

УДК 532.538 + 539.593

ИМПУЛЬСНОЕ РАСТЯЖЕНИЕ ЭТИЛОВОГО СПИРТА ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

А. В. Уткин, В. А. Сосиков

Институт проблем химической физики РАН, 142432 Черноголовка

E-mails: utkin@icp.ac.ru, vaso@yandex.ru

Представлены результаты экспериментов по исследованию прочности этилового спирта в условиях импульсного растяжения, реализующегося при взаимодействии треугольного импульса сжатия со свободной поверхностью. Эксперименты проведены в диапазоне скоростей деформирования $4 \cdot 10^4 \div 4 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$. Установлено, что процесс разрушения спирта является двухстадийным. На первой стадии при отрицательном давлении около 14 МПа начинается образование пор, которое происходит с относительно медленной скоростью и проявляется в виде излома на профиле скорости свободной поверхности. На второй стадии скорость роста пористости возрастает, что приводит к формированию откольного импульса. Обсуждается возможность применения модели гомогенного зародышеобразования для интерпретации полученных данных.

Ключевые слова: этиловый спирт, кавитация, откол, ударные волны, импульсное растяжение.

Согласно теоретическим представлениям жидкости могут выдерживать большие растягивающие напряжения, достигающие 0,1–1 ГПа [1–3]. При этом предполагается, что разрушение сплошности вещества происходит в результате возникновения пор по механизму гомогенного зародышеобразования. В то же время на практике в условиях статических испытаний наблюдаются значительно меньшие величины [4], что объясняется наличием в реальных жидкостях гетерогенных очагов, на которых инициируется рост пор.

Приблизиться к условиям разрыва жидкостей при гомогенном зародышеобразовании можно, используя динамическое растяжение. В данной работе для этой цели применяется метод анализа откольных явлений при отражении импульсов сжатия от свободной поверхности исследуемого вещества [5]. Преимущество данного метода состоит в том, что разрушение при длительности импульсов воздействия порядка 1 мкс является объемным (исключается влияние границ) и происходит в тонком слое вещества, что значительно уменьшает количество гетерогенных очагов, способных повлиять на разрыв жидкости. Кроме того, можно ожидать, что предварительное сжатие в ударной волне приведет к частичному схлопыванию пор, что также повышает роль гомогенного зародышеобразования.

Импульсное растяжение в условиях ударно-волнового нагружения использовалось ранее для исследования кавитации жидкостей (глицерина [6–9], воды [10–13], этиленгликоля [11], этилового спирта [12], гексана [9] и ртути [14]). Показано, в частности, что кинетика образования пор и как следствие характер зависимости прочности от скорости деформирования в значительной степени определяются физико-химическими свойствами жидкостей. Для выяснения общих закономерностей кавитации представляет интерес сопоставление особенностей разрушения жидкостей различной структуры. В настоящей работе представлены результаты экспериментов по определению откольной прочности этилового спирта, который ранее практически не исследовался, и рассмотрена возможность

Номер опыта	W_0 , м/с	P_0 , МПа	h_y , мм	$h_{ж}$, мм	ΔW , м/с	P_{s0} , МПа	P_{sm} , МПа	P_s , МПа	$\dot{\epsilon} \cdot 10^{-4}$, с ⁻¹
1	200	246	0,4	8	—	—	—	—	8,6
2	400	246	0,4	8	28	12,8	46	28,8	8,6
3	720	533	Cu	8	30	13,3	64	27,6	6,2
	722	535	Cu	8	27	12,4	60	26,6	4,5
4	269	360	0,4	4	—	—	—	—	17,2
5	544	365	0,4	4	32	14,7	50	32,5	17,2
6	766	581	0,4	1	33	15,1	15,1	15,1	38,6
	777	592	0,4	1	35	16	16	16,0	43,0
7	323	460	0,4	2	—	—	—	—	21,1
8	642	456	0,4	2	30	13,7	37	20,1	21,1
	650	464	0,4	2	29	13,3	36	19,5	20,5
9	899	730	2,0	8	20	9,2	—	30,2	17,4
	901	730	2,0	8	19	8,7	—	29,0	17,4

применения модели гомогенного зародышеобразования для интерпретации полученных результатов. В работе [12] была получена оценка откольной прочности спирта $P_s \approx 48$ МПа, однако использовавшийся метод не позволил установить какие-либо закономерности кинетики разрушения, что и является одной из задач данной работы.

Схема и результаты экспериментов. Схема экспериментов для изучения импульсного растяжения жидкостей приведена на рис. 1. Ударные волны создавались при соударении алюминиевого ударника (1) толщиной 0,2–2 мм, разогнанного продуктами взрыва до скорости 500–600 м/с, с плексигласовым дном кюветы (экран 2) толщиной 2 мм. Условия нагружения варьировались изменением толщины ударника h_y и слоя жидкости $h_{ж}$ (3) и приведены в таблице. Опыты, выполненные в одинаковых условиях, обозначены одним номером и на рисунках приводятся только результаты первого из них. В опыте 3 импульс сжатия формировался в результате непосредственного воздействия продуктов взрыва на медный экран толщиной 20 мм. Для регистрации скорости использовался лазерный интерферометр VISAR [15] с постоянной 80,8 м/с, что позволило провести измерения с по-

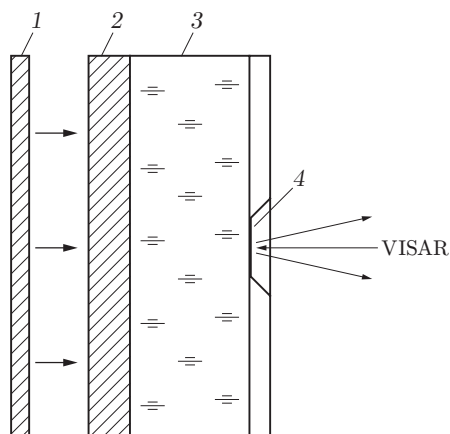


Рис. 1. Схема экспериментов для исследования импульсного растяжения жидкостей: 1 — ударник; 2 — экран; 3 — жидкость; 4 — алюминиевая фольга

грешностью ± 2 м/с и временным разрешением около 2 нс. Лазерный луч отражался от алюминиевой фольги толщиной 7 мкм (4), отделяющей жидкость от воздуха. Геометрические размеры сборки (диаметр плоского участка ударника был более 40 мм) обеспечивали одномерные условия нагружения и исключали приход боковой волны разгрузки за время проведения эксперимента. К моменту выхода на свободную поверхность импульс сжатия имел форму треугольника, что определялось в отдельных экспериментах по схеме, аналогичной приведенной на рис. 1, но фольга помещалась внутрь жидкости.

В опытах использовался этиловый спирт плотностью $\rho_0 = 0,786$ г/см³ при начальной температуре 19 °С, скорость звука $c_0 = 1,165$ км/с. Профили массовой скорости, построенные по результатам экспериментов, представлены на рис. 2–4. Амплитуда импульсов сжатия P_0 изменялась от 246 до 730 МПа, скорость деформирования в разгрузочной части импульса $\dot{\epsilon} = (dW/dt)/(2c_0)$ — от $4,5 \cdot 10^4$ до $4,3 \cdot 10^5$ с⁻¹. Максимальные давления рассчитывались по обобщенной ударной адиабате [16] $D = c_0 + 2u$ (u — массовая скорость), которая близка к ударной адиабате, предложенной в [17] при $u < 2$ км/с.

Выход на свободную поверхность ударной волны вызывает скачкообразное увеличение скорости поверхности до значения W_0 , равного удвоенной массовой скорости в ударной волне. Внутри спирта распространяется центрированная волна разрежения, которая, взаимодействуя с падающей волной разгрузки, приводит к внутреннему разрыву — отколу. В процессе разрушения растягивающие напряжения релаксируют к нулю, формируя волну сжатия, которая выходит на свободную поверхность в виде откольного импульса. Отмеченные особенности наблюдаются на профилях скорости, приведенных на рис. 2–4. В опытах 1, 4 и 7 измерены массовые скорости в падающих импульсах сжатия, а в опытах 2, 5 и 8 — соответствующие им скорости свободной поверхности. Как видно из сопоставления этих профилей, правило удвоения скорости выполняется с хорошей точностью. Это подтверждает отсутствие кавитации на границе фольга — спирт, которая привела бы к уменьшению сцепления фольги со спиртом и как следствие к уменьшению крутизны спада скорости сразу после выхода ударной волны на свободную поверхность. Штриховыми линиями на рис. 2–4 показано, как изменялась бы скорость свободной поверхности в отсутствие разрушения.

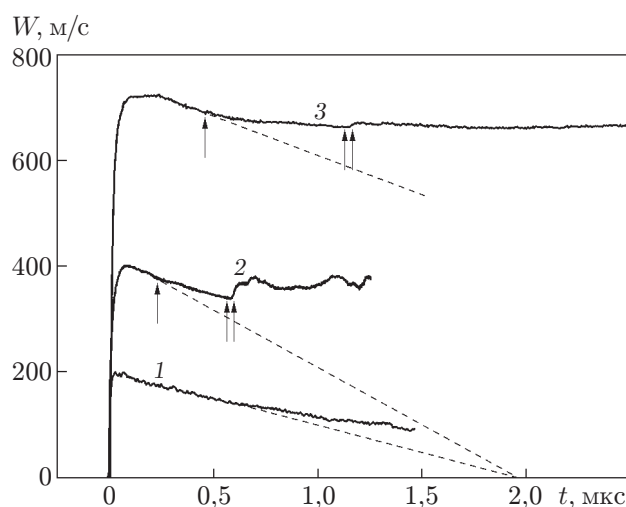


Рис. 2. Профили скорости свободной поверхности (2, 3) и массовой скорости (1), соответствующей опыту 2 (штриховые линии — экстраполяция скорости свободной поверхности в отсутствие кавитации)

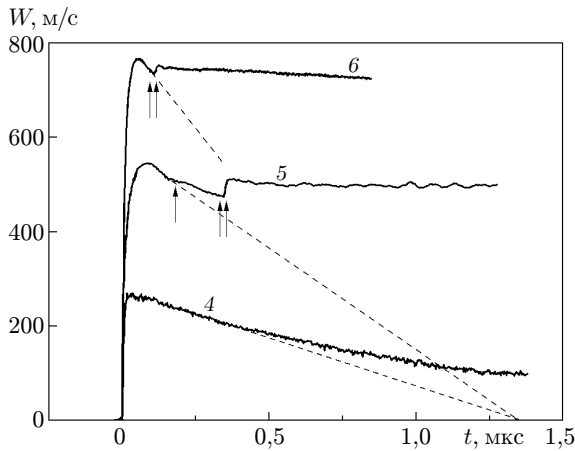


Рис. 3

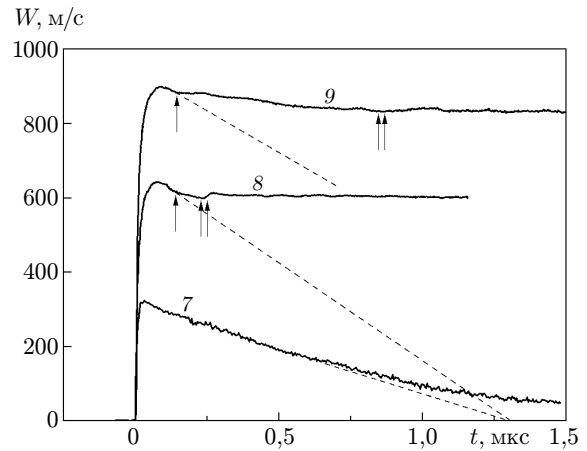


Рис. 4

Рис. 3. Профили скорости свободной поверхности (5, 6) и массовой скорости (4), соответствующей опыту 5 (штриховые линии — экстраполяция скорости свободной поверхности в отсутствие кавитации)

Рис. 4. Профили скорости свободной поверхности (8, 9) и массовой скорости (7), соответствующей опыту 8 (штриховые линии — экстраполяция скорости свободной поверхности в отсутствие кавитации)

Измерения параметров падающего импульса позволяют однозначно выявить влияние кинетики разрушения на разгрузку. Например, в фазе уменьшения скорости свободной поверхности (опыт 3) приблизительно через 0,25 мкс после выхода ударной волны фиксируется излом, отмеченный на рис. 2 вертикальной стрелкой. Подобные особенности обусловлены либо формой исходного импульса, либо кавитацией. Из сопоставления профилей 1 и 2 видно, что на падающем импульсе сжатия излом в окрестности 0,25 мкс отсутствует, следовательно, его возникновение на профиле скорости свободной поверхности вызвано кинетикой роста пор. Более того, аналогичный излом наблюдается во всех экспериментах (за исключением опыта 6), и соответствующую ему величину отрицательных давлений P_{s0} следует рассматривать как порог начала разрушения, который определяется по величине скорости свободной поверхности W_{s0} в точке излома [5]:

$$P_{s0} = 0,5\rho_0 c_0 \Delta W, \quad (1)$$

где $\Delta W = W_0 - W_{s0}$. Сечение, в котором оно достигнуто, равно половине произведения c_0 на время возникновения излома и, например, в опыте 3 находится в 150 мкм от свободной поверхности.

Рассчитанный таким образом порог начала разрушения представлен в таблице и на рис. 5 как зависимость $P_{s0}(\dot{\epsilon})$. Видно, что P_{s0} практически постоянен во всем интервале скоростей деформирования и равен $(14,5 \pm 1,5)$ МПа. Исключением является опыт 9, в котором амплитуда ударной волны перед выходом на свободную поверхность была максимальна, и это, вероятно, привело к резкому, более чем в 1,5 раза, снижению порога кавитации.

После начала кавитации внутри жидкости продолжается рост отрицательных давлений по мере распространения волны разрежения, отраженной от свободной поверхности, в глубь образца. При этом объемное разрушение происходит относительно медленно и проявляется на профиле скорости не в виде откольного импульса, а как уменьшение абсолютного значения градиента скорости за точкой излома [18, 19]. Это происходит до тех пор,

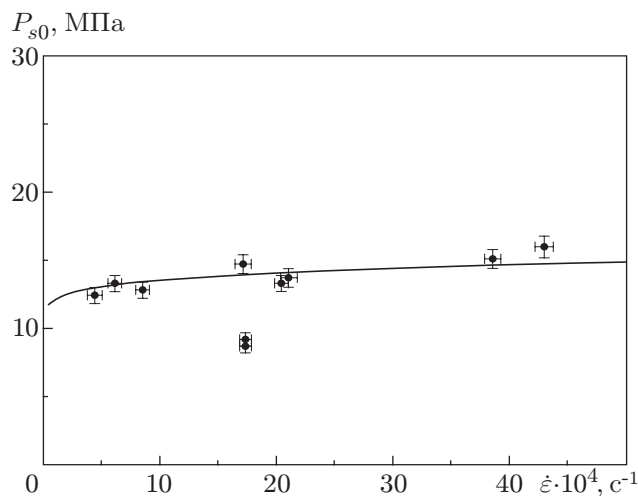


Рис. 5. Зависимость порога начала разрушения от скорости деформирования: точки — эксперимент; линия — расчет

пока скорость роста пор не превысит некоторой критической величины [18], что приводит к формированию откольного импульса. На рис. 2–4 момент выхода откольного импульса на свободную поверхность отмечен двумя стрелками. Наблюдается определенная закономерность изменения характера зависимости скорости свободной поверхности от времени при изменении амплитуды ударной волны. По мере ее увеличения возрастает отклонение профиля скорости от штриховой линии и одновременно происходит приближение откольного импульса к точке излома до их совпадения в опыте 6. Дальнейшее увеличение амплитуды (опыт 9) приводит к вырождению откольного импульса в горизонтальную линию с последующим практически монотонным уменьшением скорости. Поэтому указанные стрелками особенности на профиле 9 достаточно условны. Отметим также, что максимальные отрицательные давления, реализующиеся в спирте, могут заметно превышать порог начала разрушения P_{s0} , но для их определения необходимо предположить конкретный механизм роста пористости в образце.

Ранее в аналогичной постановке были проведены опыты по регистрации отрицательных давлений в воде [13], гексане и глицерине [9]. Полученные для этих жидкостей профили скорости свободной поверхности качественно подобны приведенным на рис. 2–4 для спирта, но в них начальная скорость разрушения была настолько высокой, что в пределах погрешности эксперимента формирование откольного импульса совпадало с началом разрушения. Поэтому нигде ранее двухстадийный характер разрушения, приводящий сначала к излому профиля скорости и лишь затем, спустя довольно значительное время, к формированию откольного импульса, не наблюдался. При этом фронт откольного импульса в спирте, особенно при низких давлениях, очень крутой (например, в опыте 5 его характерное время около 10 нс), а последующие колебания скорости, обусловленные циркуляцией волн между поверхностью образца и областью разрушения, не наблюдаются. Вероятно, это связано с отсутствием резких границ зоны кавитации, в результате чего понятие толщины откольной пластины становится достаточно условным. В этом отношении процессы развития кавитации в спирте и воде очень похожи [13].

Обсуждение результатов экспериментов. При отрицательных давлениях, возникающих в случае импульсного растяжения, жидкость попадает в область метастабильного состояния, время существования которого определяется как чистотой самой жидкости, так и условиями растяжения. В проведенных экспериментах спирт сначала сжимался в удар-

ной волне до максимального давления P_0 , указанного в таблице, а затем изэнтропически разгружался до состояний, соответствующих точкам, лежащим ниже кривой равновесия жидкость — пар. Разрушение метастабильного состояния происходит в результате роста пор, как стабильно существующих в жидкости, так и порождаемых тепловыми флуктуациями. В работе [13] показано, что существующие в жидкости поры не оказывают влияния на иницирование процесса кавитации и экспериментально обнаруженная слабая зависимость P_s от скорости деформирования для воды объясняется именно процессом гомогенного зародышеобразования.

Рассмотрим влияние гомогенного зародышеобразования на рост пористости при отколе в спирте. Согласно термодинамической теории флуктуаций [1, 20] число пор критического радиуса R_c , образующихся в единице объема в единицу времени J под действием отрицательного давления P , описывается кинетическим уравнением

$$J = N_0 \frac{\sigma}{\eta} \sqrt{\frac{\sigma}{kT}} \exp\left(-\frac{16\pi\sigma^3}{3P^2kT}\right), \quad (2)$$

где N_0 — число молекул в единице объема жидкости; σ — поверхностное натяжение; η — вязкость; T — температура, К; k — постоянная Больцмана. Из рис. 2–4 видно, что после начала разрушения абсолютное значение градиента скорости в разгрузочной части импульса уменьшается в несколько раз. Исследование влияния кинетики роста пор на динамику волновых взаимодействий при отколе показывает [21], что это возможно в том случае, когда скорость роста пористости, пропорциональная $R_c^3 J$ [13], превышает некоторое критическое значение, зависящее от скорости деформирования в разгрузочной части падающего импульса: $R_c^3 J = \gamma \dot{\epsilon}$, где $\gamma \sim 1$.

Предполагая, что не вязкий рост пор, а именно процесс зародышеобразования, описываемый соотношением (2), является определяющим для увеличения пористости, можно определить характер зависимости порога начала разрушения от скорости деформирования [21]:

$$P_{s0} \approx A/\sqrt{\ln(B/\dot{\epsilon})}. \quad (3)$$

Здесь A и B — константы, зависящие от температуры как явно, так и через вязкость и коэффициент поверхностного натяжения. На рис. 5 зависимость (3), построенная при $A = 41$ МПа и $B = 10^{11}$ с⁻¹, показана сплошной линией, которая, как видно, хорошо описывает экспериментальные данные. Исключение представляет опыт 9, в котором наблюдается заметное отклонение от зависимости (3). Отметим, что снижение прочности с ростом амплитуды ударной волны ранее наблюдалось для воды в работе [13], где было отмечено, что в рамках гомогенного зародышеобразования это не удается объяснить ростом остаточной температуры. Вероятно, с увеличением давления заметную роль начинает играть локальный разогрев при схлопывании существующих в жидкости пор, что приводит к образованию “горячих точек”. Поэтому в момент возникновения растягивающих напряжений в жидкости могут существовать области с температурой выше остаточной, где и будет с наибольшей скоростью происходить гомогенное зародышеобразование. Возможно, при высоких давлениях подобный очаговый механизм разрушения имеет место и в спирте.

Попытаемся теперь оценить максимальные отрицательные давления, которые реализуются в спирте. Проще всего это сделать, предположив, что начальная скорость разрушения равна нулю. Тогда, как показано в [21], максимальные отрицательные давления P_{sm} возникают за фронтом волны разрежения, отраженной от свободной поверхности (течение рассматривается в акустическом приближении, поэтому фронт волны разрежения не размывается), и имеют ту же величину, что и в неразрушающемся образце. Рассчитывается P_{sm} по формуле (1), но вместо W_{s0} берется значение скорости свободной поверхности W_{sm} , которое достигалось бы перед откольным импульсом, если бы не было излома

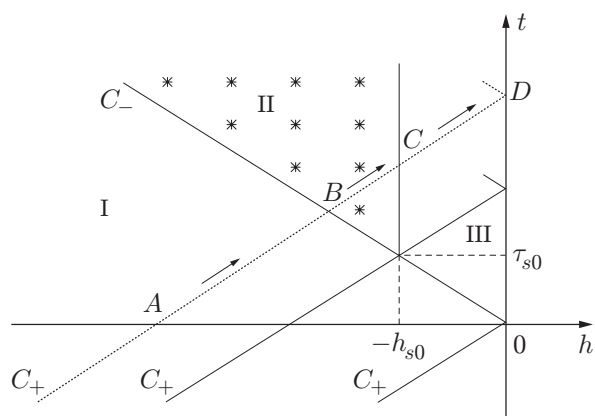


Рис. 6

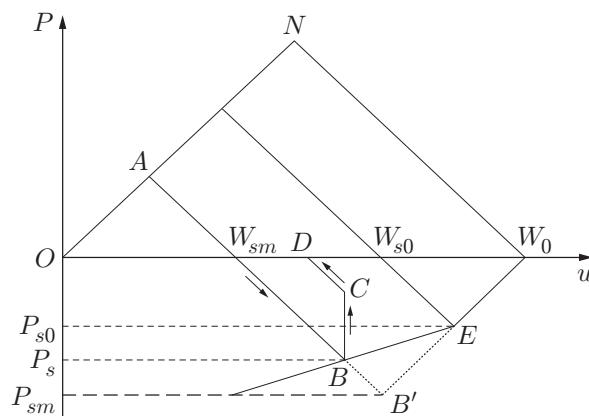


Рис. 7

Рис. 6. Изменение состояния этилового спирта в плоскости время — лагранжева координата

Рис. 7. Изменение состояния этилового спирта в плоскости давление — массовая скорость

на профиле скорости свободной поверхности. На рис. 2–4 эти точки лежат на штриховых прямых, являющихся продолжением профиля скорости в отсутствие разрушения, непосредственно под реальными минимумами скорости, отмеченными двумя стрелками. Соответствующие изменения состояния в переменных t , h (h — лагранжева координата) и P , u (u — массовая скорость) показаны на рис. 6, 7. На рис. 6 в области I течение определяется исходным импульсом сжатия. В области III имеет место взаимодействие падающей (C_+ -характеристики) и отраженной от свободной поверхности (C_- -характеристика) волн разрежения, но здесь еще не достигнут порог начала разрушения, которое начинается в точке $(\tau_{s0}, -h_{s0})$ и происходит в области II. Пусть минимум скорости свободной поверхности реализуется при выходе C_+ -характеристики $ABCD$ на свободную поверхность. На плоскости $P-u$ (рис. 7) состояния в падающей волне лежат на прямой ON . Если начальная скорость разрушения равна нулю, то после встречи с головной C_- -характеристикой отраженной волны разрежения состояние скачкообразно переходит из точки A в точку B' , которая и определяет максимальные растягивающие напряжения P_{sm} вдоль данной C_+ -характеристики. Дальнейшее изменение состояния от точки B' до точки C зависит от конкретной кинетики разрушения и на рисунке не обозначено. Полученные таким образом значения P_{sm} приведены в таблице, и, как видно, они в несколько раз превышают P_{s0} , изменяясь в интервале 40–60 МПа. Исключение составляют опыт 6, в котором точка излома совпадает с откольным импульсом ($P_{sm} = P_{s0}$), и опыт 9, в котором откольный импульс практически не наблюдается и максимальные растягивающие напряжения не определены из-за большого произвола в оценке P_{sm} . Отметим, что полученное значение прочности спирта (50 ± 10) ГПа совпадает с результатом работы [12], где максимальные растягивающие напряжения оценивались по толщине откольной пластины.

Более реальную оценку отрицательных давлений можно получить, считая, что скорость разрушения постоянна, подтверждением чего является практически линейная зависимость скорости свободной поверхности от времени за точкой излома [18]. В этом случае градиент скорости свободной поверхности после начала разрушения определяется следу-

ющим соотношением [18]:

$$\frac{dW}{dt} = \frac{W_0}{8\tau_0} \left(\frac{\dot{V}_p}{\dot{V}} - 4 \right),$$

где τ_0 — длительность импульса сжатия, который считается треугольным; \dot{V}_p — скорость разрушения (скорость роста удельного объема пор); \dot{V} — скорость расширения вещества в разгрузочной части падающего импульса. Для определенности и простоты будем считать, что после начала разрушения градиент скорости по абсолютной величине уменьшается в два раза, т. е. $\dot{V}_p = 2\dot{V}$. В этом случае траектория изменения состояния вдоль C_- -характеристики в плоскости $P-u$ при вхождении в область разрушения претерпевает излом в точке $(\tau_{s0}, -h_{s0})$ и производная dP/du уменьшается в три раза (траектория W_0EB на рис. 7) [18].

Изменение состояния вдоль C_+ -характеристики в плоскости $P-u$ показано на рис. 7 стрелками. После встречи с головной характеристикой волны разрежения состояние скачкообразно переходит из точки A в точку B и в области разрушения изменяется вдоль вертикальной траектории BC (скорость вещества остается неизменной, а давление растет). В неразрушенной части образца, на участке CD , наклон характеристики равен $-\rho_0 c_0$. В точке D скорость свободной поверхности достигает минимума, а максимальное растягивающее напряжение P_s реализуется в точке B и равно

$$P_s = (P_{s0} + P_{sm})/2.$$

Полученное соотношение является прямым следствием предположения об уменьшении градиента скорости в два раза после начала разрушения образца и дает для оценки P_s тот же результат, что и расчет по формуле (1), если вместо W_{s0} берется значение скорости свободной поверхности W_s , которое достигается перед откольным импульсом. Причем этот вывод остается справедливым при любом значении постоянной скорости разрушения, что позволяет рассчитать величину растягивающих напряжений P_s непосредственно по формуле (1). Полученные значения приведены в таблице.

Если исключить опыты 6 и 8, то $P_s = (30 \pm 3)$ МПа. Резкое уменьшение максимальных растягивающих напряжений в опытах 6, 8 нельзя объяснить только увеличением амплитуды ударной волны, поскольку, например, в опытах 3 и 9 давление ударного сжатия примерно такое же, тогда как P_s значительно выше. В то же время, в опытах 6, 8 не только высокая амплитуда ударной волны, но и максимальная скорость деформирования, превышающая $2 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$. То есть уменьшение P_s обусловлено ростом как давления, так и скорости деформирования. В опыте 9 скорость деформирования $\dot{\epsilon}$ также находится вблизи критического значения, но, как уже отмечалось, в этом случае откольный импульс отчетливо не выражен и P_s определяется с большой погрешностью. Более того, характер изменения скорости свободной поверхности в этом опыте такой же, как при вязком разрушении [19], когда увеличение пористости обусловлено ростом пор, а не их возникновением в результате гомогенного зародышеобразования. В работе [19] показано, что если вязкость превышает некоторое пороговое значение (зависящее, в частности, от скорости деформирования), то откольный импульс исчезает и скорость свободной поверхности монотонно уменьшается, как это и наблюдается в опыте 9. Поэтому в отличие от порога начала разрушения P_{s0} , зависимость которого от скорости деформирования задается механизмом гомогенного зародышеобразования, интерпретация характера изменения максимальных растягивающих напряжений P_s с увеличением амплитуды ударной волны и скорости деформирования оказывается не столь однозначной. Основной причиной этого, вероятно, является возможность смены кинетики образования пористости, т. е. на второй стадии разрушения необходимо учитывать не только образование пор, но и их рост.

Таким образом, процесс разрушения спирта, в отличие от исследованных ранее жидкостей, является двухстадийным. На первой стадии при отрицательных давлениях около 14 МПа начинается образование пор, которое происходит с относительно медленной скоростью и проявляется в виде излома на профиле скорости свободной поверхности. На второй стадии скорость роста пористости возрастает, что приводит к формированию откольного импульса. Модель гомогенного зародышеобразования объясняет экспериментально обнаруженную слабую зависимость порога начала разрушения спирта от скорости деформирования.

ЛИТЕРАТУРА

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. **Канель Г. И., Разоренов С. В., Уткин А. В., Фортгов В. Е.** Ударно-волновые явления в конденсированных средах. М.: Янус-К, 1996.
6. **Erlich D. C., Wooten D. C., Crewdson R. C.** Dynamic tensile failure of glycerol // J. Appl. Phys. 1971. V. 42, N 13. P. 5495–5502.
7. **Carlson G. A., Henry K. W.** Technique for studying dynamic tensile in liquids: Application to glycerol // J. Appl. Phys. 1973. V. 44, N 5. P. 2201–2206.
8. **Carlson G. A., Levine H. S.** Dynamic tensile strength of glycerol // J. Appl. Phys. 1975. V. 46, N 4. P. 1594–1601.
9. **Уткин А. В., Сосиков В. А., Богач А. А.** Импульсное растяжение гексана и глицерина при ударно-волновом воздействии // ПМТФ. 2003. Т. 44, № 2. С. 27–33.
10. **Marston P. L., Pullen G. L.** Cavitation in water induced by the reflection of shock waves // Proc. of the conf. on the Amer. Phys. Soc. on shock waves in condensed matter, Merlo Park, California, USA, 23–25 June, 1981. N. Y.: AIP, 1982. P. 515–519.
11. **Marston P. L., Urgen B. T.** Rapid cavitation induced by the reflection of shock waves // Proc. of the conf. on the Amer. Phys. Soc. on shock waves in condensed matter, Spokane, Washington, USA, 22–25 July, 1985. N. Y.: Plenum Press, 1986. P. 401–405.
12. **Дремин А. Н., Канель Г. И., Колдунов С. А.** Исследование откола в воде, этиловом спирте и плексигласе // Горение и взрыв: Материалы III Всесоюз. симп. по горению и взрыву, Ленинград, 5–10 июля 1972 г. М.: Наука, 1972. С. 569–574.
13. **Богач А. А., Уткин А. В.** Прочность воды при импульсном растяжении // ПМТФ. 2000. Т. 41, № 4. С. 198–205.
14. **Carlson G. A.** Dynamic tensile strength of mercury // J. Appl. Phys. 1975. V. 46, N 9. P. 4069–4070.
15. **Asay J. R., Barker L. M.** Interferometric measurement of shock-induced internal particle velocity and spatial variations of particle velocity // J. Appl. Phys. 1974. V. 45, N 6. P. 2540–2546.
16. **Афанасенков А. Н., Богомолов В. М., Воскобойников И. М.** Обобщенная ударная адиабата конденсированных веществ // ПМТФ. 1969. № 4. С. 137–141.
17. **Трунин Р. Ф., Гударенко Л. Ф., Жерноклетов М. В., Симаков Г. В.** Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 2001.

18. **Уткин А. В.** Влияние начальной скорости разрушения на формирование откольного импульса // ПМТФ. 1993. Т. 34, № 4. С. 140–146.
19. **Уткин А. В.** Влияние скорости разрушения на динамику взаимодействия импульса ударной нагрузки с поверхностью тела // ПМТФ. 1992. Т. 33, № 6. С. 82–89.
20. **Каган Ю.** О кинетике вскипания чистой жидкости // Журн. физ. химии. 1960. Т. 34, № 1. С. 92–101.
21. **Уткин А. В.** Определение констант кинетики откольного разрушения материалов на основе экспериментальных данных // ПМТФ. 1997. Т. 38, № 6. С. 151–160.

Поступила в редакцию 30/IX 2004 г.
