

Рис. 5.

виаторную часть

$$\sigma_{ik}^{\partial} = -h_{ik}g_{ik} + \frac{1}{3}(h_{1m}g_{m1} + h_{2m}g_{m2} + h_{3m}g_{m3})\delta_{ik}$$

тензора напряжений σ_{ik} , отвечающего за релаксацию касательных напряжений в системе. Рис. 5 позволяет определить величину σ_{xx}^{∂} для $v \sim 0,1$ м/с: $\sigma_{xx}^{\partial} \approx 0,07$ ГПа, что указывает на необходимость учета при таких скоростях релаксации касательных напряжений и возможность разрушения остова. На

рис. 4, 5 безразмерные временные интервалы составляют 6,4.

Достаточно высокий уровень напряжений, а также диссипация энергии за счет межкомпонентного трения приводит к заметному нагреванию среды, повышающему температуру на 10 К.

ЛИТЕРАТУРА

1. Доровский В. И. Континуальная теория фильтрации // Геология и геофизика.— 1989.— № 7.
2. Доровский В. И., Перепечко Ю. В. Феноменологическое описание двухскоростных сред с релаксирующими касательными напряжениями // ПМТФ.— 1992.— № 3.
3. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред.— М.: Наука, 1987.— Т. 1, 2.
4. Халатников П. М. Теория сверхтекучести.— М.: Наука, 1971.
5. Доровский В. И., Перепечко Ю. В., Роменский Е. И. Нестационарные процессы в пористых упругодеформируемых средах. Препринт ОИГГМ СО РАН, № 3, Новосибирск, 1992.
6. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория упругости.— М.: Наука, 1988.
7. Мишина А. П., Проскуряков П. В. Высшая алгебра.— М.: ГИФМЛ, 1962.
8. Роменский Е. И. Методы расчета двумерных динамических уравнений нелинейной упругопластической среды Максвелла // Тр. ИМ СО АН СССР, 1990, т. 18. Вычислительные проблемы в задачах математической физики.

г. Новосибирск

Поступила в редакцию 4/VIII 1992

УДК 534.222.2 + 532.529

А. И. Сычев

ДЕТОНАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ В МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ПУЗЫРЬКОВЫХ СРЕДАХ

Экспериментально изучены детонационные волны в многокомпонентных пузырьковых средах. Получены данные о критических условиях инициирования, структуре, свойствах и пределах существования детонационных волн в таких системах. Установлены закономерности взаимодействия пузырьков с волной детонации и выяснены особенности поведения активных и неактивных пузырьков в волне детонации.

Многокомпонентные пузырьковые среды — сложные системы, жидкость в которых содержит пузырьки нескольких сортов газа. В соответствии с приведенной в [1] классификацией систем жидкость — пузырьки газа можно выделить следующие типы многокомпонентных химически активных пузырьковых сред:

I — химически неактивная жидкость — смесь пузырьков химически активных и неактивных газов;

II — жидкое горючее — смесь пузырьков газа-окислителя и химически неактивных газов;

© А. И. Сычев, 1993.

Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки.

гибридные системы I—II — жидкое горючее — смесь пузырьков газа-окислителя и химически активных газов.

Данные системы являются новыми: ударно- и детонационно-волновые процессы в таких средах не исследованы. (К настоящему времени изучены ударные и детонационные волны в однокомпонентных химически активных пузырьковых средах, т. е. в системах, содержащих пузырьки газа одного сорта [1—4].)

Уникальная особенность химически активных пузырьковых систем состоит в том, что такие среды обладают чрезвычайно низким энергосодержанием. Присутствие в системе неактивных пузырьков еще более снижает энергоемкость среды. Цель настоящей работы — выяснить условия существования волны детонации в многокомпонентных пузырьковых средах.

Экспериментальные исследования выполнены на вертикально расположенной гидродинамической ударной трубе из нержавеющей стали с внутренним диаметром 40 мм (рис. 1), состоящей из секций высокого I и низкого 3 давления с разрывной диафрагмой 2 между ними. Секцию 3 заполняли жидкостью, в которой пузырьки диаметром 2—3 мм создавались при прохождении газов через две независимые системы капиллярных отверстий 14 (получаемое при этом распределение пузырьков в жидкости близко к равномерному). Параметры волн детонации регистрировали установленными по длине ударной трубы пьезоэлектрическими датчиками давления 4—10, сигналы с которых подавались на осциллографы (ОК-33М и два С8-17) через истоковый повторитель или через параллельные емкости (постоянная времени измерительной цепи каждого датчика 10^{-3} —1 с).

Свечение газожидкостной среды, сопровождающее процесс распространения детонационных волн, фиксировали фотоэлектронными умножителями ФЭУ-102, оптические вводы 11—13 которых располагали диаметрально противоположно датчикам давления 8—10 соответственно. Через окна оптических секций осуществляли фоторегистрацию волн детонации камерой СФР в режимах фоторазвертки и покадровой съемки (теневая картина с подсветкой импульсной лампой ИФП-250). Объемную концентрацию газовой фазы определяли по подъему столба газожидкостной среды. Давление на поверхности жидкости с пузырьками газов поддерживали равным 1 атм. Иницирование пузырьковой детонации осуществляли ударными волнами, генерируемыми в газожидкостной среде при сжигании смеси $C_2H_2 + 2,5 O_2$ в секции 1. Интенсивность иницирующих ударных волн варьировали изменением начального давления $p_{0в}$ взрывчатой газовой смеси.

Изучены следующие химически активные пузырьковые системы Ж — ($\Gamma_1 + \Gamma_2$), где Ж — жидкость, Γ — газ:

I — Ж (α) — водоглицериновые растворы с объемной концентрацией глицерина $\alpha = 0,25$ и $0,5$; Γ_1 — пузырьки химически активного газа ($C_2H_2 + 2,5 O_2$, $2H_2 + O_2$); Γ_2 — пузырьки химически активного газа ($2H_2 + O_2$) или химически инертного газа (Ar, He, N_2 , H_2);

II — Ж — жидкое горючее (вакуумное масло ВМ-3); Γ_1 — пузырьки газа-окислителя (O_2); Γ_2 — пузырьки инертного газа (Ar);

I—II — Ж — жидкое горючее (ВМ-3); Γ_1 — пузырьки газа-окислителя (O_2); Γ_2 — пузырьки химически активного газа ($C_2H_2 + 2,5 O_2$). Общая концентрация газовой фазы $\beta_0 = \beta_1 + \beta_2$, β_1 , β_2 — концентрация пузырьков Γ_1 и Γ_2 соответственно.

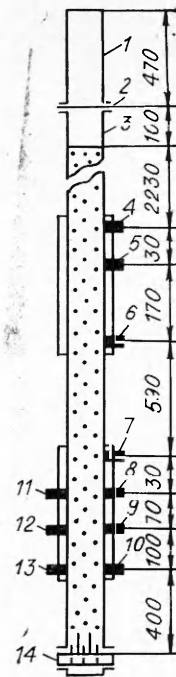


Таблица 1

Газ	$\rho_{г}$, кг/м ³	γ_0	μ_0	$c_p \cdot 10^{-3}$, Дж/(кг·К)	$\lambda_0 \cdot 10^2$, Дж/(мс·К)	$c_{г}$, м/с
Ar	1,78	1,67	39,95	0,52	1,63	319
He	0,18	1,67	4,00	5,15	14,31	965
N ₂	1,25	1,40	28,00	1,04	2,40	334
H ₂	0,09	1,40	2,02	14,31	16,78	1284
C ₂ H ₂ + 2,5 O ₂	1,24	1,33	30,29	1,14	2,49	329
2H ₂ + O ₂	0,49	1,40	12,01	9,80	13,08	537

Некоторые параметры, характеризующие физические свойства газов и жидкостей, приведены в табл. 1 и 2 соответственно: $\rho_{г}$, $\rho_{ж}$ — плотность газа и жидкости; γ_0 — показатель адиабаты; μ_0 — молекулярная масса; c_p — удельная теплоемкость; λ_0 — коэффициент теплопроводности; μ — вязкость жидкости; $c_{г}$, $c_{ж}$ — скорость звука в газе и жидкости. Вязкость жидкостей μ измерена вискозиметром ВПЖ-2; $c_{ж}$ определена по скорости распространения слабых ударных волн; остальные параметры — данные справочника [5], полученные при $p_0 = 760$ Торр, $T_0 = 273$ К.

На рис. 2 приведены осциллограммы, иллюстрирующие детонационный процесс в системах I и II. Физико-химические характеристики исследованных систем (см. табл. 1 и 2), параметры начального состояния ($0,5 \leq \beta_0 \leq 6$ %) изменялись в широком диапазоне. Однако структура профиля давления детонационных волн (сигнал датчика давления 9 (см. рис. 1)) во всех исследованных системах качественно идентична (см. рис. 2, а, в): волна детонации представляет собой короткую уединенную волну с пульсациями давления. Длительность волны детонации во всех исследованных системах $\tau_{в} = 50 \div 70$ мкс на уровне (0,1—0,2). Регистрируемая амплитуда пульсаций давления, обусловленных излучением пузырьками ударных волн, достигает 150—400 атм; длительность пульсаций давления $\tau_{п} = 3 \div 5$ мкс.

Присутствие в жидкости пузырьков инертного газа также не сказывается на структуре волны детонации (см. рис. 2). Таким образом, волна детонации в системах жидкость — пузырьки газа является самоорганизующимся процессом: структура детонационной волны устойчива относительно изменений параметров системы в широком диапазоне.

На рис. 2 приведены осциллограммы сигналов фотоэлектронного умножителя (оптический ввод которого 12 расположен диаметрально противоположно датчику 9 (см. рис. 1)), фиксирующего свечение газожидкостной среды (воспламенение пузырьков) (см. рис. 2, а, б), а также представлен усредненный профиль давления волны детонации — сигнал датчика давления 9 с интегрирующей цепочкой (постоянная времени интегрирующей цепочки $\tau_{и}$ выбиралась из условия $\tau_{и} < \tau_{п} < \tau_{в}$, где $\tau_{в}$, $\tau_{п}$ — длительность волны детонации и пульсаций давления соответственно; в экспериментах величина $\tau_{и}$ варьировалась в диапазоне 10—30 мкс; в опытах, представленных на рис. 2, в, г, $\tau_{и} = 10$ мкс).

Таблица 2

Жидкость	$\rho_{ж}$, кг/м	$\mu \cdot 10^3$, Па·с	$c_{ж}$, м/с
0,75 H ₂ O + 0,25 глицерин	1065	2,27	1600
0,5 H ₂ O + 0,5 глицерин	1130	6,84	1700
ВМ-3	850	28,2	1400

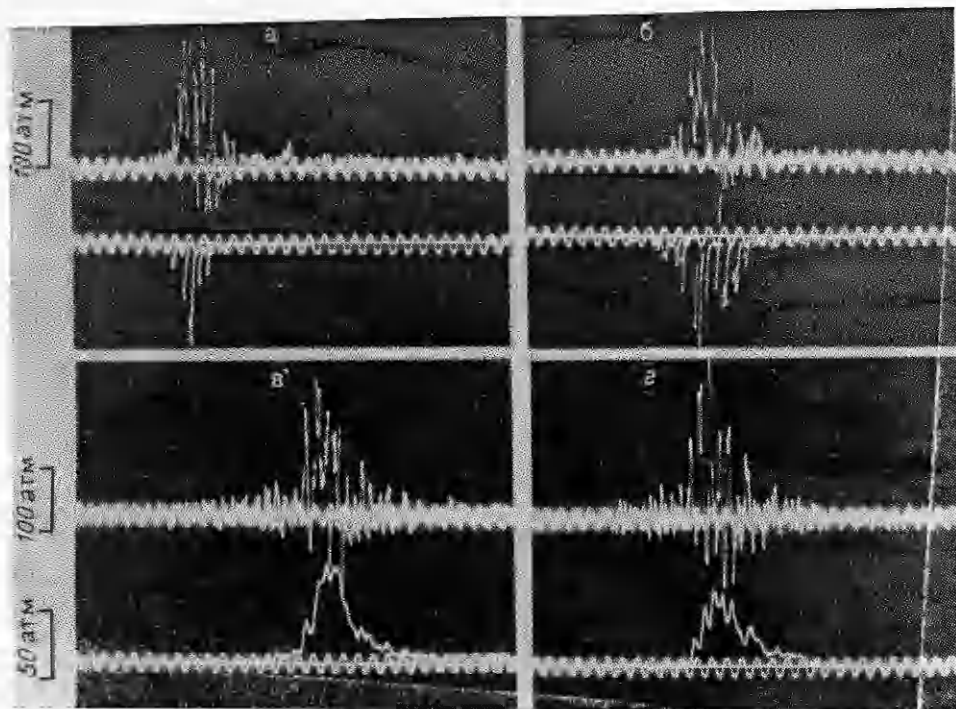


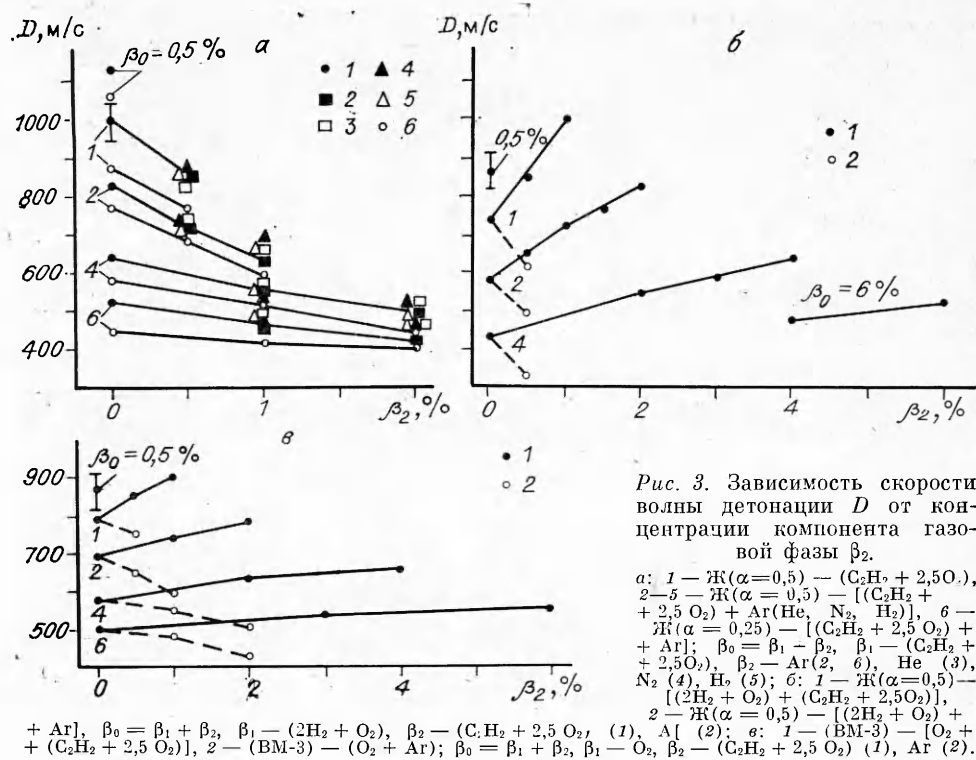
Рис. 2. Осциллограммы давления волны детонации (верхний луч), свечения газожидкостной среды (а, б) и усредненного профиля давления (в, г) (нижний луч). а — Ж' ($\alpha = 0,5$) — $(C_2H_2 + 2,5 O_2)$, $\beta_0 = 0,5\%$; б — Ж' ($\alpha = 0,5$) — $[(C_2H_2 + 2,5 O_2) + Ar]$, $\beta_0 = \beta_1 + \beta_2 = 0,5 + 0,5 = 1\%$; в — (ВМ-3) — O_2 , $\beta_0 = 6\%$; г — (ВМ-3) — $(O_2 + Ar)$, $\beta_0 = \beta_1 + \beta_2 = 1,5 + 0,5 = 2\%$; период синусоиды $T = 10$ мкс; $p_0 = 1$ атм.

Волна пузырьковой детонации имеет сложную структуру. Усреднение пульсаций давления с помощью интегрирующей цепочки позволяет представить качественную картину эффективного профиля давления волны детонации: детонационная волна — это уединенная волна коноидальной формы, характеризующейся плавным передним фронтом и давлением за волной, близким по величине давлению в невозмущенной среде (см. рис. 2, в, г).

На рис. 3 приведены результаты измерений скорости детонационных волн, распространяющихся в системах I, II и I—II (каждая точка — среднее нескольких опытов). Скорость измерялась с помощью датчиков давления (в том числе и с интегрирующими цепочками) или с использованием фотоэлектронных умножителей. Факт выхода детонации на стационарный режим контролировали измерением скорости волны на двух участках ударной трубы одновременно. Результаты представлены в виде зависимостей скорости волны детонации D от концентрации второго газового компонента β_2 , при этом общая концентрация газовых компонентов $\beta_0 = \beta_1 + \beta_2$ служит параметром (зависимости $D(\beta_2)$ получены при различных $\beta_0 = \beta_1 + \beta_2 = \text{const}$).

Общий вид зависимостей $D(\beta_2)$ (рис. 3, а) при различных значениях β_0 во всех исследованных системах качественно сходный — наличие в системе пузырьков неактивного газа приводит к снижению скорости распространения волны детонации. Данное обстоятельство, очевидно, есть следствие взаимодействия пузырьков неактивного газа с волной детонации, в результате которого увеличиваются энергетические потери волны детонации (действительно, энергия, затрачиваемая волной детонации на сжатие пузырьков неактивного газа, компенсируется энергией, излучаемой пузырьками при расширении, лишь частично).

Таким образом, наличие в системе пузырьков неактивного газа выступает фактором, обуславливающим дополнительные к имеющимся по-



тери энергии волной детонации. Действие этого фактора существенно: присутствие в системе пузырьков неактивного газа с концентрацией $\beta_2 \sim 0,5\beta_0$ (см. рис. 3, а) оказывается критическим (волна детонации в таких системах не способна существовать). При достаточной интенсивности инициирующей ударной волны возможно воспламенение пузырьков. Однако по мере распространения амплитуда ударной волны уменьшается и воспламенение пузырьков прекращается, детонационная волна при этом не возбуждается.

Детонация в системах, содержащих пузырьки инертного газа, может быть охарактеризована как пузырьковая детонация «с потерями».

Не установлено существенного влияния сорта газа химически инертного газового компонента системы на параметры волны детонации. Различие в физических свойствах газов (см. табл. 1) не сказывается заметным образом на скорости распространения волны детонации. Значительно более существенно действие жидкого компонента системы: на рис. 3, а приведены результаты измерений скорости детонационных волн в системах с пузырьками инертного газа, вязкость жидкого компонента которых различна (см. табл. 2). Значения скоростей существенно выше в системе с более вязкой жидкостью. Таким образом, параметры волн детонации в значительной степени определяются свойствами жидкого компонента системы (см. также [3, 4]).

На рис. 3, б, в представлены результаты измерений скорости волн детонации в системах I (двухкомпонентная детонация) и I—II (гибридная пузырьковая детонация) соответственно; здесь же для сравнения приведены данные о скорости детонации в системах, содержащих пузырьки инертного газа.

Увеличение в системе концентрации более активного газового компонента (при данной неизменной общей концентрации газовой фазы) ведет к повышению скорости детонации; если возрастает концентрация пузырьков химически неактивного газа, скорость волны детонации падает (вплоть до затухания детонации при концентрации неактивных пузырьков выше критической).

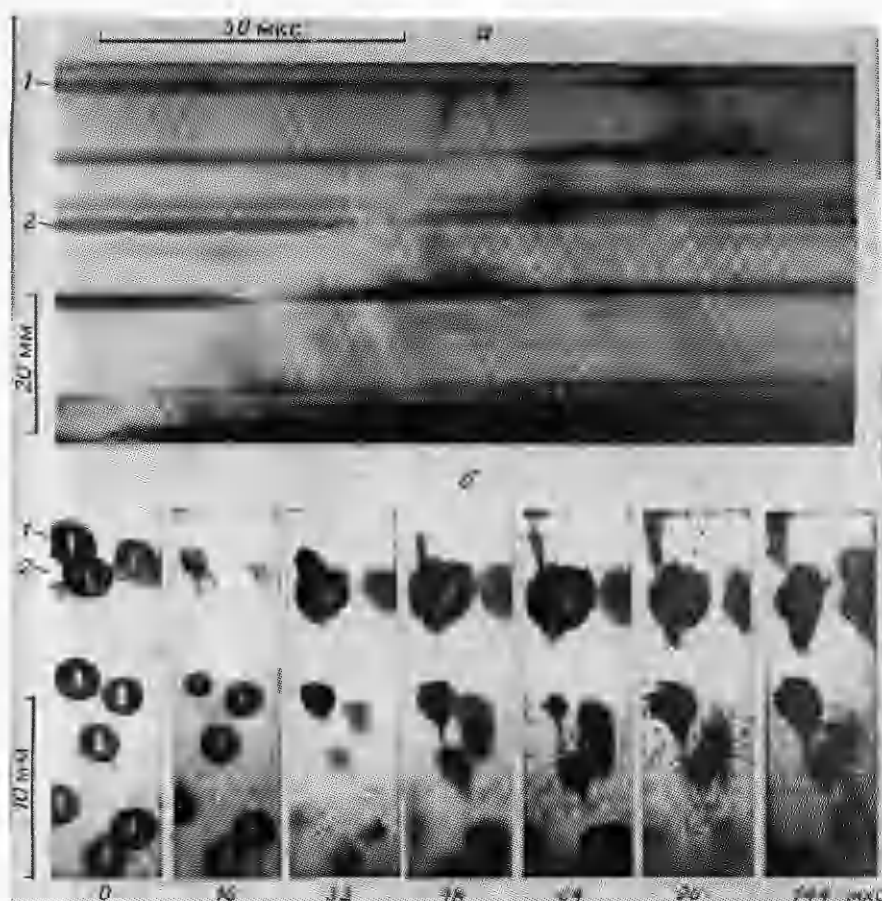


Рис. 4. Фоторазвертка (а) и кинограмма (б) теневой картины активных (а — 1, б — 2) и неактивных (а — 2, б — 1) пузырьков в волне детонации в системе $\mathcal{H}(\alpha = 0,25) - [(C_2H_2 + 2,5 O_2) + Ar]$.

$$\beta_0 = \beta_1 + \beta_2 = 0,5 + 0,5 = 1 \%; \quad p_0 = 1 \text{ атм.}$$

Отметим, что значения скорости распространения волны детонации в однокомпонентных системах $\mathcal{H}(0,5) - (C_2H_2 + 2,5 O_2)$, $\mathcal{H}(0,5) - (2H_2 + O_2)$, $\mathcal{H}(0,25) - (C_2H_2 + 2,5 O_2)$ и (BM-3) — O_2 , полученные в настоящей работе, ниже на 10—15 %, чем в предшествующих исследованиях [2—4]. Различие обусловлено меньшим размером пузырьков.

Критические значения инициирующей ударной волны p_1^* зависят как от общей концентрации газовой фазы, так и от соотношения концентраций активных и неактивных пузырьков. Так, в системе $\mathcal{H}(0,25) - [(C_2H_2 + 2,5 O_2) + Ar]$ при $\beta_2 \leq 1 \%$ $p_1^* \leq 17$ атм ($\beta_0 \leq 4 \%$) и $p_1^* \approx 34$ атм ($\beta_0 = 6 \%$) ($\beta_0 = \beta_1 + \beta_2$ — общая концентрация газовой фазы, β_1 и β_2 — концентрация пузырьков $C_2H_2 + 2,5 O_2$ и Ar соответственно); при $\beta_2 = 2 \%$ $p_1^* \approx 34$ атм ($\beta_0 = 4 \%$) и $p_1^* \approx 43$ атм ($\beta_0 = 6 \%$). Значения p_1^* повышаются с увеличением β_0 или β_2 . В системе $\mathcal{H}(0,5) - [(2H_2 + O_2) + Ar]$ $17 \leq p_1^* \leq 43$ атм в исследованном диапазоне концентраций газовых компонентов (см. рис. 3); в остальных системах $p_1^* \leq 17$ атм.

Многокомпонентные пузырьковые среды содержат пузырьки нескольких сортов газа, физико-химические свойства которых различны. Процесс взаимодействия пузырьков газа с волной детонации определяется как параметрами самой детонационной волны, так и физико-химическими свойствами компонентов системы. С целью выяснения особенностей поведения активных и неактивных пузырьков в волне детонации выполнены оптические исследования.

Взаимодействие пузырьков с волной детонации (рис. 4, а) приводит к сжатию пузырьков, вследствие чего повышаются давление и темпе-

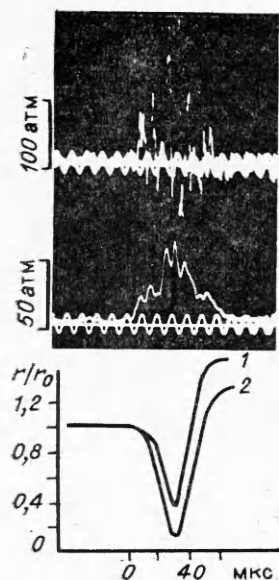


Рис. 5. Профиль давления (верхний луч), усредненный профиль давления (нижний луч) волны детонации и кривые сжатия r/r_0 активного (1) и неактивного (2) пузырьков в системе Ж ($\alpha = 0,25$) — $[(C_2H_2 + 2,5 O_2) + Ag]$.

$$\beta_0 = \beta_1 + \beta_2 = 0,5 + 0,5 = 1 \%; p_0 = 1 \text{ атм.}$$

ратура газа в пузырьке. В случае инертного газа в пузырьке сжатие продолжается до момента, когда давление газа в пузырьке уравнивает инерцию радиально сходящейся жидкости. Если газ в пузырьке химически активный, то при достижении критической температуры газ в пузырьке воспламеняется, давление резко возрастает и сжатие прекращается. При этом степень сжатия пузырька меньше, чем в случае инертного газа. По достижении максимального давления газа пузырек начинает расширяться, излучая в окружающую жидкость ударную волну короткой длительности. Расширение продолжается до получения пузырька максимального размера, после чего возможно повторное сжатие и расширение пузырька.

Анализ фоторазверток волны детонации позволяет получить кривые сжатия пузырьков в волне детонации, характеризующие процесс сжатия активных и неактивных пузырьков. На рис. 5 приведены зависимости r/r_0 от времени (r_0, r — начальный и текущий радиусы пузырька), здесь же представлены осциллограммы профиля давления волны детонации (привязка осуществлялась по совмещению минимума кривой сжатия с максимумом профиля давления).

Воспламенение активных пузырьков происходит при степени сжатия $r_0/r_1 \approx 3,0 \div 3,5$; расширяется пузырек после воспламенения до $r_2/r_0 \approx 1,3 \div 1,7$ (r_1, r_2 — минимальный при сжатии и максимальный при расширении радиусы пузырька). Максимальное сжатие неактивного пузырька в волне детонации $r_0/r_1 \approx 4 \div 6$; степень расширения неактивного пузырька после первого сжатия $r_2/r_0 \approx 1,1 \div 1,4$.

В предположении адиабатичности процесса сжатия в момент максимального сжатия в пузырьке достигается давление газа $p = p_0 (r_0/r_1)^{3\gamma_0}$ (p_0 — начальное давление газа в пузырьке); для пузырька с Ag $p \approx 1000 \div 8000$ атм; давление газовой смеси $C_2H_2 + 2,5 O_2$ в пузырьке перед воспламенением $\approx 80-150$ атм, при воспламенении давление возрастает до $p' \approx 1400 \div 2500$ атм (по данным [6] коэффициент повышения давления стехиометрической ацетиленокислородной смеси при горении в замкнутом объеме ≈ 17). При адиабатическом расширении давление газа падает до 3—6 атм в пузырьке с продуктами сгорания ацетиленокислородной смеси и до 0,2—0,6 атм в пузырьке Ag.

Различие в величинах давления в активных и неактивных пузырьках при расширении свидетельствует о неравновесности состояния среды за волной детонации. Равновесие достигается, по-видимому, при последующих осцилляциях пузырьков.

Средняя скорость поверхности активного и неактивного пузырьков при сжатии 100—120 м/с (время сжатия 10—20 мкс); при последующем расширении скорость поверхности инертного и активного пузырьков 100—120 и 130—150 м/с соответственно (время расширения 15—25 мкс). Более высокая скорость расширения активных пузырьков обусловлена, очевидно, повышением давления при воспламенении газа в пузырьке.

Кинограммы (см. рис. 4, б) позволяют проследить поведение пузырьков в волне детонации. Первоначальная их форма близка к сферической, а взаимодействие с детонационной волной приводит к ее искажению. На некоторой стадии сжатия как активных, так и инертных пузырьков

происходит формирование кумулятивной струйки жидкости, пронизывающей пузырек насквозь. Общая деформация пузырька, приводящая к образованию кумулятивной струйки, есть следствие неоднородности поля давления в окружающей жидкости. Представленные снимки пузырьков в волне детонации позволяют оценить размеры кумулятивной струйки жидкости: $l \sim r_0$, $r_{ст} \approx 0,1r_0$ — длина и радиус кумулятивной струйки. Масса жидкости, содержащейся в струйке, $m_{ст} = \pi r_{ст}^2 l \rho_{ж} \simeq 10^{-7}$ кг. На поздних стадиях сжатия проявляется другой тип искажения поверхности пузырьков — мелкомасштабные возмущения, происходящие из-за неустойчивости поверхности раздела между жидкостью и газом при ускоренном движении (неустойчивость Тейлора).

Вследствие искажения поверхности пузырька возрастает площадь границы раздела газ — жидкость, что увеличивает теплотери, обусловленные процессом теплопередачи через границу газ — жидкость. Возникают также теплотери на нагрев и испарение микрокапель жидкости, срывающихся с искаженных неустойчивостями стенок пузырька и образующихся в результате диспергирования кумулятивной струйки жидкости в объеме пузырька. В результате может возникнуть отклонение от адиабатического закона сжатия. Помимо этого, деформация формы пузырька приводит к несимметричности процесса сжатия («неидеальная кумуляция»), т. е. во внутреннюю энергию газа в пузырьке переходит лишь часть кинетической энергии жидкости. Предельная степень сжатия пузырька и, следовательно, температура и давление газа в нем будут при этом меньше, чем в случае идеального процесса сжатия.

На стадии расширения пузырьки излучают в окружающую жидкость ударные волны, после прохождения которых в ней создаются зоны разрежения с образованием в них множества мелких ($\leq 0,1r_0$) кавитационных пузырьков (см. рис. 4, б). Их возникновение наблюдается также при последующих осцилляциях основных пузырьков. Совершив несколько (2—3) осцилляций, пузырек разрушается. В результате после прохождения детонационной волны газожидкостная среда представляет собой однородную смесь жидкости с большим количеством мелких (диаметром ~ 1 мм) пузырьков.

Таким образом, в работе установлены критические параметры инициирования, получены данные о структуре и свойствах, определены пределы существования волн детонации в многокомпонентных пузырьковых средах. Выявлены особенности поведения активных и неактивных пузырьков в волне детонации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сычев А. И. Воспламенение систем жидкость — пузырьки газа ударной волной // ФГВ.— 1985.— 21, № 2.— С. 130—134.
2. Сычев А. И. Волна детонации в системе жидкость — пузырьки газа // Там же.— № 3.— С. 103—110.
3. Пинаев А. В., Сычев А. И. Структура и свойства детонации в системах жидкость — пузырьки газа // Там же.— 1986.— 22, № 3.— С. 109—118.
4. 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 // Там же.— 1987.— 23, № 6.— С. 76—84.
5. Таблицы физических величин: Справочник/Под ред. И. К. Кикоина.— М.: Атомиздат, 1976.— 1008 с.
6. Николаев Ю. А., Топчиян М. Е. Расчет равновесных течений в детонационных волнах в газах // ФГВ.— 1977.— 13, № 3.— С. 393—404.

г. Новосибирск

Поступила в редакцию 1/VII 1992