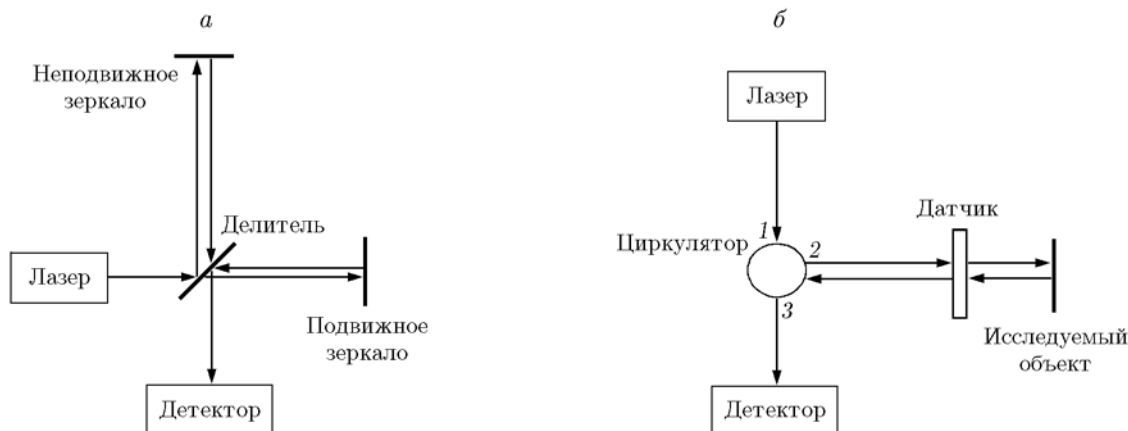


Рис. 2. Интерферометр Майкельсона (а) и упрощенная схема PDV (б):

1 — вход циркулятора, 2, 3 — выходы циркулятора

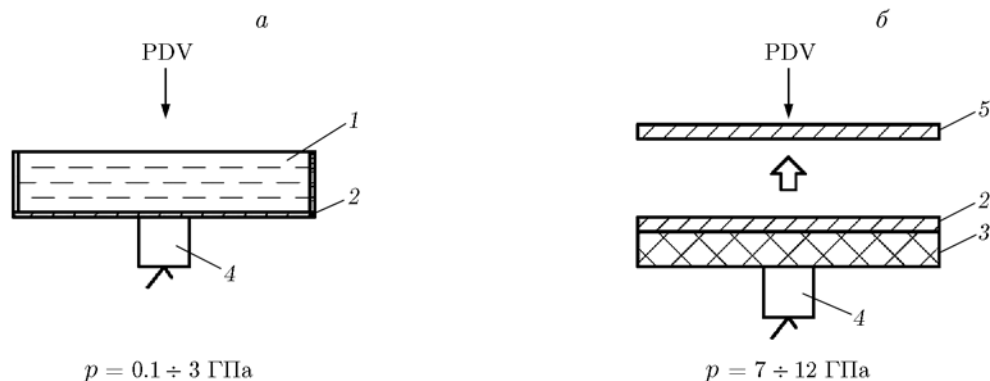


Рис. 3. Схемы постановки эксперимента:

1 — исследуемые жидкости (глицерин, эпоксидная смола, мед), 2 — стальной диск, 3 — взрывчатое вещество, 4 — электродетонатор, 5 — образец галлия

метры ударно-волнового нагружения, размеры стальных дисков и исследуемых материалов представлены в таблице. Регистрация скорости струй, облака капель и свободной поверхности осуществлялась лазерным гетеродин-интерферометром (метод PDV). Датчики комплекса PDV [10, 11] располагались на расстоянии 20 мм от поверхности исследуемого вещества.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В работе [7] показано, что в вязких жидкостях количество струй с поверхности существенно меньше, чем в жидкостях с малой вязкостью ($\eta = 2 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$). Вязкость глицерина ($\eta = 1.21 \text{ Па} \cdot \text{с}$) на три порядка выше, чем у воды ($\eta = 0.8 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$) и расплавов металлов (галлий, олово, свинец — $\eta = (1.5 \div 2.5) \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$). Например, в опытах с глицерином в окне регистрации теневой оптической методикой [7] видно всего четыре струи диаметром $100 \div 500 \text{ мкм}$, а при использовании воды — сотни струй диаметром $6 \div 18 \text{ мкм}$.

По нашему мнению, источником струй является кавитация воздушных пузырьков под действием ударной волны.

Известно, что во всех жидкостях присутствуют пузырьки воздуха. Их размер в смоле составил $3 \div 130 \text{ мкм}$, в меде $8 \div 240 \text{ мкм}$, в глицерине $2 \div 150 \text{ мкм}$. Размер пузырьков измерялся с помощью электронного микроскопа с использованием репера известного размера. На рис. 4 представлена микрофотография, где указаны размеры пузырьков воздуха в меде.

Следует отметить, что на участках по-

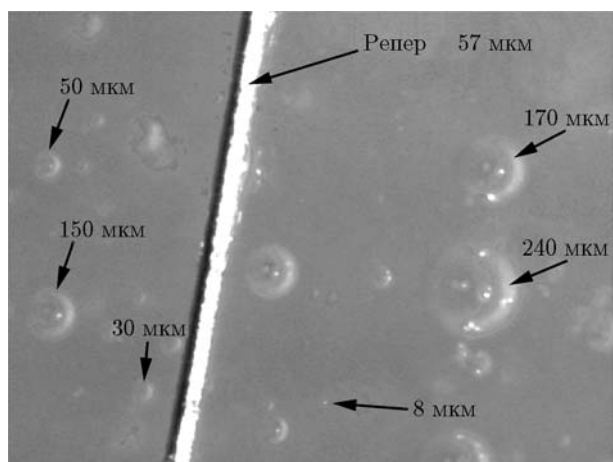


Рис. 4. Микрофотография газовых пузырьков в меде

верхности, где нет струеобразования из-за сильного спада давления за фронтом УВ и действия растягивающих напряжений, исследуемые материалы дробятся на множество тонких откольных слоев, которые в дальнейшем из-за действия тангенциальных растягивающих напряжений дробятся на фрагменты, а затем на капли. Согласно [4, 5] этот процесс называется кавитационным разрушением жидкости. Проведена серия из 10 экспериментов с галлием и вязкими жидкостями (глицерин, эпоксидная смола, мед). Характерные спектрограммы разрушения и дробления струй, выбрасываемых из глицерина и меда, представлены на рис. 5, где зарегистрирована дисперсия скорости передней части облака капель (той части, которая просвечивается лазерным излучением). Из десяти проведенных экспериментов только

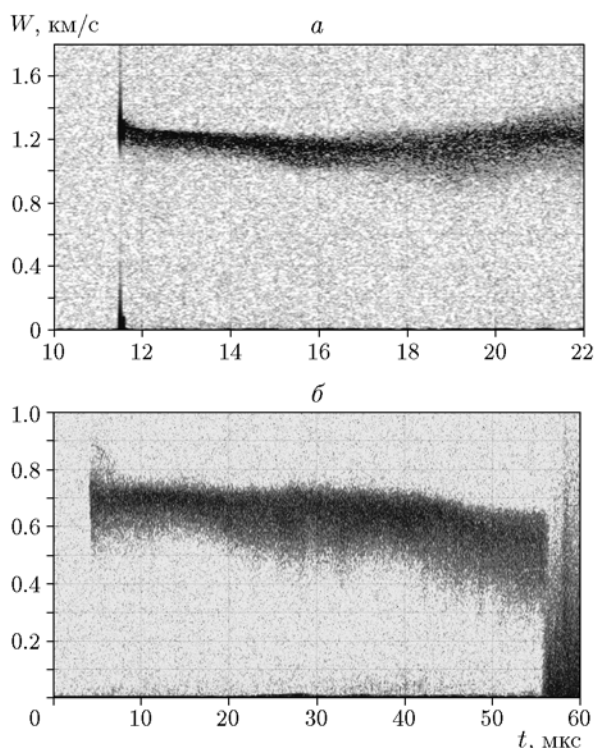


Рис. 5. Характерные спектрограммы скорости облака капель, образующихся в глицерине (*a*, $p = 2.4$ ГПа) и меди (*б*, $p = 0.8$ ГПа)

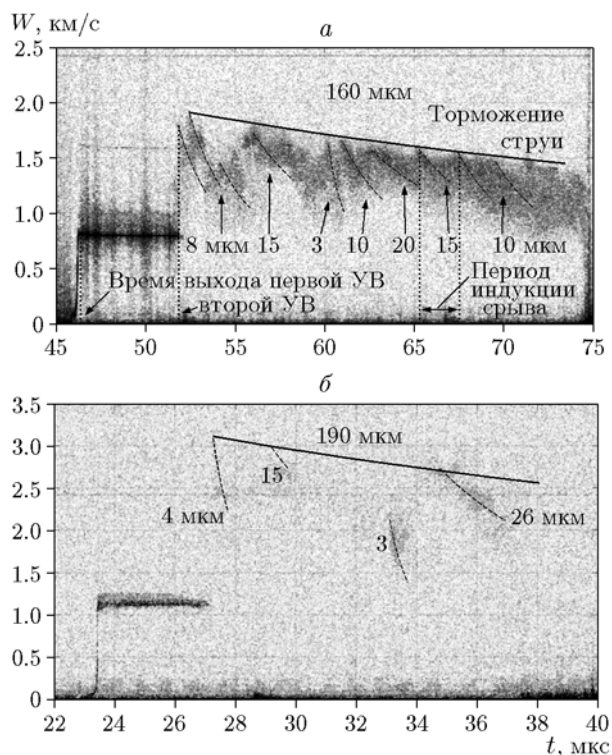


Рис. 6. Торможение и дробление струи галлия:
a — опыт № 1, *б* — опыт № 2 (см. таблицу)

в четырех удалось зарегистрировать выброс струй и их срывное разрушение на капли при движении в воздушной среде. Результаты этих экспериментов приведены на рис. 6–8 и в таблице.

В эксперименте № 1 с галлием (рис. 6, *a*, $p = 7.5$ ГПа, давление оценивалось по скорости свободной поверхности) после выхода второй УВ регистрируются плавление металла и

выброс струи. Выход второй волны на свободную поверхность происходит за счет компактирования откольных слоев. В данном опыте, как и в остальных опытах, по нашему мнению, реализуется пятый режим дробления (срыв микрокапель с гребней волновых возмущений). Кривая торможения (тонкая линия на спектрограмме) соответствует струе диаметром 160 мкм.

Результаты экспериментов

Номер опыта	Материал	ρ , г/см ³	Размеры, мм		$W_{СП}$, км/с	p , ГПа	We	Re	η , Па·с	σ , мН/м	t_i , мкс	
			стального диска	образца или кюветы с жидкостью							расчет	эксперимент
1	Галлий	6.0	∅60 × 2.3	∅60 × 2.3	0.81	7.5	540	21 000	$2.06 \cdot 10^{-3}$	700	2.5	1.8
2	Галлий	6.0	∅60 × 2	∅60 × 2.3	1.16	11.7	1 700	41 000	$2.06 \cdot 10^{-3}$	700	1.6	1.9
3	Смола	1.3	∅40 × 2	∅20 × 8	0.25	0.3	330	25 000	60	60	1.2	6
4	Медь	1.5	∅40 × 2	∅33 × 5.5	0.4	0.47	10 300	3 600	200	60	2.0	2.4

Примечание. $W_{СП}$ — скорость движения свободной поверхности, p — давление ударной волны, We — число Вебера, Re — число Рейнольдса, η — динамическая вязкость, σ — поверхностное натяжение, t_i — период индукции срыва.

Штриховыми линиями показаны кривые торможения микрокапель (3 ÷ 20 мкм), сорванных со струи диаметром 160 мкм.

Закон торможения частиц в газе имеет следующий вид:

$$m \frac{dU}{dt} = \frac{1}{2} C_D \rho_g S_m U(t)^2, \quad (1)$$

где m — масса частицы, C_D — коэффициент сопротивления частицы, ρ_g — плотность газа, S_m — площадь миделева сечения частицы, $U(t)$ — скорость частиц. Считалось, что частицы имеют сферическую форму, их массу и миделево сечение определяли по формулам

$$m = \rho_{met} \pi d^3 / 6, \quad (2)$$

$$S_m = \pi d^2 / 4, \quad (3)$$

где ρ_{met} — плотность металла, d — диаметр частицы.

Обозначив через U_0 начальную скорость частиц при $t = 0$ (время выхода УВ на свободную поверхность) и выполнив интегрирование, перепишем уравнение (1) в виде

$$U(t) = \frac{1}{(k/d)t + 1/U_0}, \quad (4)$$

где $k = \frac{3 C_D \rho_l}{4 \rho_0}$. Для определения коэффициента k проводились калибровочные эксперименты по регистрации торможения частиц никеля известного размера в среде воздуха. Для конкретных материалов и газов коэффициент k в уравнении (4) определялся исходя из соотношения плотностей газов и материалов.

При движении в воздухе струя дробится на более мелкие капли размером 3 ÷ 20 мкм (показаны на рис. 6,а пунктирными линиями). Видно, что капли при срывном разрушении, в отличие от струи, тормозятся в воздухе более интенсивно за счет своего меньшего размера. Скорость струи в течение 20 мкс уменьшается от $W_0 = 1.9$ км/с до $W = 1.4$ км/с. Из spectroграммы видно, что процесс срыва капель продолжается на протяжении всего времени регистрации, период индукции срывного разрушения (указан на рис. 6,а) составил ≈ 1.8 мкс.

На рис. 6,б представлена spectroграмма опыта № 2 с более интенсивным нагружением галлия ($p = 11.7$ ГПа). В данном случае после выхода второй УВ наблюдается более интенсивный выброс струи ($W_0 = 3100$ м/с). Штриховыми линиями показаны кривые торможения

капель (3 ÷ 26 мкм) в результате дробления струи расплавленного металла ($d = 190$ мкм). Период индукции срыва составил 1.9 мкс.

На рис. 7 представлена spectroграмма опыта № 4 с медом. В течение ≈ 30 мкс метод регистрирует торможение струи начиная от скорости $W_0 \approx 3.3$ км/с до $W_0 \approx 0.7$ км/с. В процессе торможения струи в начале записи ($W = 2.5 \div 2.0$ км/с) происходит срыв капель размером 18 ÷ 25 мкм, в конце записи ($W = 1.5 \div 1.0$ км/с) — размером 1.5 ÷ 3 мкм. Точка А на spectroграмме соответствует времени удара первых частиц по коллиматору. Период индукции срыва составил 2.4 мкс.

На рис. 8 представлена spectroграмма эксперимента с эпоксидной смолой (опыт № 3). На spectroграмме видны как треки скорости частиц, так и скорость свободной поверхности. Следует отметить, что смола практически про-

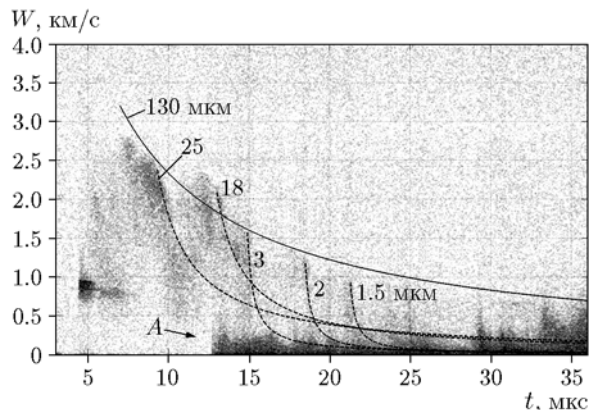


Рис. 7. Торможение и дробление струи меда (опыт № 4)

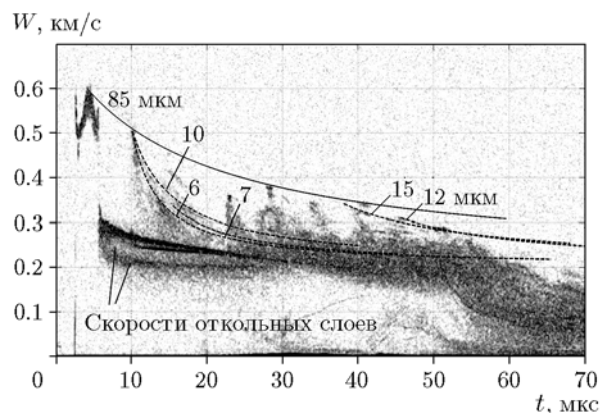


Рис. 8. Торможение и дробление струи эпоксидной смолы (опыт № 3)

зрачна для лазерного излучения с длиной волны $\lambda = 1550$ нм, и потому на спектрограмме видны скорости трех откольных слоев. В данном опыте, в отличие от трех предыдущих, торможение капель происходит в газе, сжатом ударной волной. После прохождения УВ, воздух сжимается и приобретает скорость, равную скорости поршня (свободной поверхности). Соответственно, частицы не могут затормозиться до скорости меньшей, чем скорость движения воздуха. Размер частиц в этом эксперименте находился в диапазоне $7 \div 15$ мкм. Период индукции срыва капель для струи диаметром 85 мкм составил ≈ 6 мкс. При $t = 51$ мкс частицы встречаются с воздушной УВ, отраженной от задней стенки кюветы, и их скорость резко снижается до скорости газа в этой области.

В работе [6] рассмотрены два механизма реализации срывного разрушения струи (режимы дробления 4 и 5):

— образование пограничного слоя за счет силы трения и последующий его срыв с поверхности струи;

— срыв капель с гребней волновых возмущений, образующихся при развитии неустойчивости Кельвина — Гельмгольца.

Средние размеры капель в первом механизме оцениваются величиной порядка толщины пограничного слоя жидкости, а время индукции срыва соответствует времени формирования пограничного слоя и определяется в соответствии с [6] по формуле

$$t_i \approx 0.37(d_0/u)(\rho_l/\rho_g)^{1/2},$$

где t_0 — период индукции срыва, ρ_g , ρ_l — плотности жидкости и газа, d_0 — начальный диаметр струи, u — скорость газа.

Рассчитанные по данной формуле времена индукции срыва ($1.6 \div 2.5$ мкс) представлены в таблице и неплохо согласуются с экспериментальными данными ($1.5 \div 6$ мкс). Результаты экспериментов свидетельствуют, что, по видимому, аэродинамическое дробление струи начинается по четвертому режиму со срывом пограничного слоя (дробление за счет «сдирания» с поверхности), а заканчивается по пятому режиму, когда срыв капель происходит с гребней волновых возмущений. Для шестого режима характерно разрушение ядра струи на большие (≈ 100 мкм) капли. Так как мы в экспериментах таких крупных капель не заре-

гистрировали, то, следовательно, и данный режим еще не достигнут.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены эксперименты по исследованию динамики разрушения капель и струй, движущихся в газовой среде при их ударно-волновом выбросе с поверхности жидкости и расплавленного металла. Методом PDV зарегистрирован выброс струй в вязких жидкостях и определены параметры их торможения в газе. Показано, что при торможении струи в воздухе происходит ее срывное разрушение и дробление на мелкие капли. Рассмотрены различные режимы дробления струи, которые зависят от числа Вебера. При дроблении струй жидкостей диаметром $85 \div 190$ мкм образуются капли размером $1.5 \div 25$ мкм. Аналогичная картина выброса и дробления струй зарегистрирована для легкоплавкого галлия, где при дроблении струй диаметром $160 \div 190$ мкм размер капель составил $3 \div 26$ мкм. Экспериментально определено время индукции срыва капель — $1.8 \div 6$ мкс.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федоров А. В., Шульгин А. В., Поплавский С. В. О движении частицы за фронтом ударной волны // Физика горения и взрыва. — 2010. — Т. 46, № 2. — С. 101–110.
2. 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.
3. Gelfand V. E. Droplet breakup phenomena in flows with velocity lag // Prog. Energy Combust. Sci. — 1996. — V. 22. — P. 201–265.
4. 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.
5. Кедринский В. К. Гидродинамика взрыва. Эксперимент и модели. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000.
6. 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.
7. Невмержицкий Н. В., Михайлов А. Л., Раевский В. А., Сасик В. С. и др. Микроскопическая электронно-оптическая регистрация процесса выброса частиц со свободной поверхности ударно-нагруженного свинца // XIII Харитоновские научные чтения: сб. докл. — Саратов, 2011. — С. 604.

8. **Pilch M., Erdman C. A.** Use of breakup time data and velocity history data to predict the maximum size of stable fragments for acceleration-induced breakup of liquid drop // Intern. J. Multiphase Flow. — 1987. — V. 13. — P. 741–757.
9. **Борисов А. А., Гельфанд Б. Е., Натанзон М. С., Коссов О. М.** О режимах дробления капель и критериях их существования // Инж.-физ. журн. — 1981. — Т. 40, № 1. — С. 64–69.
10. **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. — № 101. — P. 10.
11. **Strand O. T., Goosman D. R., Martinez C., Whitworth T. L.** Compact system for high-speed velocimetry using heterodyne techniques // Rev. Sci. Instrum. — 2006. — N 77. — P. 083108(1–8).

*Поступила в редакцию 16/VI 2015 г.,
в окончательном варианте — 17/II 2016 г.*
