

- 3 Б.Л. Глушак. Физика взрыва: Сборник задач и упражнений с решениями. Саров. ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ". 2008. 264 с.
- 4 Кузьмицкий И.В., М.В. Жерноклетов, В.В. Комиссаров. Новый подход к построению уравнения состояния вещества с фазовым переходом на фронте ударной волны. Уравнение состояния фенилона//Физика горения и взрыва. 2012. Т. 48, № 4. С. 103-113//Combustion, Explosion, and Shock Waves. 2012. Vol. 48, № 4. PP. 465-474.
- 5 И.В. Кузьмицкий. Фазовое превращение в бериллии. Метод нескольких виртуальных экранов//Труды международной конференции XVII Харитоновские тематические научные чтения. Саров. 2016. С. 212-223.
- 6 Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. VI. Гидромеханика: М. «Наука». 1986. 736 с.
- 7 И.В. Кузьмицкий. Затухание ударной волны с фазовым превращением за фронтом ударного скачка. // Тезисы международной конференции XIX Харитоновские тематические научные чтения. Саров. 2017.

РЕГИСТРАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ОТКОЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ ВОДЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЕЁ ИСХОДНОГО СОСТОЯНИЯ

А.В. Федоров, О.Н. Игнатова, Л.К. Антонюк, И.С. Гнутов, Т.А. Говорунова, А.О. Яговкин

РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия

Согласно теоретическим расчетам жидкости могут выдерживать большие растягивающие напряжения, достигающие 100–1000 МПа [1–3]. В то же время в условиях статических испытаний [4] и при исследовании кавитации в интенсивном звуковом поле [5–8] наблюдаются значительно меньшие величины растягивающих напряжений. Это расхождение объясняется наличием в реальных жидкостях гетерогенных очагов (твердые включения, газовые пузырьки и др.), на которых инициируется рост пор, являющийся механизмом разрушения жидкостей. Например, согласно [8,9], общее количество неоднородностей с характерным размером менее 5 мкм для воды составляет $\approx 10^6 \text{ см}^{-3}$. При этом из всех содержащихся в жидкости примесей существенное влияние на ее прочность могут оказать только пузырьки, средний размер которых составляет $\approx 1 \text{ мкм}$. Если откольное разрушение твердого тела изучено достаточно широко [10], то вопрос откольной прочности жидкостей и расплавов металлов мало изучен, а данные по их откольной прочности могут сильно различаться [8-16].

В настоящей работе представлены результаты исследований с целью определения зависимости откольной прочности воды от количества растворенного в ней газа. Кроме того, проведены численные расчеты с использованием модели ДРК-L [11] для интерпретации экспериментальных результатов.

Постановка эксперимента

Для экспериментов была выбрана вода с различным количеством растворенного в ней газа. Вода по содержанию в ней растворенного газа была разделена на три группы: свеженалитая водопроводная вода, вода отстоявшаяся в течении 1 и 6 дней, газированная вода, отстоявшаяся в течении 5-7 минут до отсутствия выхода из нее газа в виде пузырьков. Вода (кювета $\varnothing 90 \times 10 \text{ мм}$) нагружалась до давления $P = 0.3 \text{ ГПа}$. Нагружение осуществлялось расходящейся от взрыва электродетонатора ударной волной треугольного профиля через алюминиевый диск $\varnothing 120 \times 1 \text{ мм}$. Результаты измерения параметров откольной прочности и толщины откола для опытов с водой

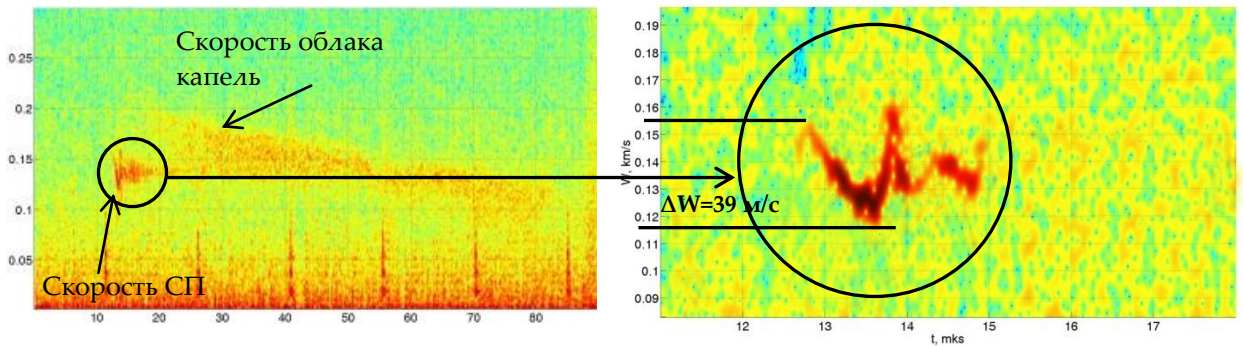
представлены в таблице 1, где ΔW – разность скоростей между первым максимумом и минимумом в откольном импульсе, $W_{СП}$ – скорость при выходе ударной волны, $W_{\text{max_пыли}}$ – максимальное значение скорости выброшенных капель при выходе ударной волны на СП, $\sigma_{\text{отк}}$, $\Delta_{\text{отк}}$ – значения откольной прочности и толщины откола (см.рис.2). Зависимости движения скорости свободной поверхности (СП) регистрировались лазерным гетеродин-интерферометром (метод PDV). Метод PDV, являясь результатом развития и модернизации лазерных интерферометрических методов измерения скорости [17,18], основывается на использовании оптического гетеродинирования с анализом интерференционного сигнала суммы опорной и сигнальной волн. Результаты получены с использованием лазерного гетеродин-интерферометрического комплекса [19-20]. Расстояние от коллиматора до поверхности воды во всех экспериментах составляло 10 мм.

Таблица 1. Экспериментальные результаты

№	Исследуемая жидкость	ΔW	$W_{СП}$	$W_{\text{max_пыли}}$	$\sigma_{\text{отк}}$	$\Delta_{\text{отк}}$
1	Свеженалитая водопроводная вода	39 м/с	156	270м/с	31МПа	0.85 мм
2	Свеженалитая водопроводная вода	39 м/с	190	-	31МПа	0.85 мм
3	Вода, отстоявшаяся 6 дней	49 м/с	233	300м/с	39МПа	0.67 мм
4	Вода газированная	20 м/с	143	-	17МПа	0.75 мм
5	Вода, отстоявшаяся 1 день	43 м/с	194	275м/с	35МПа	0.79 мм

Во всех экспериментах зарегистрировано ударноволновое пыление поверхности воды. Начальный спектр скорости жидких частиц выбрасываемых с поверхности составил 130 – 300 м/с. Основные причины пыления гладкой жидкой поверхности следующие: кавитация пузырьков воздуха, растворенных в жидкости, неоднородность фронта ударной волны, неустойчивость движения границы раздела воздух-жидкость.

На рисунке 1а) представлена характерная спектрограмма опыта, на которой видно как скорость СП воды, так и скорость облака капель, выброшенного с поверхности. Из спектрограммы видно торможение капель при их движении в воздухе.



а) Характерная спектрограмма эксперимента

б) Увеличенный участок опыта №1

Рисунок 1. Спектрограмма опыта и откольный импульс №1

На рисунке 1б) представлен увеличенный участок спектрограммы опыта №1 с водой, на которой при выходе ударной волны на свободную поверхность отчетливо зарегистрирован откольный импульс. Величина ΔW составила 39 м/с, откольная прочность 31 МПа, толщина откола 0.85 мм.

Амплитуда критических растягивающих напряжений $\sigma_{\text{отк}}$ вычислялась из соотношения (1):

$$\sigma_{\text{отк}} = \frac{\rho_0 c_0}{2} \Delta W \quad (1)$$

где $\Delta W = W_B - W_C$ – разница между первым максимумом и первым минимумом скоростей; ρ_0 – плотность материала; c_0 – объемная скорость звука в материале.

Откольные импульсы зарегистрированы для всех трех групп воды. Откольная прочность газированной воды оказалась самой низкой и составила $\sigma_{\text{отк}}=17\text{МПа}$. Максимальная откольная

прочность зарегистрирована у воды, отстоявшейся в течении 6 дней и она составила $\sigma_{отк}=39$ МПа. Для свеженалитой воды и воды отстоявшейся в течении одного дня величина откольной прочности составила 31-35 МПа. Таким образом видно, что наличие в газированной воде пузырьков воздуха (гетерогенных очагов, инициирующих рост пор) снижает откольную прочность в 1,8 раза по сравнению со свеженалитой водой, и в 2,3 раза по сравнению с отстоявшейся водой в течении 6 дней. Толщина откольного слоя воды во всех экспериментах составила $0,75 \pm 0,1$ мм.

В ряде опытов на профилях скорости откольных импульсов воды зарегистрирована двухступенчатая структура рисунок 2. Величина растягивающих напряжений первой ступени (точка А рис.2) по разным экспериментам составила от 39-72% от полного откольного импульса. По видимому, величина растягивающих напряжений на первой ступени связана с образованием зоны кавитации в жидкостях, но недостаточна для полного откольного разрушения жидкости. Разрушение жидкости происходит на второй ступени (точка В рис.2) при более высоких значениях растягивающих напряжений.

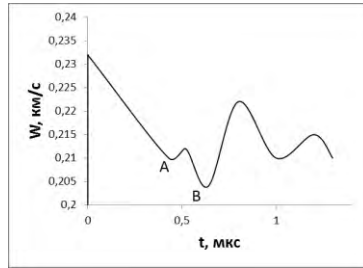


Рисунок 2. Двухступенчатая структура профиля

Проведены расчеты с использованием модели ДРК-L. Основное уравнение для роста и компактирования пор следующее:

$$\dot{R} = \pm \sqrt{\frac{R_{Cell}}{\rho R^3 (R_{Cell} - R)} \left(2 \int_0^t \left\{ \mp P(t)R - \frac{2R}{3} Y \ln\left(\frac{1}{\omega}\right) \mp 2\sigma - 4\mu(1-\omega) \right\} \dot{R} dt \right)}, \quad (2)$$

$$\omega = \left(\frac{R}{R_{Cell}} \right)^3 = \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{8\pi N_0 R^3} \right)}, \quad N_0 = \frac{1}{8\pi (R_{Cell}^3 - R^3)}, \quad (3)$$

$$\sigma = \sigma_0 \left(1 - a_1 \left(\frac{T}{T_K} \right)^{a_2} \right), \quad \mu = \mu_{0L} e^{-a_3 \left(\frac{T}{T_K} \right)^{a_4}}, \quad (4)$$

где R , R_{Cell} – радиус поры и ячейки соответственно, ρ – плотность, Y – изменяющийся во времени предел текучести (для воды $Y=0$), σ – поверхностное натяжение, μ – вязкость, ω – поврежденность, N_0 – плотность пор в единице объема при $R \rightarrow 0$, T – температура, T_K – температура кипения, σ_0 , μ_{0L} – размерные параметры (σ_0 – поверхностное натяжение, μ_{0L} – вязкость), a_1 – a_4 – постоянные. Подробно уравнения модели представлены в работе [11].

В данном случае решалась «обратная» задача – по имеющимся экспериментальным зависимостям подбирался параметр модели – начальная поврежденность (ω_{min}). Для простой воды ω_{min} известно из работы [12]. Для газированной воды этот параметр варьировался и выбирался из условия наилучшего приближения к экспериментальным данным. В таблице 2 приведены параметры уравнений (2)-(4), а на рисунках 3а) и 3б) – экспериментальные и расчетные зависимости скорости движения свободной поверхности воды от времени.

Таблица 2

	ω_{min}	N_0 , 1/см ³	σ_0 , мН/м	a_1	a_2	μ_{0L} , 10 ⁻³ ·Па·с	a_3	a_4	T_K , К
Вода обычная	$4.3 \cdot 10^{-9}$	10 ⁵	110	0.45	1.2	1.73	2.1	5.0	373
Вода газированная	10^{-8}								

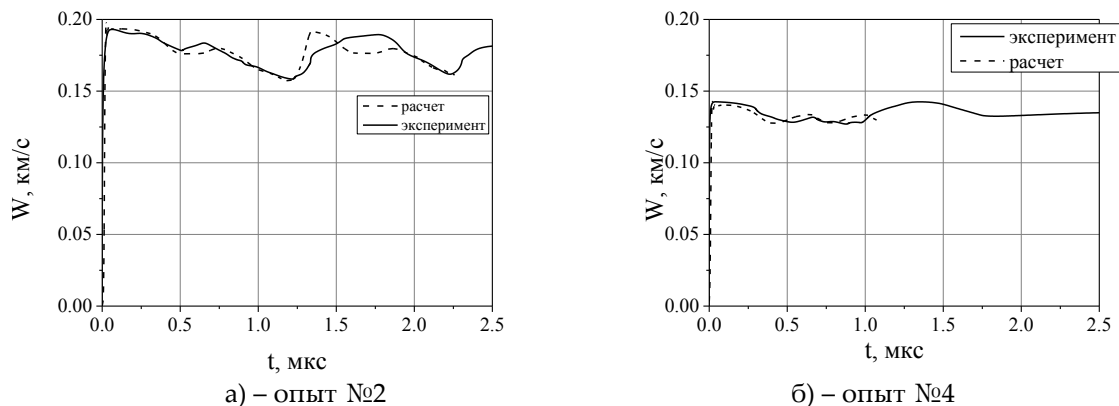


Рисунок 3. Экспериментальные и расчетные зависимости скорости движения свободной поверхности воды от времени

Из рисунков 3а, 3б и таблицы видно, что откольное разрушение воды зависит от начальной поврежденности (размера пор) – чем больше начальный радиус пор или начальная поврежденность (ω_{\min}), тем меньше величина откольной прочности. Наблюдается хорошее согласие экспериментальных и расчетных результатов.

Выводы

С помощью метода лазерного гетеродин-интерферометра выполнены экспериментальные исследования по определению зависимости величины откольной прочности воды от количества растворенного в ней газа. На основе результатов можно сделать следующие выводы: откольная прочность воды зависит от количества растворенного в ней газа. С увеличением количества газа откольная прочность воды уменьшается и для газированной воды составляет 17 МПа, что более чем в 1,8 раза меньше, чем для свежей водопроводной воды (31 МПа). На профилях скорости откольных импульсов воды зарегистрирована двухступенчатая структура. Величина растягивающих напряжений на первой ступени связана с образованием кавитации в жидкостях, но недостаточна для полного откольного разрушения жидкости. По модели ДРК-Л проведены расчёты роста и компактирования пар. Показано, что откольная прочность воды зависит от начальной повреждённости, получено хорошее согласие экспериментальных и расчетных данных.

Список литературы

1. Зельдович Я. Б. К теории образования новой фазы. Кавитация // Журн. эксперим. и теорет. физики. 1942. Т. 12, вып. 11/12. С. 525–538.
2. Fisher J. C. The fracture of liquids // J. Appl. Phys. 1948. V. 19. P. 1062–1067.
3. Корнфельд М. Упругость и прочность жидкостей. М.; Л.: Гостехтеоретиздат, 1951.
4. Скрипов В. П. Метастабильная жидкость. М.: Наука, 1972.
5. Флинн Г. Физика акустической кавитации в жидкости // Физическая акустика / Под ред. У. Мэзона. Т. 1. Методы и приборы ультразвуковых исследований. М.: Мир, 1967. С. 7–138.
6. Рой Н.А. Возникновение и протекание ультразвуковой кавитации. Обзор // Акуст. журн. 1957. Т. 3, N-° 1. С. 3–21.
7. Сиротюк М. Г. Экспериментальные исследования ультразвуковой кавитации // Физика и техника мощного ультразвука. Мощные ультразвуковые поля / Под ред. Л. Д. Розенберга. М.: Наука, 1968. С. 167–220.
8. Кедринский В. К. Нелинейные проблемы кавитационного разрушения жидкости при взрывном нагружении (обзор) // ПМТФ. 1993. Т. 34, N-° 3. С. 74–91.

9. Кедринский В.К., Бесов А.С., Гутник И.Э. Инверсия двухфазного состояния жидкости при импульсном нагружении // Докл. РАН. 1997. Т. 352, N-о 4. С. 477–479.
10. Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортвов В.Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. М.: Янус
11. Гусева М.А., Игнатова О.Н., Раевский В.А., Целиков И.С. Динамическая модель роста и схлопывания пор в жидкостях и твердых веществах // ФГВ. 2017. №1
12. Kedrinskii V.K. Arch. Mech. 1974. V26. #3. P.535-540.
13. Г.И. Канель, А.С. Савиных, Г.В. Гаркушин, С.В. Разоренов: «Динамическая прочность расплавов олова и свинца»; Объединенный институт высоких температур РАН, 125412 Москва, Россия (2015).
14. А.А. Богач, А.В. Уткин ПМТФ 41(4), 198(2000): «Прочность воды при импульсном растяжении»; Институт проблем химической физики РАН, 142432 Черноголовка.
15. С.В. Разоренов, А.С. Савиных, Е.В. Zaretsky: «Особенности упругопластического деформирования и разрушения ударно-сжатой монокристаллической и поликристаллической меди вблизи плавления»; Институт проблем химической Физики РАН, 142432 Черноголовка, Московская область, Россия (2012).
16. Alexander V.Utkin, Vasilij A.Sosikov, Andrey A.Bogach, Vladimir E.Fortov: «Tension of liquids dy shock waves»; Institute of Problems of Chemical Physics RAS, 142432, Chernogolovka, Russia(2003).
17. Strand, Oliver T., et al., "Velocimetry using heterodyne techniques," 26th Int. Conf. on High-speed Photography and Photonics, Proc. of SPIE 5580, Alexandria, 2004.
18. Strand, Oliver T., et al., "Compact system for highspeed velocimetry using heterodyne techniques," Rev. Sci. Instr. 77, 2006.
19. А.В.Фёдоров, А.Л.Михайлов, Л.К.Антонюк, И.В.Шмелёв: «Экспериментальное исследование срывного разрушения капель и струй при их выбросе с поверхности жидкости»; ФГВ, 2016, т.52 ,№4.
20. А.В.Фёдоров, А.Л.Михайлов, С.А.Финюшин, Д.А.Калашников, Е.А.Чудаков, Е.И.Бутусов, И.С.Гнутов: «Регистрация параметров множественного откола и внутренней структуры облака частиц при ударно-волновом нагружении металлов»; ФГВ, 2016, т.149, вып. 2.

ВЛИЯНИЕ ЧИСТОТЫ, РАЗМЕРА ЗЕРНА И МИКРОЛЕГИРОВАНИЯ УРАНА УГЛЕРОДОМ ИЛИ КРЕМНИЕМ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИ КВАЗИСТАТИЧЕСКОМ И УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ

Е.А. Козлов, Д.П. Кучко, А.В. Ольховский, А.Е. Ширококов, Д.Г. Панкратов, А.К. Якунин

РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск, Россия

В дополнение к ранее опубликованным результатам по влиянию квазистатического экструдирования нелегированного урана технической чистоты и его малолегированного молибденом сплава на прочностные свойства при квазистатическом и взрывном нагружении [1-4], в данной работе представлены постановки и результаты первых шести взрывных и ударно-волновых экспериментов по изучению прочностных характеристик образцов из высокочистого мелкозернистого урана, а также урана, микролегированного углеродом С или кремнием Si, при их низкоинтенсивном нагружении ударом приставных ударников из АМц толщиной 0,5 и 1 мм. Для регистрации временных профилей скоростей $W(x,t)$ и перемещений $S(x,t)$ диагностируемых