

ПЕРЕХОД ВОЛНЫ ПУЗЫРЬКОВОЙ ДЕТОНАЦИИ В ЖИДКОСТЬ

А. И. Сычёв

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

Экспериментально исследован процесс перехода волны детонации из химически активной пузырьковой среды в химически инертную среду — жидкость. Изучена структура и измерены давления в прошедшей и отраженной от торца ударной трубы (постдетонационных) волнах в различных жидкостях. Прослежена эволюция постдетонационных волн, измерены скорости их распространения и определены постоянные затухания. Проведен качественный анализ механизмов диссипации энергии постдетонационных волн в жидкостях.

Химически активные пузырьковые среды — пример физических систем, обладающих потенциальной (внутренней) энергией. Детонационная волна осуществляет процесс высвобождения химической энергии среды. Выделяющаяся энергия, в свою очередь, компенсирует энергетические потери волны детонации и тем самым обеспечивает распространение волны. Если детонационная волна переходит из химически активной в химически неактивную среду, то энергетические потери волны остаются нескомпенсированными. При этом (как следствие диссипативных процессов) волна затухает.

Волновые возмущения, в которые трансформируются детонационные волны при переходе в химически неактивные (инертные) среды, определим как постдетонационные волны.

Постдетонационные волны образуются, в частности, при переходе волны пузырьковой детонации в химически неактивную пузырьковую среду [1] или при отражении волны пузырьковой детонации от твердой границы [2]. Другим примером постдетонационных волн является волна, возникающая при переходе волны пузырьковой детонации в жидкость.

Цель настоящей работы — изучение процесса перехода волны детонации из химически активной пузырьковой среды в химически инертную жидкость.

Экспериментально исследован процесс перехода детонационной волны из химически активной пузырьковой среды типа I [3] — «химически инертная жидкость — пузырьки взрывчатого газа» — в химически неактивную среду — инертную жидкость. Жидкость — водо-

глицериновые растворы с объемной концентрацией глицерина $\alpha = 0, 0,25$ и $0,5$ (вязкость растворов $\mu = 1,01 \cdot 10^{-3}$, $2,27 \cdot 10^{-3}$ и $6,84 \cdot 10^{-3}$ Па·с соответственно); газ — ацетиленокислородная стехиометрическая смесь $C_2H_2 + 2,5O_2$.

Опыты проведены в вертикально расположенной ударной трубе высотой 4,3 м с внутренним диаметром 40 мм [4], состоящей из секций

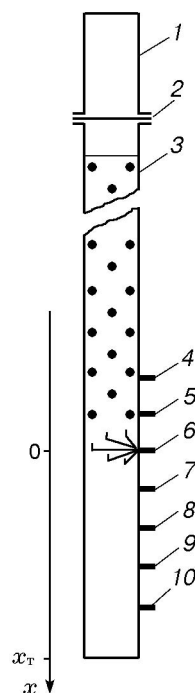


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки:

1 — секция высокого давления, 3 — секция низкого давления, 2 — разрывная диафрагма, 6 — капилляры, 4, 5, 7-10 — пьезоэлектрические датчики давления

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 01-03-32351).

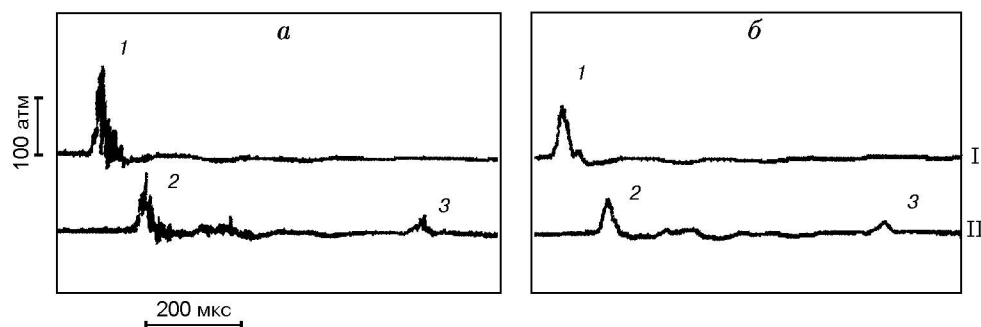


Рис. 2. Осциллограммы давления детонационной (1), прошедшей (2) и отраженной от торца ударной трубы (3) волн:

a — до осреднения, b — после осреднения пульсаций давления; $\alpha = 0,25$, $\beta_0 = 1/4$ %; x , м: I — $-0,070$, II — $0,060$

высокого и низкого давления с разрывной диафрагмой между ними (рис. 1). Секция низкого давления содержала жидкость и пузырьковую среду. Пузырьки диаметром $(2,5 \pm 0,1)$ мм генерировались при прохождении газа через систему капилляров, вводимых в жидкость перпендикулярно стенке ударной трубы. Концентрацию газовой фазы пузырьковой среды изменяли в диапазоне $1/4 \leq \beta_0 \leq 4$ %. Высота столба жидкости и пузырьковой среды составляла 3,6 м. Давление на поверхности пузырьковой среды было равно атмосферному.

Детонационные волны инициировали ударными волнами, генерируемыми в пузырьковой среде при сжигании ацетиленокислородной стехиометрической смеси в секции высокого давления [5]. Интенсивность инициирующих ударных волн варьировали изменением начального давления взрывчатой газовой смеси. В исследованных пузырьковых средах критическая амплитуда инициирующих ударных волн $P_1^* = 17 \div 34$ атм.

Детонационная волна, переходя границу раздела химически активной пузырьковой среды и инертной жидкости, трансформируется (рис. 2). При этом образуется прошедшая волна, распространяющаяся в жидкости. Отраженной от границы раздела сред волны, которая распространялась бы в пузырьковой среде, не наблюдается.

Параметры падающей (детонационной) и прошедшей (постдетонационной) волн на различных расстояниях x от границы раздела «пузырьковая среда — жидкость» измеряли пьезоэлектрическими датчиками давления (см. рис. 1), сигналы которых регистрировали двумя осциллографами С9-16.

Постдетонационная волна (как и волна детонации) имеет пульсационный профиль давления (см. рис. 2). Амплитуда пульсаций давления, имеющих «пилообразную» форму, достигает $150 \div 300$ атм. Длительность пульсаций давления равна $4 \div 6$ мкс. На рис. 2 зафиксирована также постдетонационная волна, отраженная от торца ударной трубы (расстояние от границы раздела сред до отражающей поверхности $x_T = 0,54$ м). По мере распространения постдетонационных волн (прошедшей и отраженной) амплитуда пульсаций давления уменьшается. Таким образом, постдетонационная волна представляет собой совокупность волн «пилообразной» формы.

Осреднение пульсаций давления позволяет получить эффективный профиль давления детонационной и постдетонационных волн. Волна пузырьковой детонации, прошедшая и отраженная волны с осредненными пульсациями давления — это уединенные волны, давление за которыми релаксирует к величине, близкой к давлению перед волной (см. рис. 2). Сигналы датчиков давления осреднялись с использованием штатной процедуры осциллографа С9-16 по 10 точкам при временном интервале между точками (времени дискретизации) 1 мкс.

Для описания детонационной и постдетонационных волн определим амплитуду (давление) волн как осредненное по пульсациям давление в максимуме (P_1 , P_2 и P_3 для детонационной, прошедшей и отраженной от торца ударной трубы волн соответственно).

На рис. 3 прослежен процесс эволюции постдетонационной волны после прохождения волны детонации через границу раздела сред (на осциллограммах приведены осредненные

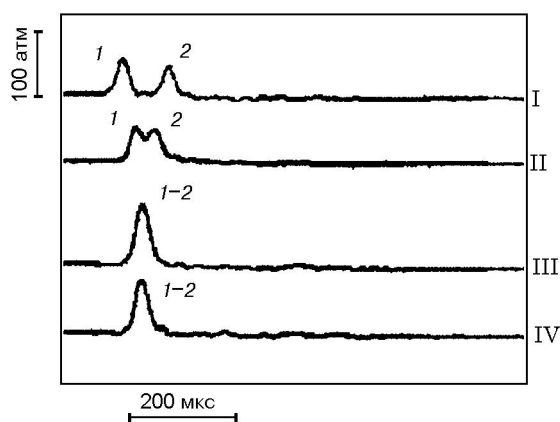


Рис. 3. Осредненные осциллограммы давлений P_2 (1), P_3 (2) и P_{2-3} (1-2):

$\alpha = 0,5, \beta_0 = 1/4 \%$; x , м: I — 0,270, II — 0,310, III — 0,330, IV — 0,336; $x_T = 0,336$ м

сигналы датчиков давления, полученные в одном опыте): по мере распространения прошедшей волны ее давление уменьшается. Здесь же зафиксирован процесс трансформации прошедшей волны в отраженную волну: при взаимодействии прошедшей волны с отражающей твердой поверхностью (торцом ударной трубы) происходит наложение прошедшей и отраженной волн. Давление волны, образующейся в результате суперпозиции прошедшей и отраженных волн (P_{2-3}), примерно в два раза больше давления прошедшей волны P_2 : $P_{2-3} = (2,0 \pm 0,1)P_2$. Далее наблюдается временное разделение прошедшей и отраженных волн. При этом вблизи торца ударной трубы давление отраженной волны равно давлению прошедшей волны до взаимодействия с отражающей поверхностью — в определенном смысле постдетонационная волна ведет себя как частица. Таким образом, при переходе волны детонации через границу раздела «пузырьковая среда — жидкость» образуется постдетонационная прошедшая волна, давление которой уменьшается по мере распространения; взаимодействие прошедшей волны с отражающей поверхностью носит характер упругого удара.

Результаты измерений осредненного по пульсациям давления постдетонационных прошедших P_2 и отраженных P_3 волн представлены на рис. 4 в виде логарифмической зависимости отношения P_j/P_1 от расстояния x (P_j — давление прошедшей волны при $j = 2$ либо давление отраженной волны при $j = 3$; каждая точка — среднее $10 \div 15$ измерений). Характер

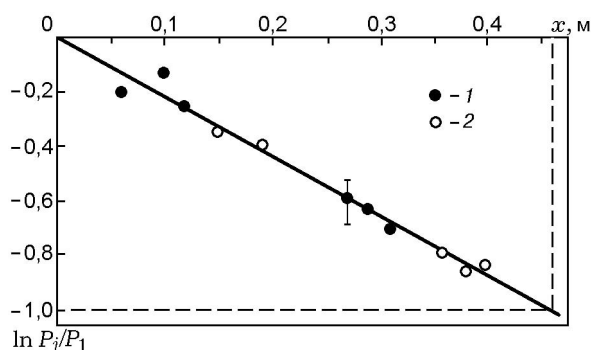


Рис. 4. Зависимость $\ln(P_j/P_1)(x)$:

$\alpha = 0,5, \beta_0 = 1/4 \%$; 1 — прошедшая волна ($j = 2$), 2 — отраженная от торца ударной трубы волна ($j = 3$)

приведенной зависимости (это прямая, проходящая через начало координат) свидетельствует о том, что коэффициент пропускания границы раздела «пузырьковая среда — жидкость» для волны детонации равен единице, а коэффициент отражения — нулю (см. рис. 2).

Таким образом, зависимость относительного давления постдетонационных волн (как прошедшей, так и отраженной от торца ударной трубы) от расстояния от границы раздела сред выражается соотношением $P_j/P_1 = \exp(-k \cdot x)$, где k — постоянная затухания (коэффициент ослабления) постдетонационных волн ($P_1 = 150$ атм при $\alpha = 0,5$ и $\beta_0 = 1/4 \%$ [2]).

Анализ данных рис. 4 показывает, что отраженная от торца ударной трубы волна суть прошедшая волна: при взаимодействии с твердой границей прошедшая волна исчезает и появляется отраженная волна, идентичная исчезнувшей; при дальнейшем распространении параметры отраженной волны изменяются с расстоянием по закону, установленному для прошедшей волны. (Далее не делается различия между прошедшей и отраженной от торца ударной трубы волнами и под расстоянием пробега постдетонационной волны понимается суммарное расстояние, пройденное прошедшей волной до торца ударной трубы и затем отраженной волной.)

В системах с $\alpha = 0; 0,25$ и $0,5$ коэффициент ослабления постдетонационных волн k равен $(0,9 \pm 0,2)$, $(1,2 \pm 0,3)$ и $(2,1 \pm 0,4)$ м^{-1} соответственно, а скорость распространения постдетонационных волн равна (1370 ± 50) , (1480 ± 50) и (1550 ± 50) м/с и практически совпадает

со скоростью звука в жидкости ((1380 ± 50), (1470 ± 50) и (1580 ± 50) м/с в системах с $\alpha = 0, 0,25$ и $0,5$ соответственно). Скорость звука в исследованных жидкостях определялась по скорости распространения слабых ударных волн (измерения проведены при $T = 15$ °С).

Полученные значения скорости звука в жидкостях несколько ниже приводимых в справочниках. Так, согласно [6] скорость звука в дистиллированной воде равна 1467,5 м/с (при $T = 15$ °С). Различие данных обусловлено проявлением следующих обстоятельств. Распространение детонационных [7, 4], постдетонационных и ударных волн сопровождается образованием кавитационных пузырьков диаметром < 0,5 мм (при вакуумировании ударной трубы после опыта кавитационные пузырьки в жидкости наблюдаются визуально). После откачки ударной трубы в течение 10 ÷ 15 мин некоторое количество мелких пузырьков может остаться в жидкости. Присутствие в жидкости даже незначительного числа пузырьков газа заметно снижает скорость распространения звуковых волн. Помимо этого, в исследуемых жидкостях можно наблюдать твердые частицы во взвешенном состоянии, образующиеся при воспламенении пузырьков газа в волне детонации (частицы сажи). Присутствие в жидкости твердых частиц также снижает скорость звука [8].

Коэффициент ослабления и скорость распространения постдетонационных волн определяются свойствами жидкости (в частности, вязкостью) и не зависят от параметров самих постдетонационных волн (характеристики постдетонационных волн, задаваемые детонационными волнами, параметры которых, в свою очередь, зависят от свойств пузырьковых сред, изменялись в широком диапазоне — концентрация газовой фазы пузырьковых сред варьировалась в диапазоне $1/8 \leq \beta_0 \leq 4$ %).

Длительность прошедшей волны τ_2 (временная характеристика, определяемая на нулевом уровне осредненного сигнала датчика давления: τ_1 , τ_2 и τ_3 для детонационной, прошедшей и отраженной от торца ударной трубы волн соответственно) равна длительности детонационной волны ($\tau_1 = (70 \pm 20)$ мкс) вблизи границы раздела сред и незначительно уменьшается по мере дальнейшего распространения волны (см. рис. 2): $\tau_j = (50 \pm 10)$ мкс при $x = 0,96$ м (τ_j — длительность прошедшей волны при $j = 2$ либо длительность отражен-

ной волны при $j = 3$). Таким образом, линейная протяженность (длина) прошедших волн, определяемая длительностью волны τ_2 и скоростью ее распространения D_2 , $\lambda_2 = D_2 \cdot \tau_2$, равна ≈ 10 см вблизи границы раздела сред и слабо уменьшается по мере распространения волны.

Затухание постдетонационных волн обусловлено диссипативными процессами. Зависимость коэффициента ослабления постдетонационных волн от вязкости жидкости указывает на присутствие «вязкостной» диссипации энергии. Помимо этого, присутствие в жидкости кавитационных пузырьков и взвешенных твердых частиц также увеличивает затухание волн [8].

Заметим, что коэффициент ослабления постдетонационных волн в жидкостях существенно меньше, чем в пузырьковых средах [1, 2], т. е. диссипация энергии постдетонационных волн в пузырьковых средах в значительной степени обусловлена присутствием в жидкости пузырьков газа.

Важно отметить особые свойства постдетонационных волн, отличающие их от известных волновых возмущений, например от солитона. Солитон — уединенная волна, существующая при условии баланса дисперсионных и нелинейных свойств среды. Скорость распространения солитона тем ниже, чем меньше его амплитуда. Действие диссипативных процессов приводит к тому, что амплитуда солитона и, следовательно, его скорость по мере распространения уменьшаются.

Постдетонационная волна — диссипативная уединенная волна с пульсационным профилем давления. В то время как энергетические потери волны детонации компенсируются энергией, выделяющейся в среде при ее распространении, в постдетонационной волне энергопотери остаются нескомпенсированными и, как следствие диссипативных процессов, амплитуда волны уменьшается. При этом постдетонационные волны, образующиеся при переходе пузырьков детонации в химически неактивную пузырьковую среду [1] и при отражении детонационной волны от твердой границы [2] или возникающие при переходе волны пузырьков детонации в инертную жидкость, распространяются с постоянными скоростями, не зависящими от их амплитуд.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования процесса перехода дето-

национных волн из химически активной пузырьковой среды в химически инертную жидкость показали, что постдетонационные (прошедшая и отраженная от торца ударной трубы) волны (как и волна детонации) имеют пульсационный профиль давления. Волна пузырьковой детонации и постдетонационные волны с осредненными пульсациями давления — это уединенные волны. Давление постдетонационных волн по мере их распространения уменьшается и описывается экспоненциальной зависимостью. Давление за постдетонационными волнами, так же как и за волной пузырьковой детонации, релаксирует к значению, близкому к начальному. Постоянная затухания (коэффициент ослабления) постдетонационных волн возрастает при увеличении вязкости жидкости. Скорость распространения постдетонационных волн равна скорости звука в жидкости. Длительность и линейная протяженность постдетонационных волн незначительно уменьшаются по мере распространения волны. Затухание постдетонационных волн (уменьшение давления) обусловлено наличием диссипативных процессов.

Изученный процесс перехода детонационной волны из пузырьковой среды в жидкость

может быть использован как способ создания в жидкости волновых возмущений с изменяемыми параметрами.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Сычев А. И.** Переход волны пузырьковой детонации в химически неактивную пузырьковую среду // Физика горения и взрыва. 2001. Т. 37, № 4. С. 96–99.
2. **Сычев А. И.** Отражение волны пузырьковой детонации от твердой границы // Физика горения и взрыва. 2000. Т. 36, № 3. С. 107–113.
3. **Сычев А. И.** Воспламенение систем жидкость — пузырьки газа ударной волной // Физика горения и взрыва. 1985. Т. 21, № 2. С. 130–134.
4. **Сычев А. И.** Детонационные волны в многокомпонентных пузырьковых средах // Физика горения и взрыва. 1993. Т. 29, № 1. С. 110–117.
5. **Сычев А. И.** Волна детонации в системе жидкость — пузырьки газа // Физика горения и взрыва. 1985. Т. 21, № 3. С. 103–110.
6. **Эберт Г.** Краткий справочник по физике. М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1963.
7. **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.
8. **Бражников Н. И.** Ультразвуковые методы. М.: Энергия, 1965.

*Поступила в редакцию 6/IV 2001 г.,
в окончательном варианте — 26/VI 2001 г.*