

ПЕРЕДАЧА ПУЗЫРЬКОВОЙ ДЕТОНАЦИИ ЧЕРЕЗ СЛОЙ ИНЕРТНОЙ ЖИДКОСТИ

А. В. Пинаев

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

Экспериментально установлена возможность передачи детонации через водяную пробку от одного столба пузырьковой химически активной среды к другому. Определена критическая длина пробки жидкости. Опыты проведены в ударной трубе с пузырьками стехиометрической ацетиленокислородной смеси в воде. Установлен характер затухания пикового давления после выхода волны детонации из пузырьковой среды в жидкость. Показано, что в процессе распространения волны сжатия по дискретной газожидкостной среде профиль давления сохраняет подобие.

Ключевые слова: детонация, пузырьковая среда, газожидкостная среда, ударная волна, уединенная волна, резонансное поглощение.

ВВЕДЕНИЕ

В работах [1–5] впервые экспериментально обнаружена и исследована самоподдерживающаяся пузырьковая детонация в ударной трубе, заполненной непрерывной пузырьковой химически активной средой. Пузырьковая детонация распространяется со скоростью, в несколько раз превышающей равновесную низкочастотную скорость звука c_0 в пузырьковой среде, но меньшей скорости звука в жидкости $c_{ж}$, и относится к неидеальным низкоскоростным детонационным процессам [6].

В настоящей работе исследуются волновые процессы в химически активной дискретной газожидкостной системе. Создание физической и теоретической модели детонационного процесса в периодических дискретных системах позволит в дальнейшем разработать основы акустики импульсных излучателей.

Цель работы — исследовать затухание волны пузырьковой детонации после ее выхода в жидкость и возможность передачи детонации от одного химически активного пузырькового объема к другому через слой воды в одномерной постановке; определить критические размеры водяной пробки при определенной величине газосодержания и химических свойствах пузырьковой среды, когда происходит передача пузырьковой детонации.

В подобных задачах по передаче детонации через инертную среду для газообразных или твердых взрывчатых веществ (ВВ) скорость детонации превышала скорость звука в инертной (соответственно газообразной или твердой) среде, что приводило к образо-

ванию ударной волны в инертной среде и облегчало возбуждение детонации в прилежащем слое взрывчатой среды. Газожидкостная среда принципиально отличается от газовых и твердых сред тем, что скорость детонации в пузырьковой среде в несколько раз меньше скорости звука в пробке жидкости. Поэтому возможность передачи пузырьковой детонации через инертную жидкость при существенно различающихся акустических импедансах пузырьковой среды и жидкости не очевидна.

В [7] теоретически решены задачи о прохождении ударных волн через различные типы экранов с химически инертными пузырьками газов и проведено сравнение полученных результатов с известными экспериментальными данными.

В настоящей работе исследованы волновые процессы в следующих химически активных газожидкостных системах:

- столб пузырьковой среды (пузырьки взрывчатого газа в воде) и граничащий с ним столб воды;
- два столба пузырьковой среды с разрывом (водяным столбом) между ними.

1. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты с пузырьковыми химически активными столбами проведены в вертикальной ударной трубе диаметром 35 мм и длиной 4,9 м. Иницирование пузырьковой детонации осуществляли с помощью дополнительной секции длиной 0,8 м, заполненной смесью $C_2H_2 + 2,5O_2$ до начального давления $0,25 \div 0,3$ МПа. Секцию иницирования отделяли от рабочей

секции разрушающейся диафрагмой, газовую смесь в секции инициирования подрывали высоковольтным разрядом.

В рабочей секции ударной трубы имелись две оптические секции. Верхняя оптическая секция служила для контроля положения границы пузырьковой среды с помощью фотоумножителя и источника света. По подъему столба пузырьковой среды на величину Δh относительно начального уровня жидкости L_0 , вычисляли объемное газосодержание в пузырьковой системе $\beta_0 = \Delta h/L_0$. Давление над верхней границей пузырьковой среды перед инициированием поддерживалось равным атмосферному, общая длина столба газожидкостной среды составляла 4,5 м.

Верхняя граница нижней оптической секции с двумя диаметрально противоположными окнами размером 8×240 мм располагалась на расстоянии 1 м от торца трубы. В секции осуществляли запись давления, свечения и определяли положение границ между пузырьковой средой и жидкостью. Пузырьки газа ($C_2H_2 + 2,5O_2$) радиусом $R_0 = 1 \div 2$ мм подавали в трубу с использованием генератора пузырьков.

Давление записывали с помощью четырех пьезодатчиков с собственной частотой 300 кГц и диаметром пьезокерамики 2 мм. Оптические вводы для регистрации свечения были расположены напротив первого и второго пьезодатчиков, закрепленных непосредственно в пластине из оргстекла размером 25×250 мм в окне нижней оптической секции. Свечение в волне регистрировали двумя фотоумножителями. Расстояния между пьезодатчиками равны соответственно 170, 120 и 200 мм. Сигналы с пьезодатчика 1 и фотоумножителя записывали на осциллограф С8-17, с датчика 2 и фотоумножителя — на осциллограф С8-11.

Положение границы между пузырьковым и водяным столбами в момент распространения детонации определяли с помощью 16 тонких гибких световодов, закрепленных с шагом 10 мм на планке из оргстекла. Свет со световодов поступал на отдельный фотоумножитель, сигналы с которого записывали на осциллограф С8-1. Все три осциллографа запускали одновременно пьезодатчиком, расположенным на 30 мм выше датчика 1.

Сигналы с пьезодатчиков 3 и 4, закрепленных непосредственно в стенке трубы, записывали на осциллограф С9-16, запуск которо-

го осуществляли датчиком, расположенным на 40 мм выше пьезодатчика 3. Сигналы с пьезодатчиков 1–4 поступали на осциллографы через истоковый повторитель.

В данной работе наиболее важной технической проблемой является создание качественного объекта исследования — дискретной системы из столбов пузырьковой среды и чистой жидкости. Без успешного решения этой проблемы проведение экспериментов нецелесообразно.

Для создания четкой границы между пузырьковой средой и жидкостью была разработана методика подачи газа в генератор пузырьков с использованием системы из двух электромагнитных клапанов с малым внутренним объемом — впускного и выпускного, синхронизированных по времени. Такая методика обеспечивала постоянную величину газосодержания даже непосредственно на границе пузырьковой среды и исключала поступление остаточных пузырьков газа в столб воды. При использовании одного клапана в момент отсечки газа продолжается поступление остаточного количества газа из генератора пузырьков. Вследствие этого в течение некоторого времени происходит изменение величины газосодержания и наблюдается появление размытой границы между пузырьковой средой и жидкостью.

Продолжительность поступления пузырьков газа в ударную трубу, длину столба пузырьковой среды и промежутка воды между двумя пузырьковыми столбами, а также момент инициирования задавали с помощью часового электромеханического устройства. Для достижения постоянства объемного газосодержания во времени по длине трубы взрывчатый газ в трубу подавали не менее 5 мин.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Объект исследования

Фотоснимки газожидкостной среды, полученные с помощью описанной выше методики в трубе диаметром 35 мм с дополнительно установленной внизу прозрачной секцией из оргстекла, приведены на рис. 1.

На рис. 1,а один пузырьковый столб расположен сверху столба воды, на рис. 1,б представлено два пузырьковых столба с одним разрывом — столбом воды длиной 11 см. Видно, что границы между водой и пузырьковой

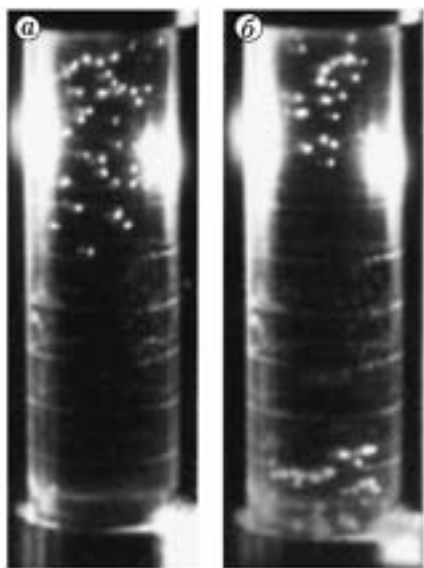


Рис. 1. Фотоснимки дискретной пузырьковой среды в воде:

расстояние между горизонтальными рисками 20 мм; *a* — пузырьковая среда граничит с жидкостью; *б* — пузырьковая среда с пробкой жидкости внутри

средой резкие, в жидкости отсутствуют какие-либо одиночные остаточные пузырьки.

Непрерывная пузырьковая среда

В обычной постановке (в случае заполнения трубы непрерывной пузырьковой средой) после инициирования детонации смеси $C_2H_2 + 2,5O_2$ от верхней границы пузырьковой среды вниз распространяется волна сжатия прямоугольного профиля с пульсациями и пиками давления во фронте (начальная стадия). Свечение и реакция в пузырьках газовой смеси происходят непосредственно во фронте волны. Формирование волны пузырьковой детонации из волны прямоугольного профиля в воде обычно начинается на расстоянии $\approx 2 \div 3$ м от начала пузырьковой среды. Начальная стадия распространения волны и стадия формирования волны пузырьковой детонации подробно исследованы и описаны в работах [1–6].

При $\beta_0 = 2\%$ скорость волны пузырьковой детонации в нижней оптической секции $D_{\text{п}} = (600 \pm 30)$ м/с, равновесная скорость звука $c_0 = (\gamma_0 p_0 / \rho_0 \beta_0)^{0,5} \approx 93$ м/с, где $\rho_0 \approx \rho_{\text{ж}}(1 - \beta_0)$, $\rho_{\text{ж}}$ — плотность жидкости, $\gamma_0 = 1,33$ — показатель адиабаты газа, p_0 — начальное давление в пузырьковой среде. Скорость распростра-

нения U уединенной волны коноидальной формы ($p = \Delta p / ch^2(x_{\text{в}}/l)$) в химически инертной пузырьковой среде выражается зависимостью [8] $U = c_0 \sqrt{1 + (\gamma_0 + 1)\Delta p / 3\gamma_0 p_0}$, где $x_{\text{в}}$ — координата в системе фронта волны, l — полуширина волны, и при амплитуде волны $\Delta p = 7$ МПа, соответствующей амплитуде осредненного давления в волне пузырьковой детонации, $U \approx 535$ м/с. Следовательно, в условиях нашего эксперимента благодаря тепловыделению скорость пузырьковой детонации на $8 \div 18\%$ превышает соответствующую скорость уединенной волны в инертной среде и в 6–7 раз — равновесную скорость звука.

Выход волны детонации из пузырьковой среды в жидкость

Характерные осциллограммы по выходу волны пузырьковой детонации в чистую жидкость представлены на рис. 2. В этом опыте $\beta_0 = 2,5\%$, $D_{\text{п}} = 510$ м/с, $D_{\text{ж}} = 1450$ м/с.

Профиль давления в детонационной волне, представленный на рис. 2, *a, б*, содержит серию хаотических пульсаций, соответствующих отдельным взрывающимся пузырькам. Регистрируемая длительность волны пузырьковой детонации $t_{\text{п}} = 60 \div 70$ мкс, т. е. длина волны $\lambda_{\text{п}} = t_{\text{п}} D \approx 3 \div 3,5$ см. Граница между пузырьковой средой и жидкостью расположена на расстоянии $16 \div 17$ см от датчика 1, т. е. вблизи датчика 2 (ниже датчика 2 находится вода). Поэтому фотоумножитель напротив датчика 2 регистрирует более слабое свечение (рис. 2, *б*, нижний луч) по сравнению с рис. 2, *а* (нижний луч). Пиковая амплитуда давления в волне пузырьковой детонации, регистрируемая датчиками 1 и 2, зависит от случайного положения пузырьков газа вблизи датчиков и составляет в данном опыте соответственно $p_{1,\text{max}} = 12,1$ МПа и $p_{2,\text{max}} = 17,7$ МПа.

Профили волн давления в воде приведены на рис. 2, *в*. Длительность разверток лучей А и Б по 1022 мкс, амплитуда давления треугольной волны сжатия в воде, регистрируемая датчиками 3 и 4, соответственно $p_{3,\text{max}} = 17,4$ МПа и $p_{4,\text{max}} = 16$ МПа.

После выхода в жидкость в волне сжатия сохраняется треугольная форма давления, которая была в пузырьковой среде (см. рис. 2, *в*) амплитуда пульсаций давления в воде заметно уменьшается, скорость волны увеличивается до $D_{\text{ж}} = 1450$ м/с ($D_{\text{ж}} \approx c_{\text{ж}}$). Длительность

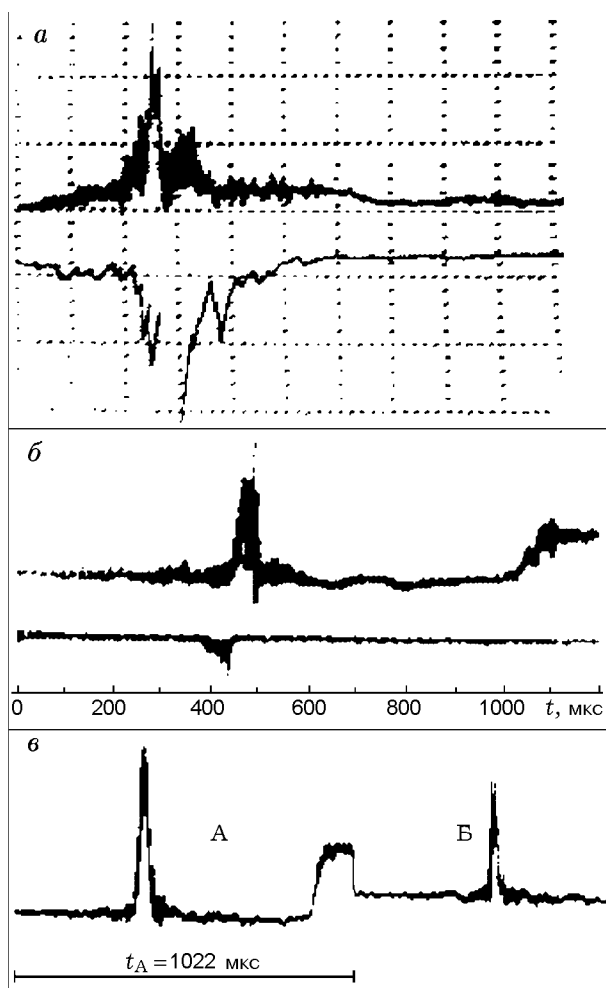


Рис. 2. Осциллограммы давления (а-в) и свечения (а, б, нижний луч) в пузырьковой среде (а) и в воде (б, в), $\beta_0 = 2,5\%$:

а — $p_{1,\max} = 12,1$ МПа — верхний луч, 2 В/дел — нижний луч; 50 мкс/дел;

б — $p_{2,\max} = 17,7$ МПа — верхний луч, 0,5 В/дел — нижний луч;

в — луч А — $p_{3,\max} = 17,4$ МПа, луч Б — $p_{4,\max} = 16$ МПа

волны сжатия в воде не изменяется по мере распространения и составляет $t_{ж} = 72 \div 73$ мкс, чему соответствует длина волны $\lambda_{ж} = t_{ж} D_{ж} \approx 10,5$ см (т. е. по сравнению с первоначальной детонационной волной длина волны в воде возрастает примерно в три раза). Амплитуда давления волны в жидкости на длине 0,2 м уменьшается примерно на 6%. Здесь датчиком 3 зарегистрирована также отставшая от треугольной волны ударная волна прямоугольного профиля (на луче А), из которой сформировалась волна пузырьковой детонации.

Осциллограммы опыта, в котором волна

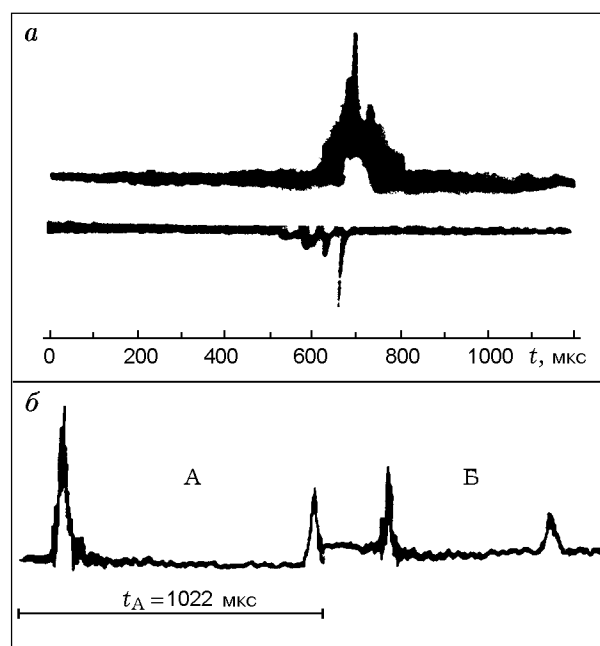


Рис. 3. Осциллограммы давления (а, б) и свечения (а, нижний луч) в пузырьковой среде (а) и в воде (б), $\beta_0 = 2,0\%$:

а — $p_{2,\max} = 21,5$ МПа — верхний луч;

б — луч А — проходящая волна $p_{3,\max} = 17,6$ МПа, отраженная волна $p_{3,\max} = 9,3$ МПа, луч Б — проходящая волна $p_{4,\max} = 15$ МПа, отраженная волна $p_{4,\max} = 9,8$ МПа

прямоугольного профиля значительно отстала от детонационной волны и поэтому не зарегистрирована датчиками, представлены на рис. 3. Датчик 2 регистрирует амплитуду давления при детонации в пузырьковой среде $p_{2,\max} = 21,5$ МПа. В этом опыте $\beta_0 = 2\%$, $D_{п} = 570$ м/с.

После выхода в воду при движении волны сжатия в прямом направлении $p_{3,\max} = 17,6$ МПа, $p_{4,\max} = 15$ МПа (первые волны на лучах А и Б соответственно) и при обратном — после отражения от торца трубы, когда волна проходит последовательно датчики 4 и 3, $p_{4,\max} = 9,8$ МПа, $p_{3,\max} = 9,3$ МПа (вторые волны на лучах Б и А соответственно). Здесь видно, что сохраняется временная протяженность ($t_{ж} = 86$ мкс) волны сжатия в жидкости и треугольная форма волны на длине более 1 м даже после отражения от стенки. Длина волны сжатия в воде $\lambda_{ж} = t_{ж} D_{ж} \approx 12$ см.

Таким образом, при выходе из пузырьковой среды в жидкость скорость волны возрастает, что приводит к увеличению длины волны в 3–4 раза.

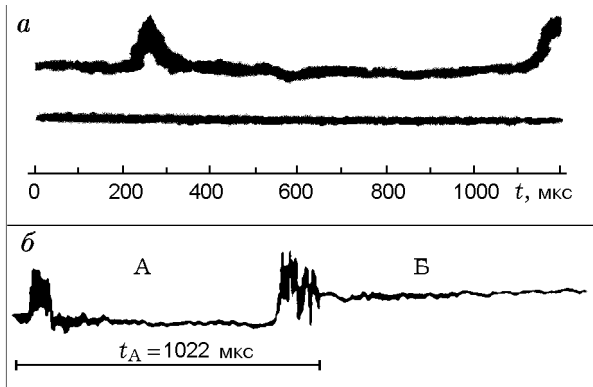


Рис. 4. Осциллограммы давления (*a, б*) и свечения (*a*, нижний луч) в пузырьковой среде с разрывом, $\beta_0 = 2\%$ (случай затухания детонации): *a* — $p_{2,\max} = 6$ МПа — верхний луч; *б* — луч А — $p_{3,\max} = 7,3$ МПа, луч Б — $p_{4,\max} \approx 0$

При движении волны треугольного профиля в жидкости закон затухания амплитуды давления с расстоянием x в данной работе описывается зависимостью

$$p = p_{0,\max} \exp(-\xi x).$$

По результатам осреднения пяти подобных опытов коэффициент затухания $\xi = 0,45 \text{ м}^{-1}$.

Передача детонации через пробку жидкости

В экспериментах с разрывом пузырьковой среды возможность передачи детонации через пробку воды существенно зависит от ее длины. Так, при длине пробки жидкости 22 см пузырьковая детонация не передалась от верхнего столба пузырьковой среды к нижнему (рис. 4, *a, б*) и затухла в сечении пьезодатчика 4 (*б*). Обращает на себя внимание чрезвычайно высокая степень затухания волны сжатия треугольного профиля в пузырьковой среде в случае, если не произошло инициирование пузырьковой детонации.

Причины этого можно выяснить, обратившись к работам [9, 10], где впервые теоретически рассмотрена задача о прохождении высокочастотных возмущений через пузырьковую среду. Проведем частотный анализ для распространения возмущений в наших экспериментах, воспользовавшись дисперсионным соотношением из [9] для пузырьковой среды:

$$\left(\frac{k}{\omega}\right)^2 = \frac{(1 - \beta_0)^2}{c_{\text{ж}}^2} + \frac{3\beta_0(1 - \beta_0)}{R_0^2(\omega_0^2 - \omega^2) - 4i\nu_{\text{ж}}\omega}, \quad (1)$$

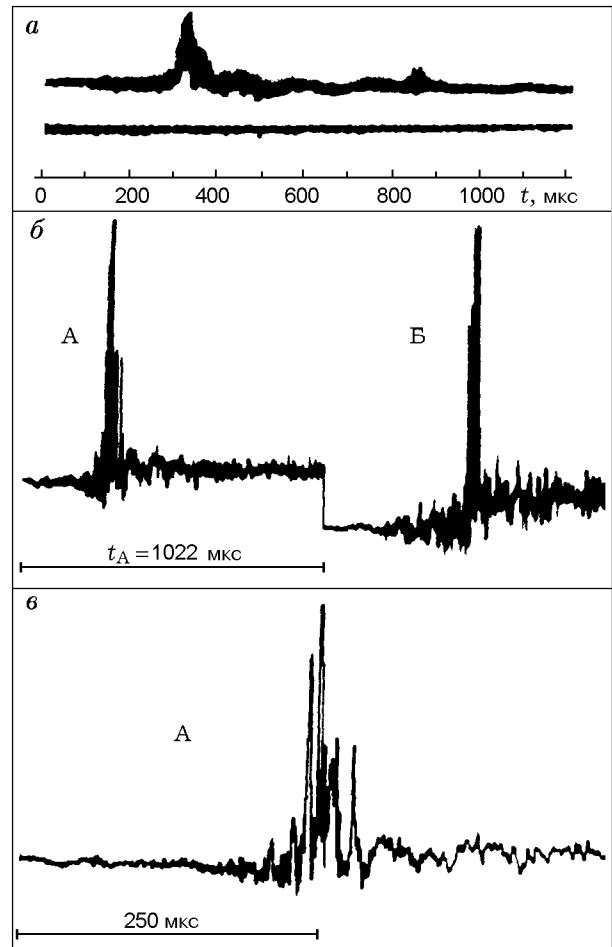


Рис. 5. Осциллограммы давления (*a-в*) и свечения (*a*, нижний луч) в дискретной пузырьковой среде с разрывом, $\beta_0 = 2\%$, $D_{\text{П}} = 610 \text{ м/с}$ (случай передачи детонации):

a — $p_{2,\max} = 9,6$ МПа — верхний луч; *б* — луч А — $p_{3,\max} = 30$ МПа, луч Б — $p_{4,\max} = 39$ МПа; *в* — растяжение луча А в четыре раза

здесь ω — круговая частота, k — волновое число, $\nu_{\text{ж}}$ — кинематическая вязкость жидкости,

$i = \sqrt{-1}$, $\omega_0 = \sqrt{\frac{3p_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}}R_0^2}}$ — собственная частота

колебаний пузырька, $p_{\text{ж}}$ — давление в жидкости, соответствующее осредненному давлению в волне сжатия ($5 \div 7$ МПа). В (1) затуханием возмущений из-за влияния вязкости жидкости можно пренебречь, поскольку безразмерный параметр $\bar{\nu} = \frac{4\nu_{\text{ж}}}{\omega R_0^2} \leq \frac{4\nu_{\text{ж}}}{\omega_0 R_0^2} \leq 10^{-4} \ll 1$.

Тогда в области частот $\omega_0 < \omega < \sqrt{\omega_0^2 + \frac{3\beta_0 c_{\text{ж}}^2}{R_0^2(1 - \beta_0)}}$ величина $(k/\omega)^2 < 0$, т. е. возмущения давления попадают в окно непро-

зрачности и экспоненциально затухают. В частности, возмущения давления с частотой $\omega = 2\pi/\tau$, возбуждаемые волной сжатия длительностью $\tau \approx 70$ мкс, затухают на длине $\lambda \approx 1/k < 10^{-2}$ м. Таким образом, если воспламенение в пузырьковой среде не произошло при входе в нее волны сжатия из пробки жидкости, то эта волна сжатия должна затухнуть уже вблизи границы пузырьковой среды. Энергия волны поглотится пузырьками, период резонансных колебаний которых составляет $T_{\text{п}} = 2\pi/\omega_0 \approx 50 \div 70$ мкс.

Типичные осциллограммы давления в случае передачи детонации через слой жидкости приведены на рис. 5. Здесь амплитуда давления в воде после выхода волны детонации из пузырьковой среды становится равной 9,6 МПа (датчик 2, рис. 5,а). При длине пробки воды 14 см детонация возбудилась в нижнем слое пузырьковой среды и распространялась в нем со скоростью $D_{\text{п}} = 610$ м/с при $\beta_0 = 2\%$ (рис. 5,б,в, здесь в — растянутый в четыре раза по времени луч А (б)). Видно, что профиль давления волны пузырьковой детонации приобретает характерный пульсационный вид, а амплитуда давления, регистрируемая датчиками 3 и 4, достигает соответственно 30 и 39 МПа. По результатам измерений при $\beta_0 = 2\%$ критическая длина водяной пробки, когда детонация передается через нее, составляет $12 \div 15$ см, т. е. порядка длины волны сжатия.

Наличие отраженных волн на границе пузырьковой среды и жидкости из-за различия в $6 \div 7$ раз их акустических импедансов способствует дополнительному (кроме резонансного поглощения энергии пузырьками) ослаблению волны и мешает передаче детонации. Этот вопрос требует специального исследования при варьировании газосодержания и свойств газобразной и жидкой сред.

ВЫВОДЫ

Разработана методика получения дискретной газожидкостной среды с четкими границами между жидкостью и пузырьковой средой. Установлен закон затухания пикового давления после выхода волны пузырьковой детонации из пузырьковой среды в воду. Экспериментально установлена возможность передачи детонации через пробку воды от одного столба пузырьковой химически активной среды (стехиометрической ацетиленокислородной смеси) к другому и определена критическая

длина пробки жидкости. Показано, что в процессе распространения волны сжатия по дискретной газожидкостной среде профиль давления сохраняет свою форму. Основным механизмом быстрого затухания короткой волны сжатия в пузырьковой среде является резонансное поглощение энергии волны пузырьками жидкости.

Автор благодарен В. Т. Кузавову за помощь в подготовке экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сычев А. И., Пинаев А. В. Волна детонации в системах жидкость — пузырьки газа // Первый Всесоюз. симпозиум по макроскопической кинетике и химической газодинамике, Алма-Ата, 1984: Тез. докл., Чернооголовка, 1984. Т. 1, ч. 1, № 65. С. 54–55.
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. Пинаев А. В. Структура детонационных волн в гетерогенных средах // Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Новосибирск: Ин-т гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 1997.
7. Гельфанд Б. Е., Губанов А. В., Тимофеев Е. И. Взаимодействие ударных волн с защитными экранами в жидкости и двухфазной среде // ПМТФ. 1982. № 1. С. 118–123.
8. Накоряков В. Е., Покусаев Б. Г., Шрейбер И. Р. Распространение волн в газо- и парожидкостных средах // Новосибирск: Изд-во Ин-та теплофизики СО АН СССР, 1983.
9. Бэтчелор Г. К. Волны сжатия в суспензии газовых пузырьков в жидкости // Механика: Сб. переводов. 1968. Т. 109, № 3. С. 65–84.
10. Кедринский В. К. Распространение возмущений в жидкости, содержащей пузырьки газа // ПМТФ. 1968. № 4. С. 29–34.

Поступила в редакцию 12/III 2003 г.