

СВЕЧЕНИЕ ПУЗЫРЬКОВЫХ СРЕД В УДАРНЫХ ВОЛНАХ

А. И. Сычев

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск

Экспериментально исследованы ударные волны в пузырьковых средах. Получены данные о скорости распространения и давлении ударных волн. Изучен процесс отражения ударных волн от твердой преграды. Проведено сопоставление экспериментальных данных и результатов расчета параметров падающих и отраженных волн. Обнаружено явление свечения пузырьковых сред в ударных волнах.

Ключевые слова: пузырьковые среды, ударные волны, скорость, давление, отражение, пузырьки газа, сжатие, разогрев, свечение.

Ударная волна, распространяющаяся в жидкости с пузырьками газа, вызывает сжатие пузырьковой среды. При этом сжимается в основном только газовая фаза — пузырьки газа. Сжатие пузырьков, в свою очередь, приводит к повышению температуры газа, содержащегося в пузырьках. Можно ожидать, что в ударных волнах достаточной интенсивности разогрев газа в пузырьках будет сопровождаться таким явлением, как световая эмиссия.

Цель настоящей работы — определить условия свечения химически инертных пузырьковых сред в ударных волнах.

В действительности, как известно, сжатие пузырьков газа в ударных волнах протекает при развитии сопутствующих процессов, приводящих к потере пузырьками сферической симметрии и вызывающих искажение поверхности пузырьков. Следствием данных процессов является дополнительная потеря тепла пузырьками газа. Другими словами, существуют физические механизмы, ограничивающие рост температуры газа в пузырьках при сжатии в ударных волнах. С учетом отмеченного обстоятельства возможность свечения пузырьковых сред в ударных волнах не очевидна.

Исследованию разнообразных волновых процессов, существующих в пузырьковых средах (в том числе, и ударных волн), посвящено значительное количество оригинальных работ, результаты которых обобщены в монографиях [1–3]. Факты регистрации свечения кавитационных пузырьков в различных жидкостях описаны в [4]. Свечения пузырьковых сред в удар-

ных волнах не наблюдалось.

Экспериментальные исследования ударных волн в химически неактивных пузырьковых средах проводили в вертикальной гидродинамической ударной трубе из нержавеющей стали с внутренним диаметром 40 мм, состоящей из секций высокого и низкого давления с разрывной диафрагмой между ними. Секцию низкого давления заполняли жидкостью, в которой пузырьки диаметром $(2,5 \pm 0,1)$ мм создавались при прохождении газа через систему капиллярных отверстий. Объемная концентрация газовой фазы варьировалась в диапазоне $1/4 \leq \beta_0 \leq 4$ %. Высота столба пузырьковой среды составляла 3,6 м. Давление на поверхности жидкости с пузырьками газа было равно атмосферному.

Ударные волны в пузырьковой среде генерировали сжиганием ацетиленокислородной стехиометрической смеси ($C_2H_2 + 2,5 O_2$) в секции высокого давления. Амплитуду (давление) ударных волн варьировали изменением начального давления газовой смеси $C_2H_2 + 2,5 O_2$. При этом давление в ударных волнах соответствует давлению, которое развивается над поверхностью пузырьковой среды при сгорании газа в замкнутом объеме секции высокого давления.

Параметры ударных волн регистрировали установленными по длине ударной трубы пьезоэлектрическими датчиками давления, сигналы с которых подавались на осциллографы С9-16. Датчики давления тарировали ударными и детонационными волнами в газах. Диаметрально противоположно одному из датчиков давления располагали оптический ввод фотоэлектронного умножителя ФЭУ-102. Исполь-

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 01-03-32351 и 00-02-17992).

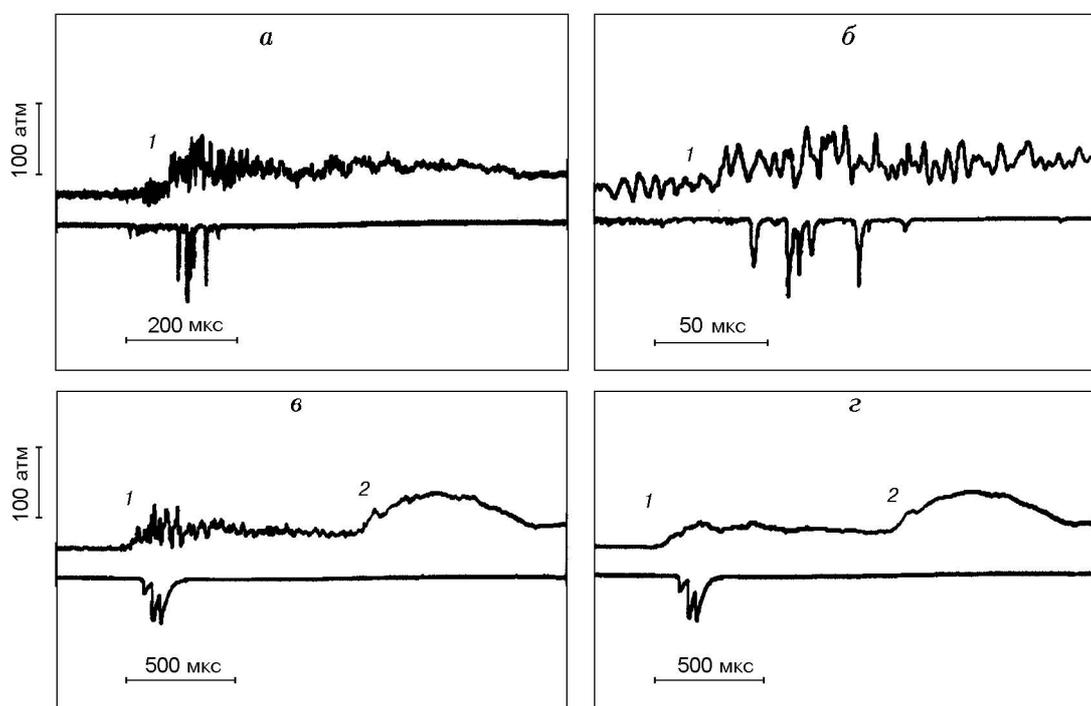


Рис. 1. Осциллограммы давления падающей (1) и отраженной (2) ударных волн (верхний луч) и свечения пузырьковой среды (нижний луч):

$\alpha = 0,7$, газ — Ag; $\beta_0 = 0,5$ (а, б) и 1 % (в, г); а-в — до осреднения, г — после осреднения пульсаций давления

зовались фотоэлектронные умножители с временным разрешением 0,5 и 15 мкс. Временное разрешение определяли по критерию Рэля, согласно которому два сигнала считаются разрешимыми, если максимум одного сигнала совпадает с минимумом другого сигнала.

Изучены химически неактивные пузырьковые системы жидкость — газ, где в качестве жидкости используются водоглицериновые растворы с объемной концентрацией глицерина $\alpha = 0,25, 0,5, 0,7$, а газ — пузырьки Ag, He, N₂ и O₂. Опыты проводили при температуре в помещении $T = 288$ К.

Некоторые физические величины, характеризующие свойства жидкого компонента пузырьковых сред, приведены в табл. 1, где $\rho_{ж}$ — плотность, $c_{ж}$ — скорость звука, μ — динамическая вязкость, σ — коэффициент поверхностного натяжения, λ_0 — коэффициент теплопроводности и c_p — удельная изобарическая теплоемкость. Физические величины, характеризующие свойства газового компонента пузырьковых сред, приведены в табл. 2, где $\rho_{г}$ — плотность, $c_{г}$ — скорость звука, γ — показатель адиабаты, μ_0 — молярная масса, λ_0 и c_p — те же, что и в табл. 1.

Скорость звука в исследованных жидкостях определяли по скорости слабых ударных волн (измерения проведены при $T = 288$ К). Остальные величины — данные [5–8], полученные при температуре $T = 273 \div 293$ К и давлении $p_0 = 1$ атм.

Установлено, что распространение ударных волн в пузырьковых средах сопровождается свечением среды (рис. 1). Свечение зафиксировано в водоглицериновых растворах с $\alpha = 0,5$ и $0,7$, содержащих пузырьки Ag, He, N₂ и O₂. В пузырьковой системе «жидкость ($\alpha = 0,25$) — Ag» свечение не наблюдалось в ударных волнах с амплитудой до 45 атм.

Ударные волны в пузырьковых средах имеют пульсационную структуру (см. рис. 1, а): на фронте и за фронтом ударной волны регистрируются интенсивные пульсации давления; через 150 ÷ 250 мкс пульсации заканчиваются и давление выходит на почти постоянный уровень. Отметим, что пульсации давления меньшей амплитуды наблюдаются и перед фронтом ударной волны (так называемый «предвестник», амплитуда которого уменьшается по мере удаления от фронта ударной волны).

Таблица 1

α	$\rho_{ж}, \text{кг/м}^3$	$c_{ж}, \text{м/с}$	$\mu, 10^{-3} \text{Па}\cdot\text{с}$	$\sigma, 10^{-3} \text{Дж/м}^2$	$\lambda_0, 10^{-2} \text{Дж/(м}\cdot\text{с}\cdot\text{К)}$	$c_p, 10^3 \text{Дж/(кг}\cdot\text{К)}$
0,25	1065	1470	2,27	70,69	49,67	3,8
0,5	1130	1580	6,84	68,69	42,63	3,3
0,7	1182	1660	27,10	67,09	37,00	2,9

Таблица 2

Газ	$\rho_{г}, \text{кг/м}^3$	$c_{г}, \text{м/с}$	γ	$\mu_0, 10^{-3} \text{кг/моль}$	$\lambda_0, 10^{-2} \text{Дж/(м}\cdot\text{с}\cdot\text{К)}$	$c_p, 10^3 \text{Дж/(кг}\cdot\text{К)}$
Ar	1,78	319	1,67	39,95	1,63	0,52
He	0,18	965	1,67	4,00	14,31	5,20
N ₂	1,25	334	1,40	28,01	2,62	1,04
O ₂	1,43	314	1,40	32,00	2,65	0,92

Свечение, сопровождающее распространение ударной волны в пузырьковой среде, наблюдается во фронте волны и так же, как и давление, носит пульсационный характер (см. рис. 1, а).

Пульсации давления ударной волны и световое излучение пузырьковой среды — две стороны одного процесса, а именно осцилляций пузырьков газа (в ударных волнах, распространяющихся в жидкостях без пузырьков газа, пульсации давления и свечение отсутствуют); стохастический характер пульсаций давления ударной волны и свечения пузырьков газа является следствием случайного распределения пузырьков в жидкости.

Ударные волны в пузырьковых средах — своеобразное явление, особенности которого обусловлены дискретной структурой пузырьковых сред. Распространение ударной волны в пузырьковой среде происходит в результате взаимодействия жидкого и газового компонентов системы. Повышение давления в жидкости вызывает сжатие пузырьков газа, которое сопровождается ростом давления газа в пузырьках. Сжатие продолжается до тех пор, пока давление газа в пузырьках не уравновесит инерцию радиально сходящейся жидкости; вслед за этим следует расширение пузырьков; при этом (на стадии расширения) пузырьки газа излучают в окружающую жидкость волны короткой длительности, регистрируемая амплитуда которых в несколько раз превосходит давление в ударной волне. Так как при сжатии пузырьков газа в ударной волне температура газа возрастает, то на некоторой стадии сжатия газ начинает светиться. Излучение света

прекращается на стадии расширения пузырьков вследствие охлаждения газа.

Более подробно осциллограммы рис. 1, а представлены на рис. 1, б. Анализ сигналов датчика давления и фотоэлектронного умножителя показывает, что длительность пульсаций давления составляет $5 \div 7$ мкс, а время свечения пузырьков газа равно $3 \div 5$ мкс (временное разрешение фотоэлектронного умножителя 0,5 мкс). Отметим следующий факт: хотя пузырьки газа в ударной волне совершают несколько осцилляций, тем не менее свечение газа в пузырьках наблюдается лишь при первом сжатии пузырьков в ударной волне.

Общая картина ударной волны, распространение которой в пузырьковой среде сопровождается свечением пузырьков газа, дана на рис. 1, в. Временное разрешение фотоэлектронного умножителя 15 мкс. Приведенный сигнал представляет собой интегральную светимость совокупности пузырьков газа. Длительность свечения пузырьковой среды в ударных волнах $50 \div 100$ мкс (в поле зрения фотоэлектронного умножителя попадают пузырьки газа, находящиеся внутри телесного угла, равно $5 \cdot 10^{-2}$ ср).

На рис. 1, в можно наблюдать также процесс отражения ударной волны от твердой преграды — торца ударной трубы (расстояние от датчика давления до отражающей поверхности $x_T = 0,54$ м). Обращает на себя внимание рост давления за фронтом отраженной волны, связанный с процессами сжатия пузырьковой среды. Давление в отраженной волне выходит на максимум, затем следует плавная волна раз-

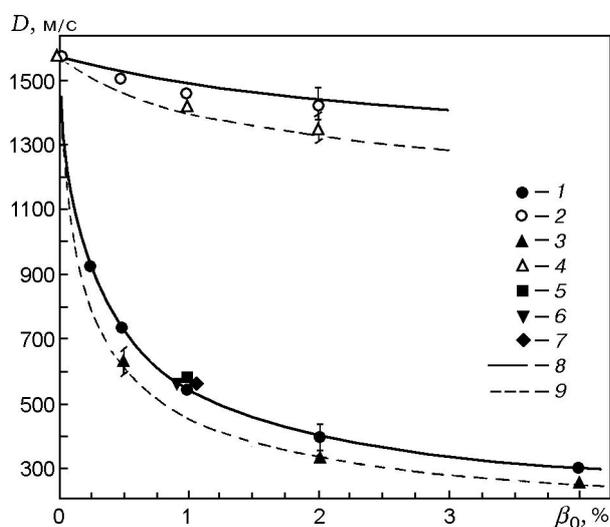


Рис. 2. Зависимости $D(\beta_0)$:
 $\alpha = 0,5$, газ — Ag (1-4, 8, 9), He (5), N_2 (6) и O_2 (7); $p_1 = 24$ (3, 4, 9) и 36 (1, 2, 8) атм; $D \equiv D_1$ (1, 3, 5-7) — падающая и $D \equiv D_2$ (2, 4) — отраженная ударные волны; 8, 9 — расчет

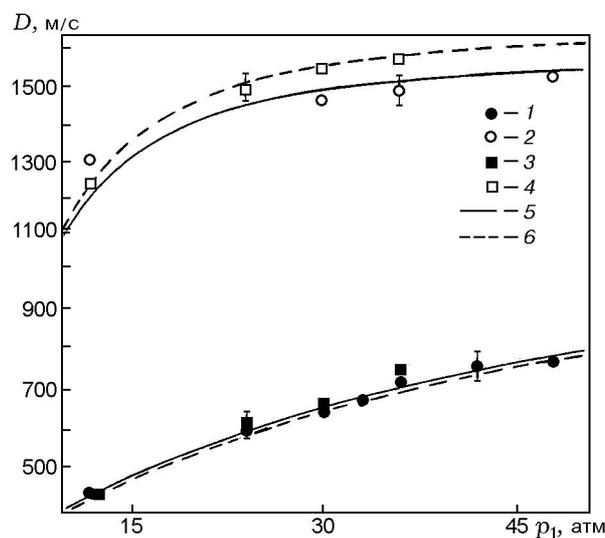


Рис. 3. Зависимости $D(p_1)$:
 $\alpha = 0,5$ (1, 2, 5) и 0,7 (3, 4, 6), газ — Ag; $\beta_0 = 0,5\%$; $D \equiv D_1$ (1, 3) — падающая и $D \equiv D_2$ (2, 4) — отраженная ударные волны; 5, 6 — расчет

грузки. Свечения пузырьковых сред в отраженных ударных волнах не наблюдается.

Сжатие пузырьков газа протекает в неоднородном поле давления ударной волны, имеющей пульсационную структуру. Осреднение пульсаций давления позволяет получить эффективный профиль давления ударной волны (см. рис. 1,2). Сигналы датчиков давления осреднялись с использованием штатной процедуры осциллографа С9-16 по 10 точкам при временном интервале между точками (времени дискретизации) 5 мкс.

Интенсивность свечения пузырьков газа зависит как от параметров ударной волны, так и от свойств пузырьковых сред. Характеристики ударных волн, в свою очередь, также зависят от параметров пузырьковых сред. На рис. 2 и 3 представлены данные измерений скорости ударных волн в различных пузырьковых средах. Измерения проводили с помощью датчиков давления на двух участках ударной трубы с базами 0,595 и 0,795 м. Скорость ударных волн D_1 уменьшается с повышением концентрации газовой фазы β_0 пузырьковой среды и возрастает при увеличении амплитуды падающей ударной волны p_1 .

Повышение концентрации газовой фазы (газосодержания) системы существенным образом сказывается на скорости ударной волны (см. рис. 2). Так, при $\beta_0 = 4\%$ скорость

ударных волн составляет примерно 1/5 скорости звука в жидкости. Для ударных волн меньшей амплитуды влияние газосодержания проявляется в большей степени. При этом влияние свойств самих газов незначительно: скорости ударных волн в системах с пузырьками одно- и двухатомных газов, физические свойства которых сильно различаются (см. табл. 2), имеют близкие значения. Данный факт указывает, в частности, на изотермический характер сжатия пузырьковой среды в ударной волне.

На рис. 2 представлены также данные измерения скоростей отраженных ударных волн D_2 . Характер зависимостей $D_2(\beta_0)$ качественно такой же, как и в случае падающих ударных волн: с повышением начальной концентрации газовой фазы системы скорость отраженных ударных волн уменьшается. С увеличением амплитуды падающей ударной волны ее скорость растет, при этом повышается и скорость отраженной ударной волны (см. рис. 3).

Влияние свойств жидкого компонента системы на скорость ударных волн проявляется лишь для отраженных ударных волн, т. е. для волн, скорость которых близка к скорости звука в жидкости. Влияние других свойств жидкостей (помимо скорости звука) на скорость ударных волн незначительно.

На рис. 2 и 3 представлены также расчетные зависимости скорости падающих (D_1) и отраженных (D_2) ударных волн от начальной

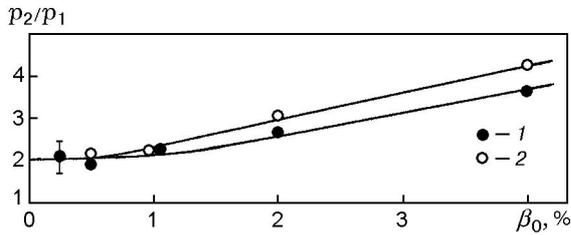


Рис. 4. Зависимости $(p_2/p_1)(\beta_0)$:
 $\alpha = 0,5$, газ — Ar; $\beta_0 = 0,5\%$; $p_1 = 24$ (1) и
 36 (2) атм

концентрации газовой фазы системы β_0 и от амплитуды падающей ударной волны p_1 в различных пузырьковых средах.

Расчет скорости падающих ударных волн проведен по формуле

$$D_1 = \left[\frac{(1 - \beta_0)^2}{c_{\text{ж}}^2} + \frac{\beta_0(1 - \beta_0)\rho_{\text{ж}}}{p_1} \right]^{-\frac{1}{2}},$$

полученной в [9] для стационарных ударных волн. Скорость отраженных ударных волн рассчитана по формуле

$$D_2 = \left[\frac{(1 - \beta_1)^2}{c_{\text{ж}}^2} + \frac{\beta_1(1 - \beta_1)\rho_{\text{ж}}}{p_2} \right]^{-\frac{1}{2}},$$

где концентрация газовой фазы за падающей ударной волной вычислялась по формуле

$$\beta_1 = \left[1 + \frac{p_1(1 - \beta_0)}{p_0\beta_0} \right]^{-1},$$

следующей из уравнения состояния пузырьковой среды [9]

$$\frac{\beta p}{1 - \beta} = \text{const}$$

(здесь β и p — концентрация газовой фазы и давление пузырьковой среды), а давление отраженной ударной волны p_2 определялось на основе экспериментально полученных зависимостей отношения давлений отраженной и падающей ударных волн p_2/p_1 от начальной концентрации газовой фазы пузырьковой среды β_0 , представленных на рис. 4; расчет выполнен при начальном давлении пузырьковой среды $p_0 = 1,3$ атм (с учетом гидростатического давления на расстоянии ≈ 3 м от поверхности столба пузырьковой среды).

Отметим, что отличие коэффициента повышения давления ударных волн p_2/p_1 при

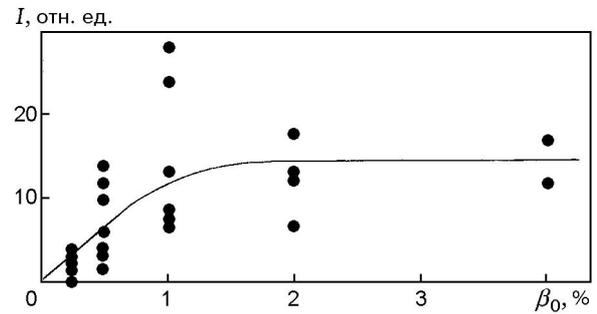


Рис. 5. Зависимость $I(\beta_0)$:
 $\alpha = 0,5$, газ — Ar; $p_1 = 36$ атм

отражении от значения, равного двум (в случае акустических волн в пузырьковых средах и ударных волн в жидкостях), возрастает с увеличением концентрации газовой фазы пузырьковой среды. Экспериментальные данные и результаты расчета (см. рис. 2 и 3) удовлетворительно согласуются.

Итак, распространение ударных волн в пузырьковых средах сопровождается свечением пузырьковой среды, точнее, свечением газа в пузырьках. Осреднение светового излучения совокупности пузырьков газа позволяет получить интегральную характеристику светимости пузырьковой среды в ударных волнах. На рис. 5 представлена зависимость интенсивности свечения пузырьковой среды I от концентрации газовой фазы системы β_0 . Значения I , полученные при регистрации свечения фотоэлектронным умножителем с временным разрешением 15 мкс, приведены в относительных единицах измерения; тем не менее, поскольку регистрация свечения пузырьковых сред проведена в одной постановке эксперимента, возможно сопоставление светимостей различных систем.

Следует отметить, что в условиях, когда поле зрения фотоэлектронного умножителя ограничено (объем пузырьковой среды, находящийся в поле зрения фотоэлектронного умножителя, составляет $\approx 5 \text{ см}^3$, т. е. в поле зрения фотоэлектронного умножителя попадает всего несколько пузырьков газа ($3 \div 6$ при $\beta_0 = 0,5 \div 1\%$)), величина регистрируемого сигнала существенно зависит от положения пузырьков газа относительно оптического ввода фотоэлектронного умножителя. Хаотичное распределение пузырьков газа в жидкости и то обстоятельство, что сжатие пузырьков газа происходит в неоднородном поле давления

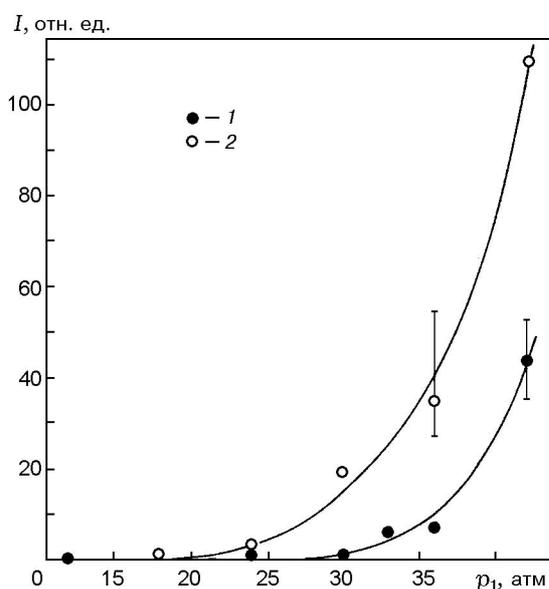


Рис. 6. Зависимости $I(p_1)$:
 $\alpha = 0,5$ (1) и $0,7$ (2), газ — Ar; $\beta_0 = 0,5 \%$

ударной волны, обуславливают значительный разброс сигнала фотоэлектронного умножителя. При этом среднеарифметические значения сигналов позволяют судить о светимости пузырьковой среды в целом, в то время как максимальные значения сигналов в большей степени характеризуют светимость газа в отдельных пузырьках.

Вид зависимости $I(\beta_0)$ обусловлен действием следующих факторов: при повышении газосодержания системы, с одной стороны, увеличивается количество пузырьков газа, попадающих в поле зрения фотоэлектронного умножителя, и, как следствие, величина регистрируемого сигнала возрастает; с другой стороны, в силу конечности энергии ударной волны степень сжатия пузырьков газа и, следовательно, интенсивность свечения отдельных пузырьков при этом уменьшаются. В результате с увеличением β_0 значение I сначала возрастает, а затем выходит на почти постоянный уровень.

Интенсивность свечения пузырьков газа существенно зависит от давления ударной волны (рис. 6). Зависимость $I(p_1)$ имеет, по сути дела, «пороговый» характер. «Пороговая» амплитуда ударной волны p_1 , при которой интенсивность свечения достигает значения, доступного для регистрации (на уровне $I \approx 1$), равна примерно 20 и 30 атм в системах с $\alpha = 0,7$ и $0,5$ соответственно. (Следует отметить, что пузырьки газа начинают светиться уже в удар-

Таблица 3

Газ	I, отн. ед.	
	$\alpha = 0,5$	$\alpha = 0,7$
Ar	15 (28)	65 (139)
He	30 (49)	125 (148)
N ₂	1 (2)	4 (8)
O ₂	1 (2)	20 (29)

Примечание. В скобках указаны максимальные значения I , зарегистрированные в опытах.

ных волнах сравнительно небольшой амплитуды.) Рис. 6 иллюстрирует также влияние свойств жидкого компонента пузырьковой среды: с увеличением вязкости жидкости интенсивность свечения пузырьковых сред возрастает.

Интенсивность свечения пузырьков газа зависит от свойств как жидкого, так и газового компонента системы: средние значения интенсивности свечения пузырьковых сред в ударной волне с амплитудой $p_1 = 36$ атм (результаты измерений $3 \div 10$ опытов) представлены в табл. 3. Отметим, что интенсивность свечения пузырьков, содержащих одноатомные газы, больше, чем светимость пузырьков двухатомных газов. Данный факт указывает на то, что сжатие газа в пузырьках протекает в условиях, близких к адиабатическим: свечение газа тем сильнее, чем выше его температура; последняя, в свою очередь, пропорциональна показателю адиабаты, который больше для одноатомных газов. В свою очередь, зависимость интенсивности свечения пузырьков от показателя адиабаты газа свидетельствует о тепловом характере светового излучения пузырьков газа в ударных волнах.

Таким образом, интенсивность свечения пузырьков газа в ударной волне зависит как от параметров волны, так и от физических свойств газового и жидкого компонентов пузырьковой среды.

Ударные волны в пузырьковых средах имеют пульсационную структуру (см. рис. 1). Сжатие пузырьков газа протекает, таким образом, в неоднородном поле давления. С целью упрощения анализа поведения пузырьков газа в ударной волне рассмотрим сжатие отдельного пузырька газа в однородном поле давления внешнего возмущения. При этом применим

подход, предложенный Рэлеем: составим уравнение энергетического баланса.

Полагаем, что сжатие пузырька газа протекает в адиабатических условиях. Тогда работа, совершаемая внешним давлением Δp и равная

$$\int_R^{R_0} \Delta p 4\pi R^2 dR = \frac{4}{3}\pi(R_0^3 - R^3) \Delta p$$

(R_0 и R — начальный и текущий радиусы пузырька газа), распределяется между кинетической энергией жидкости

$$\frac{\rho_{\text{ж}}}{2} \int_R^{\infty} u^2 4\pi r^2 dr = 2\pi \rho_{\text{ж}} U^2 R^3$$

(здесь использовано соотношение $UR^2 = ur^2$, следующее из уравнения неразрывности; U и u — скорости жидкости на поверхности пузырька газа радиуса R и на расстоянии r от пузырька соответственно) и внутренней энергией газа в пузырьке

$$\frac{4}{3}\pi R_0^3 \frac{p_0}{\gamma - 1} \left[\left(\frac{R_0}{R} \right)^{3(\gamma-1)} - 1 \right].$$

Для скорости поверхности пузырька газа получаем выражение

$$U^2 = \frac{2}{3} \frac{p_0}{\rho_{\text{ж}}} \left\{ \frac{\Delta p}{p_0} \left[\left(\frac{R_0}{R} \right)^3 - 1 \right] - \frac{1}{\gamma - 1} \left(\frac{R_0}{R} \right)^3 \left[\left(\frac{R_0}{R} \right)^{3(\gamma-1)} - 1 \right] \right\}.$$

Сжатие пузырька продолжается до полного перехода кинетической энергии жидкости во внутреннюю энергию газа (явление кумуляции). Из условия $U = 0$ получаем выражение для предельной степени сжатия пузырька газа:

$$\frac{R_0}{R_{\text{к}}} = \left[1 + (\gamma - 1) \frac{\Delta p}{p_0} \right]^{\frac{1}{3(\gamma-1)}} \quad \text{при} \quad \left(\frac{R_0}{R} \right)^3 \gg 1$$

($R_{\text{к}}$ — минимальный радиус пузырька при сжатии). Далее, используя полученное выражение, находим предельные параметры газа в пузырьке:

$$p_{\text{к}} = p_0 \left[1 + (\gamma - 1) \frac{\Delta p}{p_0} \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}},$$

$$T_{\text{к}} = T_0 \left[1 + (\gamma - 1) \frac{\Delta p}{p_0} \right]$$

(здесь p_0 и T_0 — начальные давление и температура газа в пузырьках).

Полагая Δp равным перепаду давления в ударной волне ($\Delta p = p_1 - p_0$) при $\gamma = 1,67$ (одноатомный газ), $T_0 = 288$ К, $p_0 = 1,3$ атм и $p_1 = 20$ атм («пороговое» значение амплитуды ударной волны в пузырьковой системе с $\alpha = 0,7$ (см. рис. 6)), находим температуру газа в пузырьке в момент максимального сжатия в ударной волне: $T_{\text{к}} \approx 3000$ К. При этом предельная степень сжатия пузырька $R_0/R \approx 3,2$, а давление газа в пузырьке достигает значения $p_{\text{к}} \approx 500$ атм.

Полученные значения параметров газа в пузырьке завышены, поскольку при расчете не учитывались тепловые потери пузырька в процессе сжатия. Тем не менее сам факт свечения пузырьков газа свидетельствует о достижении высоких температур при сжатии пузырьков в ударных волнах.

Заметим, что теплопотери пузырьков газа при сжатии в ударных волнах существенно зависят от состояния поверхности пузырьков в процессе сжатия [4, 10–12]: развитие искажений поверхности пузырька газа интенсифицирует передачу тепла через стенки пузырька и тем самым снижает температуру и давление газа в пузырьке. В этой связи отметим существенное усиление интенсивности свечения пузырьков газа при увеличении вязкости жидкого компонента пузырьковой системы (см. рис. 6 и табл. 3). Данный факт свидетельствует о стабилизирующей роли вязкости жидкости в процессе сжатия пузырьков газа в ударных волнах: с увеличением вязкости жидкости искажения поверхности пузырька в процессе сжатия уменьшаются, при этом теплопотери пузырьков снижаются и, следовательно, условия сжатия пузырьков газа в ударных волнах приближаются к адиабатическим.

О достижении высоких температур при сжатии пузырьков газа свидетельствуют также такие факты, как воспламенение химически активных пузырьков сред ударными волнами [13] и существование детонационных волн в пузырьковых средах [14, 15, 12]. (Во избежание недоразумения необходимо заметить, что свечение химически неактивных систем (в том числе и с пузырьками кислорода) в ударных волнах, обнаруженное в настоящей работе, и световое излучение, сопровождающее рас-

пространение детонационных волн в пузырьковых средах, имеют различную природу: первое является тепловым (следствие разогрева газа в пузырьках при сжатии), в то время как второе суть хемилюминесценция — световое излучение, сопутствующее химическим реакциям при воспламенении химически активного газа в пузырьках в волне детонации. При этом световое излучение в ударных волнах и хемилюминесценция при детонации количественно сопоставимы: интенсивность свечения пузырьковой системы «жидкость ($\alpha = 0,5$) — O_2 » в $100 \div 200$ раз меньше, чем интенсивность свечения при детонации в пузырьковой системе «жидкость ($\alpha = 0,5$) — $(C_2H_2 + 2,5O_2)$ ».

Время сжатия пузырьков газа в ударной волне можно оценить по известной формуле Рэлея, описывающей сжатие пустой полости при внезапном повышении давления в жидкости:

$$\tau_c \approx 0,9R_0 \left(\frac{\rho_{ж}}{\Delta p} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Так, при $R_0 = 1,25$ мм, $\rho_{ж} = 1182$ кг/м³ ($\alpha = 0,7$) и $p_1 = 20$ атм получаем $\tau_c \approx 25$ мкс. Полагая время расширения пузырька $\tau_r \approx \tau_c$, находим время сжатия — расширения пузырька: $\tau_{с-р} = \tau_c + \tau_r \approx 50$ мкс. Получается, что время свечения пузырьков газа в ударной волне на порядок меньше времени сжатия — расширения пузырьков. Другими словами, сжатие пузырьков газа в ударной волне сопровождается свечением газа в пузырьках лишь в течение периода времени, составляющего малую часть длительности процесса взаимодействия пузырьков газа с ударной волной.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования ударных волн в химически неактивных пузырьковых средах показали, что распространение ударных волн сопровождается свечением пузырьковой среды. Световое излучение зафиксировано в различных пузырьковых средах — в водоглицериновых растворах с пузырьками одно- и двухатомных газов. Ударные волны в пузырьковых средах имеют пульсационную структуру. Свечение, сопровождающее распространение ударной волны в пузырьковой среде, наблюдается во фронте ударной волны и также носит пульсационный характер. Пульсации давления ударной волны и световое излучение пузырьковой среды являются следствием осцилляций пузырьков газа в ударной волне; стохастический характер пульсаций давления ударной вол-

ны и свечения пузырьков газа обусловлен случайным распределением пузырьков в жидкости. Скорость ударных волн (падающих и отраженных от твердой преграды) уменьшается с повышением концентрации газовой фазы пузырьковой среды и возрастает при увеличении амплитуды падающей ударной волны. Коэффициент повышения давления ударных волн при отражении от твердой преграды равен двум в жидкостях и возрастает при увеличении концентрации газовой фазы пузырьковой среды. Влияние физических свойств газов, содержащихся в пузырьках, и свойств жидкостей (помимо скорости звука) на скорость ударных волн незначительно. Результаты проведенного расчета скоростей падающих и отраженных ударных волн находятся в согласии с экспериментальными данными. Интенсивность свечения пузырьков газа в ударных волнах зависит как от физических свойств жидкого и газового компонентов системы, так и от параметров ударной волны и пузырьковой среды: сильнее светятся пузырьки одноатомных газов (по сравнению с двухатомными газами), находящиеся в жидкостях с большей вязкостью; при этом интенсивность свечения пузырьков газа существенно повышается с увеличением амплитуды ударной волны; зависимость интенсивности свечения пузырьковой среды от концентрации газовой фазы системы имеет монотонный характер. Световое излучение, являющееся по своей природе тепловым, свидетельствует о достижении высоких температур при сжатии пузырьков газа в ударных волнах.

Исследованный ударно-волновой процесс в пузырьковых средах может быть использован как метод получения высоких и, возможно, сверхвысоких температур, необходимых для проведения технологических процессов, например, в химической промышленности и в энергетике.

ЛИТЕРАТУРА

1. Накоряков В. Е., Покусаев Б. Г., Шрейбер И. Р. Распространение волн в газо- и парожидкостных средах. Новосибирск: Ин-т теплофизики, СО АН СССР, 1983.
2. Кутателадзе С. С., Накоряков В. Е. Теплообмен и волны в газожидкостных системах. Новосибирск: Наука, 1984.
3. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. Ч. II. М.: Наука, 1987.
4. Кнэпп Р., Дейли Дж., Хэммит Ф. Кавитация. М.: Мир, 1974.

5. **Физические** величины: Справочник / Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991.
6. **Физическая** энциклопедия. М.: Сов. энцикл., 1990.
7. **Папок К. К., Рагозин Н. А.** Словарь по топливам, маслам, смазкам, присадкам и специальным жидкостям. М.: Химия, 1975.
8. **Эберт Г.** Краткий справочник по физике. М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1963.
9. **Бэтчелор Г. К.** Волны сжатия в суспензии газовых пузырьков в жидкости // Механика: Сб. переводов. 1968. № 3(109). С. 65.
10. **Дубовик А. В., Боболев В. К.** Чувствительность жидких взрывчатых систем к удару. М.: Наука, 1978.
11. **Сычев А. И.** Влияние размера пузырьков на характеристики волн детонации // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31, № 5. С. 83–91.
12. **Пинаев А. В., Сычев А. И.** Структура и свойства детонации в системах жидкость — пузырьки газа // Физика горения и взрыва. 1986. Т. 22, № 3. С. 109–118.
13. **Сычев А. И.** Воспламенение систем жидкость — пузырьки газа ударной волной // Физика горения и взрыва. 1985. Т. 21, № 2. С. 130–134.
14. **Сычев А. И.** Волна детонации в системе жидкость — пузырьки газа // Физика горения и взрыва. 1985. Т. 21, № 3. С. 103–110.
15. **Сычев А. И., Пинаев А. В.** Самоподдерживающаяся детонация в жидкостях с пузырьками взрывчатого газа // ПМТФ. 1986. № 1. С. 133–138.

Поступила в редакцию 17/VI 2002 г.
