

УДК 534.222.2+532.529

КРИТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ ИНИЦИИРОВАНИЯ ВОЛНЫ ПУЗЫРЬКОВОЙ ДЕТОНАЦИИ ПРИ ВЗРЫВЕ ПРОВОЛОЧКИ

А. В. Пинаев, И. И. Кочетков

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, avpin@ngs.ru

Экспериментально исследовано инициирование пузырьковой детонации короткой ударной волной от взрыва проволоочки, находящейся в химически активной пузырьковой среде. Определены критические энергии инициирования детонации при различной объемной концентрации пузырьков. Показано, что при таком способе инициирования волна сжатия выходит на детонационный режим на длине ≈ 0.3 м. Установлено, что при взрыве проволоочки внутри газожидкостной среды можно уменьшить критическую энергию инициирования пузырьковой детонации более чем на два порядка по сравнению с ее инициированием волной газовой детонации.

Ключевые слова: взрыв проволоочки, ударная волна, скорость звука, жидкость, пузырьковая среда, пузырьковая детонация.

ВВЕДЕНИЕ

Проблеме выяснения условий и механизма инициирования пузырьковой детонации (ПД) с помощью волны газовой детонации, падающей на поверхность газожидкостной среды, посвящена работа [1]. Экспериментально установлено, что возбуждение ПД происходит от действия на пузырьки ударной волны, амплитуда которой превышает критическую, а длина — размер области сжатия волны пузырьковой детонации. Было обнаружено, что основную роль в формировании инициирующей волны играет газовая «пробка» под диафрагмой детонационной трубы, а не параметры газа в секции инициирования и ее длина. Необходимая для возбуждения ПД минимальная энергия газовой смеси в работе [1] составила 4.2 кДж. Основным недостатком инициирования газовой детонации волной состоит в том, что образование (отделение) волны ПД от протяженной волны сжатия происходит, как правило, на значительном расстоянии от верхней границы пузырьковой среды и может достигать нескольких метров [2–5].

Для сокращения времени формирования волны пузырьковой детонации в [6] было предложено использовать для инициирования короткую ударную волну от взрыва проволоочки, находящейся непосредственно в пузырьковой среде. При разряде конденсатора емкостью

50 мкФ через проволоочку пузырьковая детонация была получена при напряжении $U_0 \geq 4$ кВ, когда величина выделившейся в проволоочке энергии $W_1 \geq 286$ Дж [6] примерно в 15 раз меньше, чем при инициировании ПД с помощью волны газовой детонации в [1]. Энергия, необходимая для испарения используемых в эксперименте проволоочек, $W_Q \approx 10$ Дж, поэтому следует ожидать, что при оптимизации процесса инициирования ПД с учетом дополнительной энергии, уходящей в ударную волну, величину W_1 можно существенно уменьшить до значений, сравнимых с W_Q .

В многочисленных теоретических работах распространение ударных и детонационных волн в пузырьковых средах описывали преимущественно в рамках одномерных моделей для сплошной гетерогенной среды (см., например, [7, 8]). При взрыве проволоочки в чистой безграничной жидкости происходит быстрое затухание волны и изменение ударно-волнового поля. В ближней от проволоочки зоне геометрия фронта волны соответствует заряду конечной длины, вдали волна становится сферической и выполняется приближение для точечного заряда. При наличии пузырьков в жидкости и случайном их расположении относительно проволоочки среда становится неоднородной, что вызывает локальные искажения фронта волны и приводит к разбросу экспериментальных данных. Это дополнительно (по сравнению с жидкостью) усложняет задачу, делая ее трехмерной и нестационарной. В этой связи для описания инициирования ПД взрывом непосред-

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 12-01-00022а).

ственно внутри среды полезны работы [9–14] по моделированию двумерных ударных и детонационных волн в пузырьковой жидкости.

Цель настоящей работы — определить критические энергии и механизм инициирования пузырьковой детонации при взрыве проволоочки и установить, насколько быстро волна ПД выходит на стационарный режим.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Эксперименты проводили в вертикальной ударной трубе с внутренним диаметром 35 мм и длиной 4.5 м, принципиальная схема установки дана в [6]. В качестве жидкости в трубе использовали смесь $0.75\text{H}_2\text{O} + 0.25$ глицерина (скорость звука $c_{\text{ж}} = 1600$ м/с), в качестве газов в пузырьках — смесь $\text{C}_2\text{H}_2 + 2.5\text{O}_2$ либо воздух. Снизу трубы располагался генератор пузырьков из тонких трубочек, создающих пузырьки диаметром $d_1 = 3 \div 4$ мм. Объемная концентрация пузырьков β_0 составляла $1 \div 4\%$.

Принципиальная схема размещения электродов, пьезодатчиков и фотоумножителя (ФЭУ) в верхней измерительной секции приведена на рис. 1. Сверху трубы расположены подвижные медные электроды диаметром 3 мм, между которыми снизу припаивали манганиновую проволоочку длиной 11 мм и сопротивлением 0.32 ± 0.01 Ом. Активное сопротивление электрической цепи между конденсатором и проволоочкой составляло 0.11 Ом. Общая индуктивность цепи с конденсатором 2 мкФ состав-

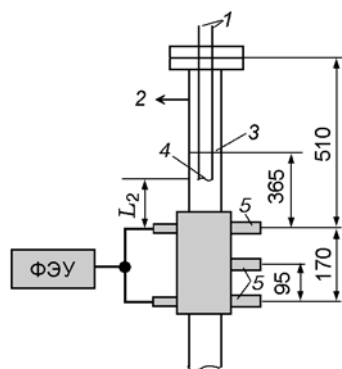


Рис. 1. Принципиальная схема верхнего участка трубы:

1 — электроды, 2 — трубка выхода газа, 3 — уровень газожидкостной среды, 4 — проволоочка, 5 — пьезодатчики $D_1 \div D_3$ (сверху вниз); $L_2 = 168$ мм

ляла 5.5 мкГн. Для используемых в эксперименте манганиновых проволоочек массой 1.4 мг $W_Q \approx 7.5$ Дж. Здесь $W_Q = W_t + W_f + W_v$, где W_t , W_f , W_v — соответственно теплоты нагрева, плавления и испарения проволоочки, вычисленные по справочным данным: $W_t \approx 0.5$ Дж (температура $20 \leq T \leq 960$ °С), $W_f \approx 0.3$ Дж, $W_v \approx 6.7$ Дж. Поэтому для поиска критической энергии инициирования пузырьковой детонации W^* использовали конденсатор емкостью 2 мкФ, который при $U_0 = 3 \div 9$ кВ позволял работать в диапазоне энергий $W_0 = 9 \div 81$ Дж ($W_0 \geq W_Q$).

Ток измеряли в разрядной цепи на шунте с сопротивлением 8.5 мОм, начальная амплитуда разрядного тока $I_0 = 6.75 \div 18$ кА. Коэффициент передачи энергии в проволоочку $W_1/W_0 \approx 0.675$, минимальная выделившаяся в проволоочке энергия $W_1 = 6$ Дж.

Давление в ударных и детонационных волнах измеряли пьезокерамическими (ЦТС-19) датчиками с собственной частотой 300 кГц. Для увеличения постоянной времени датчиков использовали истоковый повторитель с входным сопротивлением 10^9 Ом. Свечение в пузырьковых средах регистрировали фотоумножителем, оптические вводы которых были установлены напротив датчиков D_1 и D_3 . Для записи электрических сигналов использовали два 4-лучевых осциллографа Tektronix.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Типичная осциллограмма напряжения на конденсаторе и разрядного тока на шунте при подрыве проволоочки в газожидкостной среде приведена на рис. 2. После замыкания электрической цепи через $3 \div 4$ мкс происходит резкое

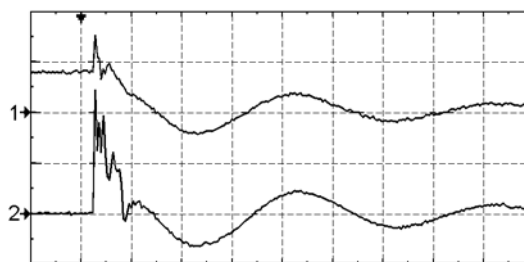


Рис. 2. Осциллограммы напряжения U_1 (1) и разрядного тока (2) в газожидкостной среде:

$C_1 = 2$ мкФ, $U_0 = 8$ кВ ($W_0 = 64$ Дж), $\beta_0 = 1 \div 4\%$, по горизонтали: 5 мкс/дел, по вертикали: луч 1 — 10 кВ/дел, луч 2 — 11.8 кА/дел

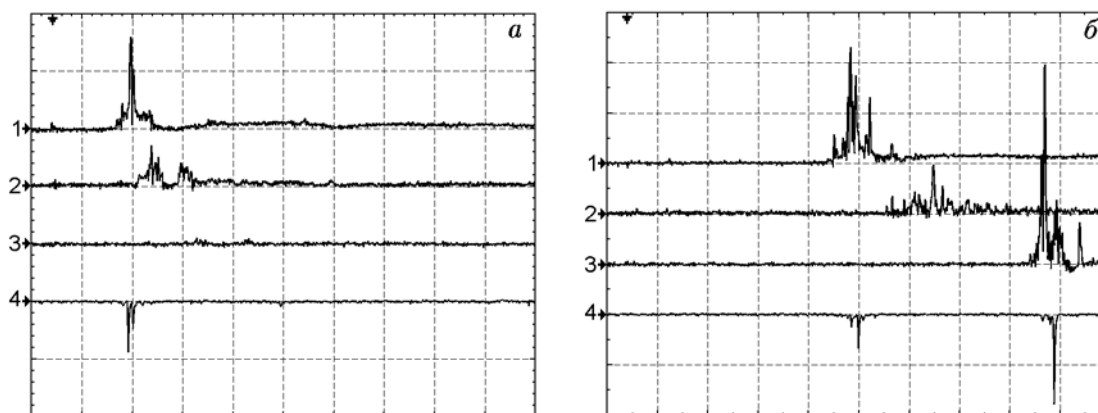


Рис. 3. Осциллограммы давления (1–3) и свечения (4) в химически активной среде:
 $U_0 = 4.5$ кВ ($W_0 = 20.25$ Дж), $\beta_0 = 1$ (а) и 2.1 % (б); по горизонтали: 100 мкс/дел; по вертикали: лучи 1–3 — 10 МПа/дел, 4 — 1 В/дел

падение тока до нуля, что соответствует разрыву проволоочки по длине. К этому моменту времени конденсатор разряжается на 70 ÷ 76 % от начальной энергии W_0 . Оставшаяся энергия конденсатора выделялась в цепи и в образовавшейся после взрыва проволоочки плазме за время $\approx 50 \div 60$ мкс (период колебаний тока $t_1 \approx 21$ мкс, постоянная времени затухания $\tau_1 \approx 30$ мкс).

На рис. 3 приведены характерные осциллограммы давления и свечения в пузырьковых средах при разных значениях β_0 в случае затухания (а) и возбуждения (б) пузырьковой детонации. Здесь $U_0 = 4.5$ кВ, начальная энергия в конденсаторе $W_0 \approx 20.3$ Дж, выделившаяся на проволоочке и в плазме энергия $W_1 \approx 13.7$ Дж. К моменту разрушения проволоочки на ней выделяется энергия, примерно равная $0.7W_1 \approx 9.6$ Дж, т. е. больше W_Q . Этой энергии уже достаточно для образования ударной волны и возбуждения пузырьковой детонации (см. рис. 3, б) по механизму сжатия и воспламенения пузырьков. Такой механизм инициирования пузырьковой детонации можно назвать ударно-волновым. Из опытов следует, что теплового механизма инициирования ПД ($W_1 \leq W_Q$ и ударной волны нет), когда газовая смесь в пузырьке воспламеняется при контакте с нагретой проволоочкой, недостаточно для возбуждения детонации.

В опытах, в которых ПД не возбуждается, волна сжатия регистрируется первыми двумя датчиками и обычно затухает на расстоянии ≤ 0.3 м от проволоочки — на третьем датчике (см. рис. 3, а).

Если детонация возбуждается при околокритических энергиях ($W_1 \geq W_Q$), профили давления и свечения в ударной волне становятся близкими к профилям установившейся волны ПД на расстоянии менее 0.3 м от проволоочки.

Расстояние Δl_1 между пузырьками диаметром d_1 можно оценить по формуле $\Delta l_1 \approx d_1(\pi/2\beta_0)^{1/3}$ [15]. С уменьшением β_0 до 1 % расстояние между пузырьками диаметром $d_1 = 4$ мм возрастает до $\Delta l_1 \approx 21.6$ мм и одновременно становится заметна неоднородность пузырьковой среды. Наличие такой неоднородности увеличивает вероятность срыва детонации. При $\beta_0 = 1$ % значения $W_0 \approx 20.3$ Дж и $W^* = 0.7W_1 \approx 9.6$ Дж следует считать критическими, поскольку наряду с опытами, в которых детонация отсутствует, наблюдаются случаи, когда детонация возбуждается и устойчиво распространяется по всей длине трубы.

Критические значения напряжений и энергий были аналогично определены для других значений β_0 (рис. 4). На графике вместо четкой нижней границы приведен диапазон критических параметров, где верхняя граница (кривая 1) — опыты, в которых ПД возбуждается всегда, нижняя граница (кривая 2) — опыты, в которых при одинаковых начальных условиях детонация реализуется с вероятностью < 100 % (волна ПД либо затухает, либо возбуждается и распространяется по всей длине трубы). Из-за существования такого диапазона критических параметров погрешность определения U_{10}^* составляет 10 ÷ 12 %, а W^* — 20 ÷ 25 %.

В таблице представлены параметры волн

Средние значения давления, длительности и скорости волны ПД при изменении газосодержания β_0 в верхней секции измерения ($C_1 = 2$ мкФ, $U_0 = 3.5 \div 8$ кВ, $W_0 = 12.25 \div 64$ Дж)

$\beta_0, \%$	$\Delta p_1, \text{МПа}$	$\Delta p_3, \text{МПа}$	$\Delta t_1, \text{мкс}$	$\Delta t_3, \text{мкс}$	$\Delta L_1, \text{мм}$	$\Delta L_3, \text{мм}$	$v_{13}, \text{м/с}$	$\Delta p, \text{МПа}$	$\Delta L, \text{мм}$	$D, \text{м/с}$
1	2.2 ÷ 3.0	3.0 ÷ 5.0	80 ÷ 50	95 ÷ 70	48 ÷ 35	57 ÷ 49	600 ÷ 700	6.0 ± 2.0	38 ÷ 57	950 ± 50
2	3.5 ÷ 5.0	4.0 ÷ 5.5	90 ÷ 60	100 ÷ 70	42 ÷ 33	47 ÷ 39	470 ÷ 550	7.0 ± 3.0	31 ÷ 46	760 ± 30
3	4.5 ÷ 6.5	3.5 ÷ 4.5	80 ÷ 60	90 ÷ 60	36 ÷ 31	41 ÷ 31	450 ÷ 520	8.0 ± 4.0	25 ÷ 38	630 ± 30
4	3.5 ÷ 7.0	3.0 ÷ 5.5	100 ÷ 80	110 ÷ 70	38 ÷ 34	42 ÷ 30	380 ÷ 420	10.0 ± 5.0	23 ÷ 34	560 ± 30

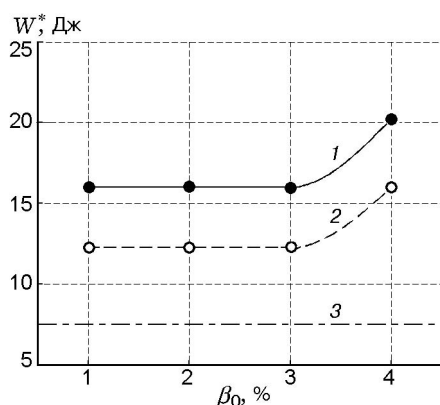


Рис. 4. Зависимость критической энергии от объемной концентрации пузырьков при взрыве проволоочки:

1, 2 — соответственно нижняя и верхняя границы W^* , 3 — величина $W_Q = 7.5$ Дж

сжатия: Δt_i и Δp_i — соответственно длительность и среднее давление, рассчитанное по экспериментальному профилю давления в интервале времени Δt_i , v_{13} — средняя скорость волны между датчиками, $\Delta L_i = v_{13} \Delta t_i$ — средняя протяженность волны ($i = 1, 3$). Измерения выполнены датчиками Д₁ и Д₃, расстояние между датчиками 170 мм (см. рис. 1). Параметры либо возрастают, либо убывают с ростом напряжения U_0 , а границы их диапазонов соответствуют минимальному и максимальному значениям напряжения. С ростом U_0 среднее давление волны монотонно возрастает, а ее длительность незначительно уменьшается.

В последних трех колонках таблицы приведены значения среднего давления Δp , протяженности ΔL и скорости D стационарной волны ПД в нижней секции измерения. Разброс их значений обусловлен не величиной энергии инициирования W_0 , а случайным расположением пузырьков относительно датчиков давления и неоднородностью поля давления в волне ПД.

С ростом газосодержания β_0 увеличивает-

ся вклад в давление волны от прореагировавших пузырьков, поэтому среднее давление на первом датчике возрастает. Из таблицы видно, что на третьем датчике значения Δp_3 и Δt_3 слабо зависят от β_0 . Это означает, что на длине $L < 0.3$ м ($L > L_2$) от проволоочки вклад от начального импульса давления практически исчезает и основное влияние на формирование волны пузырьковой детонации оказывает химически активная пузырьковая среда. Отметим, что длительность Δt стационарной волны ПД крайне слабо зависит от концентрации, оставаясь в пределах 40 ÷ 60 мкс, а длина волны ΔL уменьшается примерно в 1.5 раза при изменении β_0 от 1 до 4 %.

Анализ осциллограмм показывает, что на датчике Д₃ при $U_0 = 3.5$ кВ и $C_1 = 2$ мкФ скорость волны на 20 ÷ 50 м/с больше, чем при $U_0 = 3.5$ кВ и $C_1 = 50$ мкФ. Эти факты указывают на дробление пузырьков и возникновение кавитации на участках разгрузки давления в волне вплоть до датчика Д₃ при сильном инициировании, а также на отсутствие ослабляющего действия кавитации уже на первом датчике при слабом инициировании ($C_1 = 2$ мкФ). Таким образом, для более быстрого установления скорости ПД требуется сравнительно небольшая энергия W_0 . При меньшей (околокритической) энергии установление скорости ПД происходит быстрее и одновременно с торможением исходной ударной волны идет формирование волны ПД.

Характерные осциллограммы профилей давления волны пузырьковой детонации в нижней измерительной секции, расположенной на расстоянии 3 м от верхней секции, приведены на рис. 5. Здесь длительность регистрируемых волн примерно 50 мкс, длина области сжатия 37 ÷ 40 мм.

Результаты измерения скорости волны ПД при различной объемной концентрации пузырьков показывают, что ее величина не за-

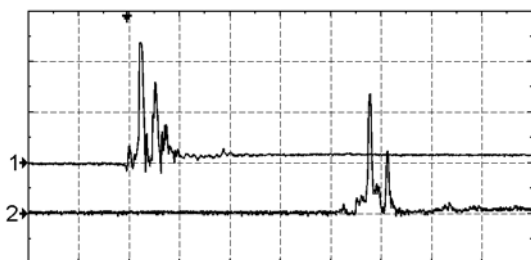


Рис. 5. Профили давления установившейся волны пузырьковой детонации в нижней измерительной секции:

$\beta_0 = 2 \%$, $C_1 = 2$ мкФ, $U_0 = 5$ кВ, $W_0 = 25$ Дж, $D = 750$ м/с, $\Delta L = 37 \div 40$ мм; по горизонтали — 50 мкс/дел, по вертикали (лучи 1, 2) — 20 МПа/дел

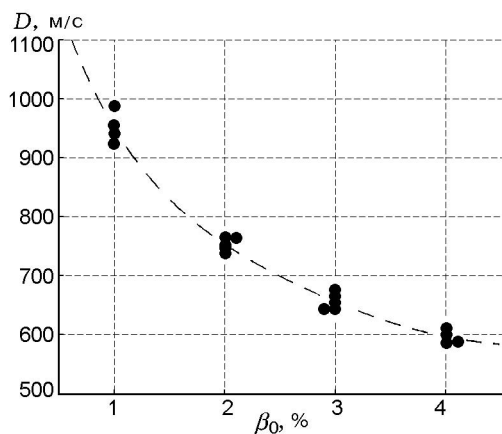


Рис. 6. Зависимость скорости установившейся волны ПД от объемной концентрации газа в нижней секции измерения ($C_1 = 2$ мкФ, $U_0 = 4 \div 9$ кВ, $W_0 = 16 \div 81$ Дж)

висит от начального напряжения U_0 (рис. 6). Из-за неоднородности среды при малой концентрации газа ($\beta_0 = 1 \%$) наблюдается наибольший разброс в измерениях скорости волны ПД. Полученные данные совпадают со значениями скоростей волны ПД в работах [4–6, 15], где инициирование детонации осуществляли протяженной ударной волной, создаваемой при подрыве горючей газовой смеси в секции инициирования, и с результатами измерения D из работы [6] при $C_1 = 50$ мкФ, $U_0 = 4 \div 8$ кВ, $W_0 = 0.44 \div 1.60$ кДж. Тем самым подтверждается независимый от способа инициирования характер распространения волны пузырьковой детонации.

Используя данные таблицы, можно оценить, сколько «слоев» пузырьков $N = \Delta L / \Delta l_1$ формируют стационарную волну пузырьковой

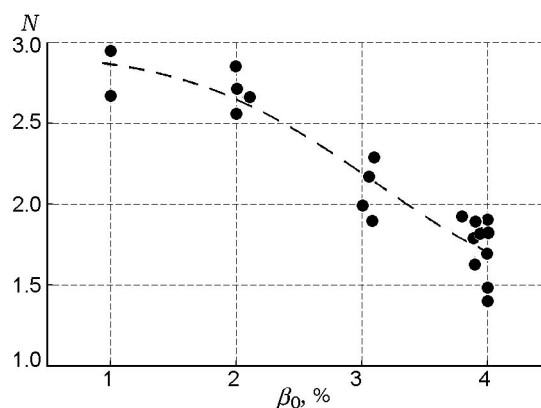


Рис. 7. Зависимость эффективного количества «слоев» пузырьковой среды, участвующих в формировании стационарной волны ПД, от газосодержания

детонации (рис. 7). При $\beta_0 = 1 \%$ число «слоев» $N \approx 3$, и с увеличением газосодержания до 4 % их количество уменьшается примерно в 1.5 ÷ 2 раза. Это означает, что волна ПД находится в резонансе с колебаниями пузырьков, и объясняет, почему ее осредненный профиль давления оказывается близким к профилю уединенной волны [15].

Для выяснения характера распространения и структуры ударной волны вблизи проволоочки были выполнены измерения ее среднего давления при расположении электродов напротив датчика D_1 ($L_2 = 0$). В этом случае наблюдается больший разброс среднего давления ударной волны по сравнению со случаем, когда электроды удалены на расстояние $L_2 = 168$ мм от датчика D_1 (см. рис. 1), и более сильная зависимость среднего давления ударной волны от энергии W_0 . Например, для $U_0 = 3.5 \div 9$ кВ ($W_0 = 12.25 \div 81$ Дж) при $\beta_0 = 1 \%$ среднее давление $\Delta p_1 = 6.0 \div 33.0$ МПа, а при $\beta_0 = 4 \%$ — $\Delta p_1 = 2.0 \div 9.0$ МПа. Давление Δp_3 на датчике D_3 заметно слабее зависит от напряжения, чем на датчике D_1 .

Профили давления и свечения при взрыве проволоочки, расположенной напротив датчика D_1 , приведены на рис. 8. Если при малом напряжении $U_0 = 3.5$ кВ свечение непродолжительное (10 ÷ 20 мкс) и амплитуда давления 15 ÷ 20 МПа, то с увеличением напряжения в 2 раза длительность свечения возрастает в 15 ÷ 30 раз за счет свечения плазменного пузыря, а амплитуда давления — в 3 раза (см. рис. 8). Видно, что при взрыве проволоочки

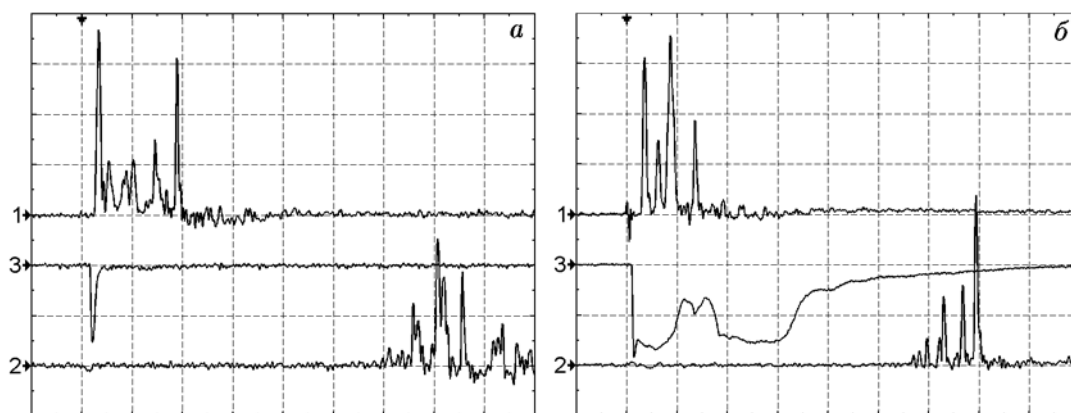


Рис. 8. Осциллограммы давления (1, 2) и свечения (3) в химически активной среде:

$U_0 = 3.5$ кВ ($W_0 = 12.25$ Дж) (а) и 7 кВ ($W_0 = 49$ Дж) (б), $C = 2$ мкФ, $\beta_0 = 2\%$, $L_2 = 0$; по горизонтали: 50 мкс/дел; по вертикали, а: лучи 1, 2 — 5 МПа/дел, 3 — 5 В/дел; б: лучи 1, 2 — 15 МПа/дел, 3 — 5 В/дел

ки в газожидкостной среде образуется короткая ударная волна, длительность которой для всего диапазона напряжений $U_0 = 3 \div 9$ кВ составляет $100 \div 70$ мкс и в дальнейшем слабо меняется.

Таким образом, уже вблизи взрывающейся проволоочки длительность и профиль давления ударной волны близки к параметрам волны пузырьковой детонации. Это существенно ускоряет инициирование ПД и выход волны на стационарный режим распространения, а также уменьшает критическую энергию инициирования более чем на два порядка (в $150 \div 350$ раз в зависимости от β_0) по сравнению со случаем инициирования процесса волной газовой детонации. С увеличением энергии W_0 , когда давление в инициирующей волне превышает давление в установившейся волне пузырьковой детонации, возрастают потери, затрудняющие формирование волны ПД. Поэтому наиболее быстро волна сжатия выходит на стационарный режим при энергии, близкой к критической энергии инициирования ПД.

ВЫВОДЫ

Показано, что инициирование пузырьковой детонации при разряде конденсатора на проволоочку возможно с образованием ударной волны при энергии, незначительно превышающей энергию, необходимую для испарения проволоочки.

При взрыве проволоочки внутри пузырьковой среды с газосодержанием $\beta_0 = 2 \div 4\%$ критическая энергия инициирования пузырьковой

детонации составляет $12 \div 20$ Дж, что примерно в $150 \div 350$ раз меньше энергии, содержащейся в газовой смеси при инициировании газовой детонации волной.

Возбуждение пузырьковой детонации при взрыве проволоочки осуществляется по ударно-волновому механизму сжатия и воспламенения пузырьков.

Эксперименты, выполненные в широком диапазоне начальной запасенной энергии, показали, что скорость волны детонации не зависит от энергии, выделившейся в проволоочке, а определяется свойствами газожидкостной среды.

По структуре ударная волна вблизи проволоочки подобна волне пузырьковой детонации, что отличает ее от протяженной ударной волны, создаваемой волной газовой детонации, и ускоряет процесс инициирования ПД. Наиболее быстрое формирование волны ПД осуществляется при запасенной энергии, близкой к критической.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кочетков И. И., Пинаев А. В. Об условиях инициирования пузырьковой детонации // Физика горения и взрыва. — 2007. — Т. 43, № 2. — С. 84–90.
2. Сычев А. И., Пинаев А. В. Самоподдерживающаяся детонация в жидкостях с пузырьками взрывчатого газа // ПМТФ. — 1986. — № 1. — С. 133–138.
3. Пинаев А. В., Сычев А. И. Обнаружение и исследование самоподдерживающихся режимов детонации в системах жидкое горючее —

- пузырьки окислителя // Докл. АН СССР. — 1986. — Т. 290, № 3. — С. 611–615.
4. **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.
 5. **Пинаев А. В., Сычев А. И.** Влияние физико-химических свойств газа и жидкости на параметры и условия существования волны детонации в системах жидкость — пузырьки газа // Физика горения и взрыва. — 1987. — Т. 23, № 6. — С. 76–84.
 6. **Кочетков И. И., Пинаев А. В.** Ударные и детонационные волны в жидкости и пузырьковых средах при взрыве проволоки // Физика горения и взрыва. — 2012. — Т. 48, № 2. — С. 124–133.
 7. **Нигматулин Р. И.** Динамика многофазных сред. — М.: Наука, 1987. — Ч. I, II.
 8. **Кедринский В. К.** Гидродинамика взрыва: эксперимент и модели. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000.
 9. **Galimzyanov M. N., Gimaltdinov I. K., Shagapov V. Sh.** Two-dimensional pressure waves in a fluid with bubbles // Fluid Dynamics. — 2002. — V. 37, N 2. — P. 294–301.
 10. **Шагапов В. Ш., Гималтдинов И. К., Баязитова А. Р., Спевак Д. С.** Распространение детонационных волн вдоль трубчатого пузырькового кластера, находящегося в жидкости // Теплофизика высоких температур. — 2009. — Т. 47, № 3. — С. 448–456.
 11. **Баязитова А. Р., Гималтдинов И. К., Шагапов В. Ш.** Волны давления в трубе, заполненной пузырьковой смесью с неоднородным распределением по сечению // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. — 2006. — № 3. — С. 67–78.
 12. **Кедринский В. К., Маслов И. В., Таратута С. П.** Структура волнового поля в активных пузырьковых системах в ударных трубах со «скачками» сечений // ПМТФ. — 2002. — № 2. — С. 101–109.
 13. **Vanhille C., Campos-Pozuelo C.** Two-dimensional numerical simulations of nonlinear ultrasonic propagation in bubbly liquids // Intern. J. Nonlinear Sci. and Numerical Simulation. — 2010. — V. 11, N 12. — P. 1019–1026.
 14. **Лепихин С. А., Галимзянов М. Н., Гималтдинов И. К.** Иницирование детонационных волн в каналах переменного сечения, заполненных жидкостью с пузырьками горючего газа // Теплофизика высоких температур. — 2010. — Т. 48, № 2. — С. 234–240.
 15. **Пинаев А. В., Кочетков И. И.** Расчет структуры волны пузырьковой детонации с учетом дискретного расположения пузырьков // Физика горения и взрыва. — 2008. — Т. 44, № 4. — С. 116–126.

*Поступила в редакцию 22/VI 2011 г.,
в окончательном варианте — 4/X 2011 г.*