

03;05;12

Трансформация детонационных волн на границе раздела пузырьковых сред

© А.И. Сычев

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия
e-mail: sychev@hydro.nsc.ru

(Поступило в Редакцию 4 августа 2010 г.)

Экспериментально исследован процесс перехода детонационных волн через границу раздела пузырьковых сред. Получены данные о структуре, скорости распространения и давлении падающей и прошедшей границу раздела сред детонационных волн.

Введение

Детонация в пузырьковых средах обладает общими для всех детонационных волн признаками: так же как и детонация в газовых, жидких, твердых и гетерогенных средах, это самоподдерживающийся автоволновый процесс [1]. Характеристики детонационных волн не зависят от условий инициирования и определяются свойствами среды [2–4]. При переходе из одной пузырьковой среды в пузырьковую среду с другими свойствами детонационная волна трансформируется — образуются волны, являющиеся результатом взаимодействия волны детонации с границей раздела сред. Образовавшиеся волны эволюционируют далее в соответствии с изменившимися параметрами сред.

Цель настоящей работы — изучение процесса трансформации детонационных волн на границе раздела пузырьковых сред.

Экспериментальная установка

Экспериментальные исследования детонационных волн в пузырьковых средах проведены в вертикально расположенной ударной трубе с внутренним диаметром 40 мм и высотой 4.3 м, состоящей из секций высокого и низкого давления с разрывной диафрагмой между ними. Секция низкого давления ударной трубы заполнялась жидкостью, в которой пузырьки диаметром 2.5 ± 0.1 мм генерировались при прохождении газа через две независимые системы капилляров, вводимых в жидкость перпендикулярно стенке ударной трубы и через торец ударной трубы. Объемную концентрацию газовой фазы пузырьковых сред изменяли в диапазоне от 1/8 до 6%. Высота столба газожидкостной среды составляла 3.55 м. Давление на поверхности пузырьковой среды было равно атмосферному. Опыты проведены при температуре 290 К.

Инициирование детонации в пузырьковых средах осуществляли ударными волнами. Ударные волны в пузырьковой среде генерировали сжиганием ацетилено-кислородной стехиометрической газовой смеси ($C_2H_2 + 2.5O_2$) в секции высокого давления ударной трубы [5]. Амплитуду (давление) ударных волн

варьировали изменением начального давления газовой смеси $C_2H_2 + 2.5O_2$ (при этом амплитуда ударных волн соответствует давлению, которое развивается над поверхностью пузырьковой среды при сгорании газа в замкнутом объеме секции высокого давления ударной трубы [1]).

Параметры (скорость распространения и давление) детонационных волн определяли пьезоэлектрическими датчиками давления, установленными по длине ударной трубы по обе стороны границы раздела пузырьковых сред. Датчики давления тарировали ударными и детонационными волнами в газах. Свечение пузырьковой среды, сопровождающее процесс распространения детонационных волн, фиксировали фотоэлектронным умножителем ФЭУ-102, оптический ввод которого располагали диаметрально противоположно датчику давления. Сигналы датчиков давления и фотоэлектронного умножителя регистрировали осциллографами ОК-33М и С9-16.

Изучены следующие пузырьковые системы:

— „однокомпонентные пузырьковые среды“: $J(\alpha) - \beta_0(C_2H_2 + 2.5O_2)$;

— „многокомпонентные пузырьковые среды“: $J(\alpha) - [\beta_1(C_2H_2 + 2.5O_2) - \beta_2N_2(Ar, He, H_2)]$;

— „однокомпонентная пузырьковая среда I—однокомпонентная пузырьковая среда II“: $\{J(\alpha) - \beta_{01}(C_2H_2 + 2.5O_2)\} - \{J(\alpha) - \beta_{02}(C_2H_2 + 2.5O_2)\}$;

— „многокомпонентная пузырьковая среда—однокомпонентная пузырьковая среда“: $\{J(\alpha) - [\beta_1(C_2H_2 + 2.5O_2) - \beta_2N_2]\} - \{J(\alpha) - \beta_0(C_2H_2 + 2.5O_2)\}$;

— „многокомпонентная пузырьковая среда—однокомпонентная инертная пузырьковая среда“: $\{J(\alpha) - [\beta_1(C_2H_2 + 2.5O_2) - \beta_2N_2]\} - \{J(\alpha) - \beta_0N_2\}$.

Здесь $J(\alpha)$ — водно-глицериновые растворы с объемной концентрацией глицерина $\alpha = 0, 0.25$ или 0.5 (вязкость растворов равна $1.01 \cdot 10^{-3}$, $2.27 \cdot 10^{-3}$ и $6.84 \cdot 10^{-3}$ Па·с соответственно); ($C_2H_2 + 2.5O_2$) и N_2, Ar, He или H_2 — пузырьки химически активного газа (ацетилено-кислородная стехиометрическая смесь) и химически неактивного газа (азот, аргон, гелий или водород). Однокомпонентные пузырьковые среды характеризуются объемной концентрацией газовой фазы β_0 или β_{01} и β_{02} ; многокомпонентные пузырьковые сре-

ды характеризуются объемной концентрацией активного и неактивного газа β_1 и β_2 соответственно (при этом общая концентрация газовой фазы среды равна $\beta_{12} = \beta_1 + \beta_2$).

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Критическая амплитуда ударной волны P_1^* , инициирующей детонацию в однокомпонентных пузырьковых средах, возрастает при увеличении концентрации газовой фазы и при уменьшении вязкости жидкого компонента среды. В исследованных пузырьковых средах при $\beta_0 \leq 6\%$ $P_1^* = 1.7\text{--}6$ МПа.

Значения критической амплитуды инициирующей ударной волны P_1^* в многокомпонентных средах зависят как от общей концентрации газовой фазы среды, так и от соотношения концентраций активных и неактивных пузырьков. Так, в системе Ж(0.25)– $[\beta_1(\text{C}_2\text{H}_2 + 2.5\text{O}_2) + \beta_2\text{Ar}]$ при $\beta_2 \leq 1\%$ $P_1^* \leq 1.7$ МПа ($\beta_{12} \leq 4\%$) и $P_1^* \approx 3.4$ МПа ($\beta_{12} = 6\%$); при $\beta_2 = 2\%$ $P_1^* \approx 3.4$ МПа ($\beta_{12} = 4\%$) и $P_1^* \approx 4.3$ МПа ($\beta_{12} = 6\%$). Значения P_1^* повышаются при увеличении β_{12} или β_2 .

Детонация в пузырьковых средах — стационарный процесс: скорость распространения детонационных волн на различных расстояниях от поверхности пузырьково-вой среды имеет практически совпадающие значения (скорость волн измеряли на участках ударной трубы с базами от 60 до 600 мм).

Структура волн „пузырьковой“ детонации в одно- и многокомпонентных средах качественно идентична: детонационные волны имеют пульсационный профиль давления (см. рис. 1). Пульсации давления в детонационных волнах являются следствием излучения пузырьками газа ударных волн. Стохастичность пульсаций давления обусловлена хаотичностью распределения пузырьков газа в жидкости. Регистрируемая амплитуда пульсаций давления, длительность которых составляет 3–5 μs , достигает 15–30 МПа.

Осреднение пульсаций давления позволяет получить эффективный профиль давления детонационных волн. Сигналы датчиков давления осреднялись с использованием штатной процедуры цифрового осциллографа С9-16 по 10 точкам при временном интервале между точками (времени дискретизации), равном 1 μs . Детонационные волны с осредненными пульсациями давления — это уединенные волны, давление за которыми релаксирует к величине, близкой к давлению перед волной. Эффективное (осредненное по пульсациям) давление детонационных волн в одно- и многокомпонентных средах составляет 6–8 МПа. Длительность детонационных волн (временная характеристика, определяемая на нулевом уровне осредненного по пульсациям сигнала датчика давления), равна 50–70 μs .

На рис. 2 представлены результаты измерения скорости D детонационных волн в однокомпонентных средах при различных значениях концентрации газовой фазы

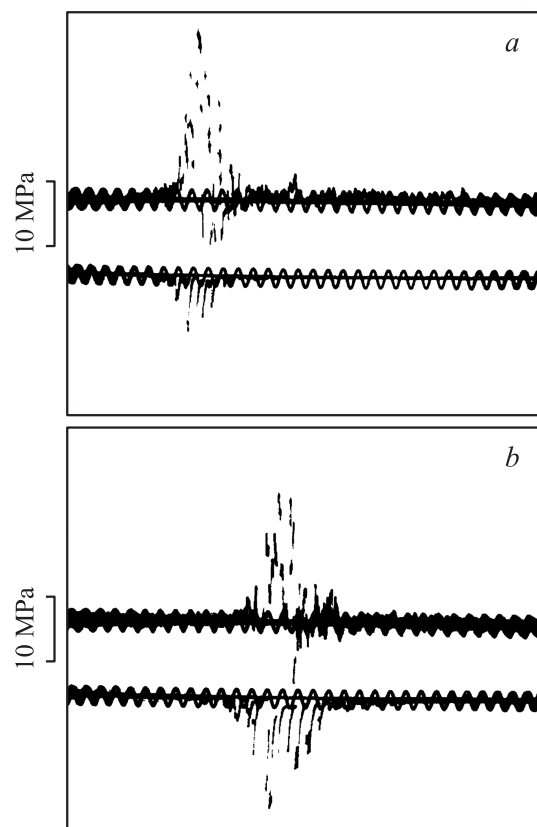


Рис. 1. Осциллограммы давления волн детонации (верхний луч) и свечения пузырьково-вой среды (нижний луч) в одно- и многокомпонентных средах: a — Ж(0.5)– $(\text{C}_2\text{H}_2 + 2.5\text{O}_2)$, $\beta_0 = 1/2\%$; b — Ж(0.5)– $[\beta_1(\text{C}_2\text{H}_2 + 2.5\text{O}_2) + \beta_2\text{Ar}]$, $\beta_1 = 1/2\%$, $\beta_2 = 1/2\%$; период синусоиды $T = 10 \mu\text{s}$.

среды β_0 (каждая точка — среднее данных 5–10 опытов). Характер зависимостей $D(\beta_0)$ во всех средах является общим: с увеличением концентрации газовой фазы пузырьково-вой среды β_0 скорость волн детонации D сни-

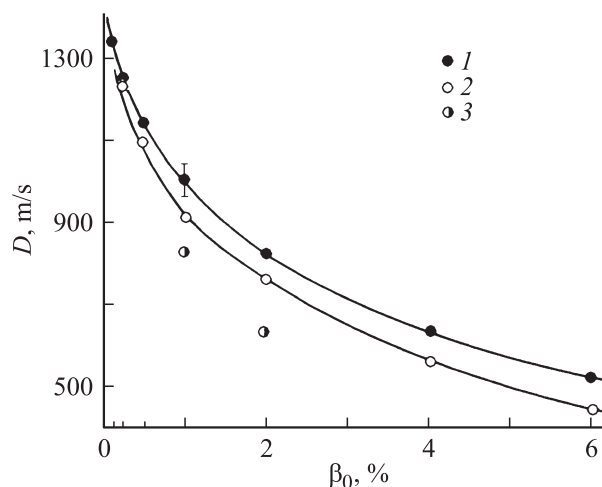


Рис. 2. Зависимости скорости волны детонации $D(\beta_0)$ в однокомпонентных средах. Ж(α)– $\beta_0(\text{C}_2\text{H}_2 + 2.5\text{O}_2)$; $\alpha = 0.5$ (1), 0.25 (2) и 0 (3).

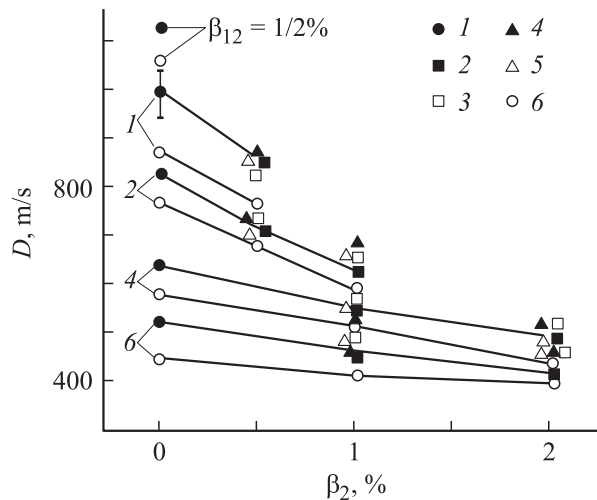


Рис. 3. Зависимости скорости волны детонации $D(\beta_2)$ в многокомпонентных средах. 1 — Ж(0.5)– β_0 ($C_2H_2 + 2.5O_2$), 2–5 — Ж(0.5) – $[\beta_1(C_2H_2 + 2.5O_2) + \beta_2Ar(He, N_2, H_2)]$ (2 — Ar, 3 — He, 4 — N_2 , 5 — H_2); 6 — Ж(0.25) – $[\beta_1(C_2H_2 + 2.5O_2) + \beta_2Ar]$.

жается. С уменьшением вязкости жидкого компонента системы скорость детонационных волн падает.

На рис. 3 приведены результаты измерения скорости детонационных волн, распространяющихся в различных многокомпонентных пузырьковых средах (каждая точка — среднее данных 5–10 опытов). Экспериментальные данные представлены в виде зависимостей скорости волны детонации D от концентрации газового компонента β_2 пузырьковой среды, при этом общая концентрация газовых компонентов $\beta_{12} = \beta_1 + \beta_2$ служит параметром (зависимость $D(\beta_2)$ получены при различных значениях $\beta_{12} = \beta_1 + \beta_2 = \text{const}$). Наличие в системе пузырьков неактивного газа приводит к снижению скорости распространения волны детонации. Данное обстоятельство является следствием взаимодействия пузырьков неактивного газа с детонационной волной, в результате которого увеличиваются энергетические потери волны детонации.

Таким образом, присутствие в системе пузырьков неактивного газа обуславливает дополнительные к имеющимся потери энергии волной детонации. Действие этого фактора существенно: при концентрации пузырьков неактивного газа $\beta_2 > 0.5\beta_{12}$ детонационные волны отсутствуют.

Детонация в многокомпонентных средах, содержащих пузырьки инертного газа, может быть охарактеризована как „пузырьковая детонация с потерями“ [6].

Не установлено существенного влияния сорта газа инертного газового компонента пузырьковой среды на параметры волны детонации. Различия в физических свойствах газов не сказывается заметным образом на скорости распространения детонационной волны.

Значительно более существенно действие жидкого компонента пузырьковых сред: скорость волн детонации существенно выше в системах с более вязкой

жидкостью. Таким образом, параметры детонационных волн в значительной степени определяются свойствами жидкого компонента пузырьковой среды.

Существенная зависимость критических условий инициирования и скорости распространения волн „пузырьковой“ детонации от вязкости жидкого компонента пузырьковых сред (эффект „вязкости“ [13]) обусловлена влиянием вязкости жидкости на процесс сжатия пузырьков газа в волне детонации, а именно на состояние поверхности пузырьков в процессе сжатия — с увеличением вязкости жидкости поверхность пузырьков газа становится более стабильной [7–9], и энергопотери пузырьков уменьшаются.

На рис. 4 приведены осциллограммы датчиков давления, иллюстрирующие процесс перехода детонационной волны через границу раздела „многокомпонентная пузырьковая среда–однокомпонентная пузырьковая среда“. При переходе границы раздела сред детонационная волна трансформируется: падающая волна детонации распадается на две волны — детонационную волну и

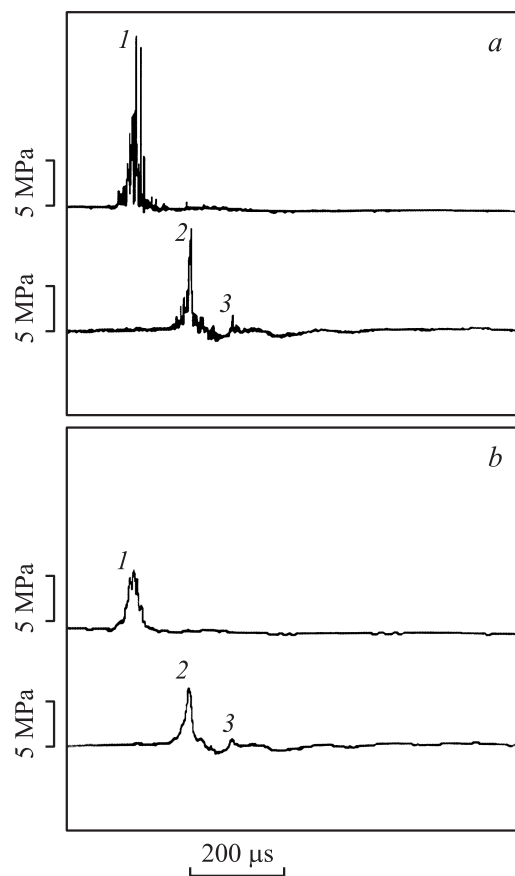


Рис. 4. Осциллограммы давления волн в системе $\{Ж(0.5) - [\beta_1(C_2H_2 + 2.5O_2) - \beta_2N_2]\} - \{Ж(0.5) - \beta_0(C_2H_2 + 2.5O_2)\}$. 1 — волна детонации в многокомпонентной среде Ж(0.5) – $[\beta_1(C_2H_2 + 2.5O_2) - \beta_2N_2]$: $\beta_1 = 1/4\%$, $\beta_2 = 1/4\%$ (расстояние до границы раздела сред 60 mm); 2 — волна детонации в однокомпонентной среде Ж(0.5) – $\beta_0(C_2H_2 + 2.5O_2)$: $\beta_0 = 1/4\%$ (расстояние от границы раздела сред 70 mm); 3 — волна-спутник; а — до осреднения пульсаций давления, б — после осреднения пульсаций давления.

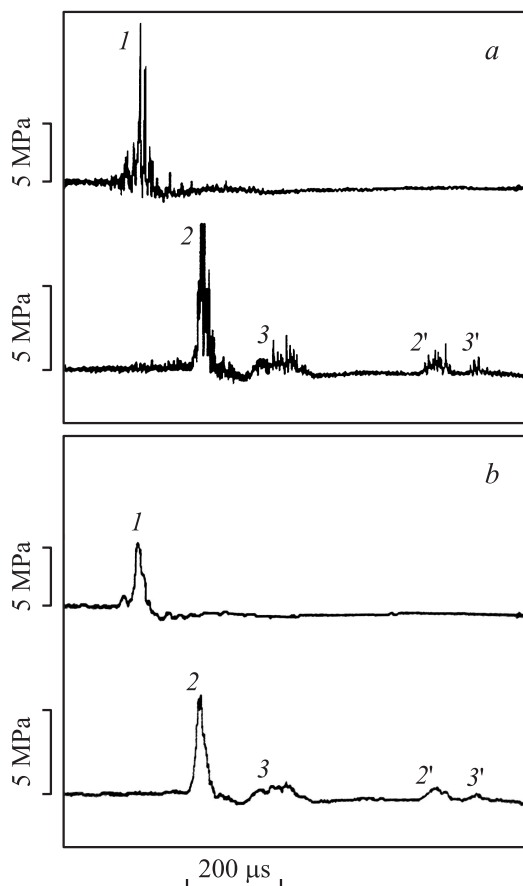


Рис. 5. Осциллограммы давления волн в системе $\{Ж(0.5) - \beta_{01}(C_2H_2 + 2.5O_2)\} - \{Ж(0.5) - \beta_{02}(C_2H_2 + 2.5O_2)\}$: 1 — волна детонации в однокомпонентной среде $Ж(0.5) - \beta_{01}(C_2H_2 + 2.5O_2)$: $\beta_{01} = 3\%$ (расстояние до границы раздела сред 70 мм); 2 — волна детонации в однокомпонентной среде $Ж(0.5) - \beta_{02}(C_2H_2 + 2.5O_2)$: $\beta_{02} = 1.8\%$ (расстояние от границы раздела сред 60 мм); 3 — волна-сателлит; 2' и 3' — отраженные волны 2 и 3; *a* — до осреднения пульсаций давления, *b* — после осреднения пульсаций давления.

волну-сателлит, затухающую по мере распространения. Отраженной от границы раздела сред волны не наблюдается.

Распад падающей на границу раздела сред детонационной волны является следствием автоволнового характера волн детонации: параметры детонационных волн определяются свойствами среды. Изменение параметров пузырьковых сред на границе раздела приводит к трансформации детонационной волны. Эволюция прошедшей детонационной волны протекает чрезвычайно быстро: на расстоянии пробега ≤ 60 мм волна детонации достигает скорости распространения и длительности детонационной волны в однородной пузырьковой среде.

Отметим, что двухволновый (распадный) комплекс можно наблюдать только в пузырьковых средах, обладающих малой ($\leq 1/4\%$) концентрацией газовой фазы; при большем газосодержании сред волна-сателлит затухает на расстояниях, меньших 60 мм.

Амплитуда волны-сателлита возрастает с увеличением перепада концентраций газовой фазы на границе раздела пузырьковых сред. Так, например, при переходе детонационной волны через границу раздела однокомпонентных сред с существенно различающимися значениями концентрации газовой фазы наблюдается волна-сателлит, обладающая большей амплитудой (см. рис. 5, здесь можно также наблюдать отраженные от торца ударной трубы волны — постдетонационную волну и отраженную волну-сателлит, распространяющиеся со скоростями, несколько меньшими скорости прошедшей детонационной волны).

При переходе детонационной волны из многокомпонентной среды в однокомпонентную среду в силу того обстоятельства, что детонационные волны в многокомпонентных средах существуют лишь при концентрации неактивных пузырьков $\beta_2 \leq 0.5\beta_{12}$, невозможно достичь значительного перепада концентраций газовых фаз на границе раздела многокомпонентной и однокомпонентной сред, поэтому волна-сателлит, образующаяся в процессе распада детонационной волны, имеет существенно меньшую амплитуду, чем в случае распада волны детонации на границе раздела однокомпонентных пузырьковых сред (см. рис. 4 и 5).

Отсутствие отраженной от границы раздела сред волны является следствием природы „пузырьковой“ детонации: детонационная волна в пузырьковых средах представляет собой совокупность акустических волн малой длительности (пульсаций давления), распространяющихся в жидкости. Такие волны не „чувствуют“ границы раздела пузырьковых сред.

На рис. 6 представлены осциллограммы датчиков давления, иллюстрирующие процесс перехода детонационной волны через границу раздела „химически активная многокомпонентная пузырьковая среда–химически неактивная однокомпонентная пузырьковая среда“. При переходе границы раздела сред детонационная волна распадается в химически неактивной пузырьковой среде на постдетонационную волну и волну-сателлит. Постдетонационная волна и волна-сателлит распространяется с примерно равными скоростями: в данном случае 780 и 760 м/с соответственно. Амплитуда волн с расстоянием пробега x уменьшается по экспоненциальному закону: $\Delta P_j / \Delta P_1 = \exp(-kx)$ (здесь $\Delta P_1 = P_1 - P_0$, P_0 — начальное давление пузырьковой среды, P_1 — давление детонационной волны; $\Delta P_j = P_j - P_0$, P_j — давление постдетонационной волны, $j = 2$, или волны-сателлита $j = 3$; k — коэффициент ослабления волн, равный $1.0 - 2.0 \text{ м}^{-1}$).

Затухание волн в инертных пузырьковых средах обусловлено диссипативными процессами, сопутствующими распространению волны, — вязкостной диссипацией при радиальном движении жидкости в процессе сжатия пузырьков газа и при относительном движении пузырьков газа и жидкости, акустическими потерями, тепловой диссипацией и др. [7–9]. Энергетические потери детонационной волны компенсируются химической энергией,

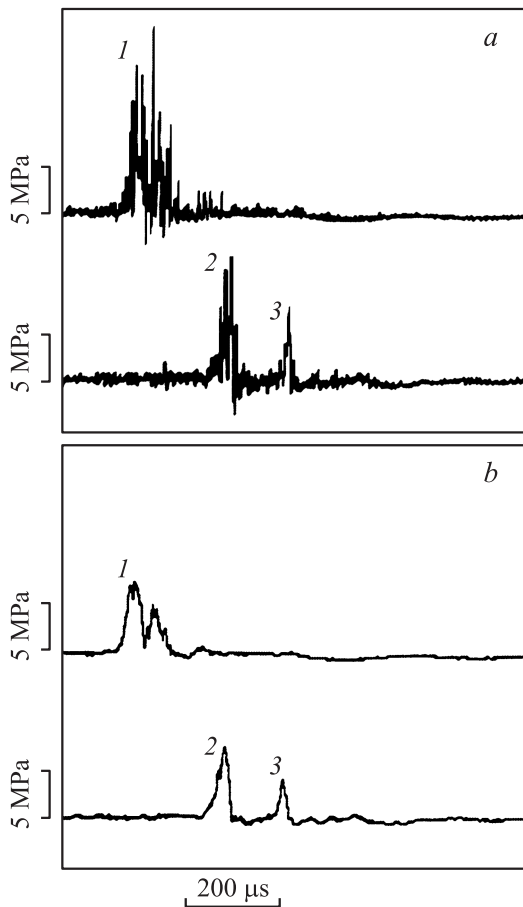


Рис. 6. Осциллограммы давления волн в системе $\{Ж(0.5) - [\beta_1(C_2H_2 + 2.5O_2) - \beta_2N_2]\} - \{Ж(0.5) - \beta_0N_2\}$: 1 — волна детонации в многокомпонентной среде $Ж(0.5) - [\beta_1(C_2H_2 + 2.5O_2) - \beta_2N_2]$; $\beta_1 = 1\%$, $\beta_2 = 1/4\%$ (расстояние до границы раздела сред 60 мм); 2 — постдетонационная волна и 3 — волна-спутник в однокомпонентной среде $Ж(0.5) - \beta_0N_2$; $\beta_0 = 1/4\%$ (расстояние от границы раздела сред 70 мм); *a* — до осреднения пульсаций давления, *b* — после осреднения пульсаций давления.

выделяющейся при воспламенении пузырьков газа. В химически неактивных средах компенсация энергопотерь отсутствует и волны затухают.

Постдетонационные волны, образующиеся при переходе детонационной волны из однокомпонентной пузырьковой среды в жидкость или в химически неактивную пузырьковую среду, и постдетонационная волна, в которую трансформируется волна „пузырьковой“ детонации при отражении от твердой преграды, экспериментально изучены в работах [10–12].

Заключение

Экспериментальные исследования процесса перехода детонационных волн через границу раздела пузырьковых сред показали, что детонация в одно- и многокомпонентных пузырьковых средах — стационарный процесс.

Критическая амплитуда ударной волны, инициирующей детонацию в однокомпонентных средах, возрастает при увеличении концентрации газовой фазы и при уменьшении вязкости жидкого компонента среды. В многокомпонентных средах критическая амплитуда инициирующей ударной волны повышается при увеличении как общей концентрации газовой фазы пузырьковой среды, так и концентрации неактивного газового компонента. В исследованных пузырьковых средах критическая амплитуда инициирующей ударной волны находится в диапазоне 1.7–6.0 МР.

Детонационные волны в одно- и многокомпонентных пузырьковых средах — это уединенные волны с пульсационным профилем давления. Регистрируемая амплитуда пульсаций давления длительностью 3–5 μ s достигает 15–30 МПа. Эффективное (осредненное по пульсациям) давление детонационных волн составляет 6–8 МПа. Длительность волн детонации равна 50–70 μ s. Давление за детонационными волнами близко по величине к давлению в невозмущенной среде.

Скорость распространения детонационных волн снижается с увеличением концентрации газовой фазы пузырьковой среды и при уменьшении вязкости жидкого компонента системы. В многокомпонентных средах существует предельное значение концентрации неактивного газового компонента, выше которого детонация в системе отсутствует.

При переходе через границу раздела пузырьковых сред детонационная волна трансформируется: падающая волна детонации распадается на две волны — детонационную волну и волну-спутник, затухающую по мере распространения. Прошедшая волна детонации достигает скорости распространения и длительности детонационной волны в однородной пузырьковой среде на расстоянии пробега ≤ 60 мм. Амплитуда волны-спутника возрастает с увеличением перепада концентраций газовой фазы на границе раздела пузырьковых сред.

В химически неактивной пузырьковой среде детонационная волна распадается на постдетонационную волну и волну-спутник, распространяющиеся с примерно равными скоростями. Амплитуда волн с расстоянием пробега уменьшается по экспоненциальному закону. Затухание волн в инертных пузырьковых средах обусловлено диссипативными процессами.

Обнаруженное явление распада детонационных волн на границе раздела пузырьковых сред может быть использовано как способ создания волновых возмущений с изменяемыми параметрами.

Список литературы

- [1] Сычев А.И. // Физика горения и взрывы. 1985. Т. 21. № 3. С. 103–110.
- [2] Сычев А.И., Пинаев А.В. // Прикл. механика и техн. физика. 1986. № 1. С. 133–138.
- [3] Пинаев А.В., Сычев А.И. // Физика горения и взрыва. 1986. Т. 22. № 3. С. 109–118.

- [4] Пинаев А.В., Сычев А.И. // Физика горения и взрыва. 1987. Т. 23. № 6. С. 76–84.
- [5] Сычев А.И. // Физика горения и взрыва. 1985. Т. 21. № 2. С. 130–134.
- [6] Сычев А.И. // Физика горения и взрыва. 1993. Т. 29. № 1, С. 110–117.
- [7] Бэтчелор Г.К. // Механика. Сб. переводов. М.: Мир, 1963. Т. 3. № 109. С. 65–84.
- [8] Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г., Шрейбер И.Р. Распространение волн в газо- и парожидкостных средах. Новосибирск. Институт теплофизики, 1983. 237 с.
- [9] Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. М.: Наука, 1987. Ч. I. 464 с.; Ч. II. 360 с.
- [10] Сычев А.И. // Физика горения и взрыва. 2002. Т. 38. № 2. С. 99–103.
- [11] Сычев А.И. // Физика горения и взрыва. 2001. Т. 37. № 4. С. 96–99.
- [12] Сычев А.И. // Физика горения и взрыва. 2000. Т. 36. № 3. С. 107–113.