

5. Быковский Ф.А. О некоторых свойствах потока при непрерывной детонации в кольцевой цилиндрической камере // Детонация и ударные волны. — Черногоровка, 1986. — С. 16—19.
6. Митрофанов В.В. О некоторых критических явлениях при детонации, связанных с потерей импульса // ФГВ. — 1983. — 19, № 4. — С. 169—174.
7. Васильев А.А., Митрофанов В.В., Топчий М.Е. Детонационные волны в газах // Там же. — 1987. — 23, № 5. — С. 109—131.
8. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. — М.: Наука, 1991. — Ч. 1. — С. 600.
9. Васильев А.А., Топчий М.Е., Ульяницкий В.Ю. Влияние начальной температуры на параметры газовой детонации // ФГВ. — 1979. — 15, № 6. — С. 149—152.
10. Гавриленко Т.П., Топчий М.Е., Ясаков В.О. Поперечные волны в сходящейся цилиндрической детонационной волне // Там же. — 1967. — 3, № 4. — С. 501—504.
11. Странные аттракторы / Под ред. А.Н. Колмогорова и С.П. Новикова. — М.: Мир, 1981. — № 22. — С. 253.

630090, г. Новосибирск,
ИГиЛ СО РАН

Поступила в редакцию
4/XII 1993

УДК 534.222.2:532.529

А.И. Сычев

СТРУКТУРА ВОЛНЫ ПУЗЫРЬКОВОЙ ДЕТОНАЦИИ

Экспериментально изучены детонационные волны в однокомпонентных (жидкость — пузырьки смеси газов) и многокомпонентных (жидкость — смесь пузырьков газов) средах. Получены данные о структуре волн детонации. Проведены измерения давления детонационных волн в исследованных системах.

Волны детонации, существующие в разнообразных гомогенных и гетерогенных средах, обладают общими признаками: детонация — самоподдерживающийся автоволновой процесс. Данное обстоятельство вызвано проявлением общего для всех систем свойства — это химически активные среды. Именно наличие энерговыделения в среде обеспечивает возможность распространения волн детонации. В свою очередь, особенности строения и физико-химические свойства систем определяют специфические черты детонационных волн (ДВ) в той или иной среде.

Детонация в пузырьковых средах, обладая общими для всех ДВ признаками, имеет ряд особенностей, проявляющихся в структуре, свойствах и механизме распространения [1—4]. Характер систем жидкость — пузырьки газа (это — гетерогенные, двухфазные среды) обуславливает сложный пульсационный профиль давления волн пузырьковой детонации [1, 2]. Цель настоящей работы — исследовать осредненный профиль давления и выяснить влияние свойств систем на величину эффективного давления ДВ.

Эксперименты выполнены на вертикально расположенной ударной трубе с внутренним диаметром 40 мм, состоящей из секций высокого и низкого давления с разрывной диафрагмой между ними [4]. Пузырьковая среда заполняла секцию низкого давления (диаметр пузырьков 2—3 мм, высота газожидкостного столба ~ 3,6 м). Давление на поверхности жидкости с пузырьками газа было равно атмосферному.

Параметры ДВ регистрировали установленными по длине трубы пьезоэлектрическими датчиками давления, сигналы с которых подавали на осциллографы ОК-33, ОК-33М, два С8-17 и С9-16 (постоянная времени измерительной цепи каждого датчика $> 10^{-3}$ с). Свечение пузырьковой среды, сопровождающее детонационный процесс, фиксировали фотоэлектронными умножителями, оптические вводы которых располагали диаметрально противоположно датчикам давления.

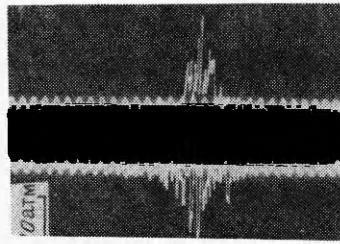


Рис. 1. Оциллограмма давления ДВ (верхний луч) и свечения газожидкостной среды (нижний луч): Ж(0,5) — $[\beta_1(\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5\text{O}_2) + \beta_2\text{Ar}]$, $\beta_0 = \beta_1 + \beta_2 = 0,5 + 0,5 = 1\%$, период синусоиды $T = 10$ мкс.

Пузырьковую детонацию инициировали ударными волнами (УВ), генерируемыми в газожидкостной среде при сжигании взрывчатой газовой смеси в секции высокого давления.

В экспериментах использовались следующие химически активные пузырьковые среды:

1) однокомпонентные системы (жидкость — пузырьки смеси газов) Ж — $(x\Gamma_1 + y\Gamma_2)$ (Ж — жидкость; x, y — концентрация газов Γ_1 и Γ_2 в пузырьке, $x + y = 1$): I — Ж (α) — водоглицериновые растворы (объемная концентрация глицерина $\alpha = 0,25$ и $0,5$) с пузырьками химически активного газа Γ_1 ($\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5\text{O}_2, 2\text{H}_2 + \text{O}_2$), разбавленного химически неактивным газом Γ_2 (Ar, He, N_2); II — Ж — жидкое горючее (вакуумное масло ВМ-3) с пузырьками газообразного окислителя Γ_1 (O_2), разбавленного инертным газом Γ_2 (Ar);

2) многокомпонентные системы (жидкость — смесь пузырьков газов) Ж — $(\beta_1\Gamma_1 + \beta_2\Gamma_2)$ (β_1, β_2 — концентрация пузырьков Γ_1 и Γ_2 , общая концентрация газовой фазы $\beta_0 = \beta_1 + \beta_2$): I — Ж (α) — водоглицериновые растворы, содержащие смесь пузырьков химически активного газа Γ_1 ($\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5\text{O}_2$) и пузырьков химически неактивного газа Γ_2 (Ar); II — Ж — жидкое горючее (ВМ-3) с пузырьками газообразного окислителя Γ_1 (O_2) и пузырьками инертного газа Γ_2 (Ar).

Волна пузырьковой детонации — это уединенная волна с пульсационным профилем давления [1, 2] (рис. 1). Длительность ДВ 50—70 мкс (на уровне 0,1—0,2); давление за волной близко по величине к давлению в невозмущенной среде. Регистрируемая амплитуда пульсаций давления, длительность которых 3—5 мкс, достигает 150—400 атм.

Волна детонации — постоянный излучатель возмущений [2]: перед ДВ распространяется пульсационный предвестник, амплитуда которого уменьшается с расстоянием от волны; возмущения, аналогичные предвестнику, распространяются и в направлении, противоположном движению волны.

Свечение газожидкостной среды также имеет пульсационный характер (см. рис. 1). Качественное сходство профилей давления и свечения ДВ вызвано тем обстоятельством, что датчик давления и фотоэлектронный умножитель фиксирует две стороны одного процесса — излучение УВ и свечение воспламенившихся в ДВ пузырьков. Хаотичность распределения пузырьков в жидкости обуславливает стохастический характер профилей давления и свечения волны детонации.

С одной стороны, характеристики волны определяются физико-химическими свойствами пузырьковой среды; с другой — процессы, протекающие в среде (сжатие и воспламенение пузырьков), зависят от параметров волны. Результаты оптических исследований [2, 4] свидетельствуют о согласованности процессов при детонации в пузырьковых средах: время сжатия-расширения пузырьков в ДВ коррелирует с длительностью волны.

Отмеченный факт указывает на то, что волна пузырьковой детонации — самоорганизующийся процесс: параметры волны детонации (скорость распространения, давление) “подбираются” такими, чтобы обеспечить определенную длительность волны, соответствующую временным характеристикам процесса сжатия пузырьков в ДВ.

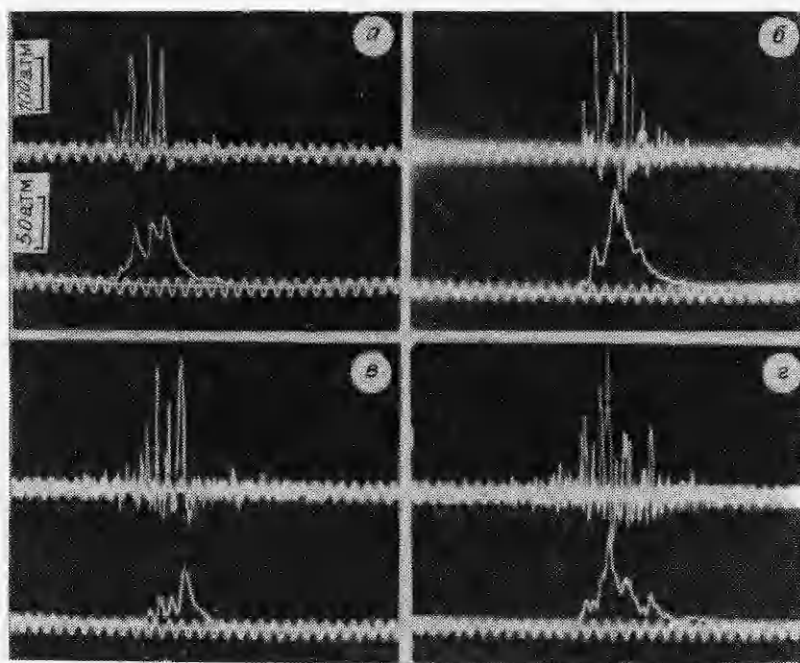


Рис. 2. Осциллограммы давления ДВ (верхний луч) и осредненного профиля давления (нижний луч):

а — Ж (0,5) — $[x(C_2H_2 + 2,5O_2) + yAr]$, $x = 0,6, \beta_0 = 2\%$; б — Ж (0,5) — $[\beta_1(C_2H_2 + 2,5O_2) + \beta_2Ar]$, $\beta_0 = \beta_1 + \beta_2 = 2 + 2 = 4\%$; в — (ВМ-3) — $(xO_2 + yAr)$, $x = 0,7, \beta_0 = 2\%$; г — (ВМ-3) — $(\beta_1O_2 + \beta_2Ar)$, $\beta_0 = \beta_1 + \beta_2 = 3 + 1 = 4\%$; $T = 10$ мкс.

Физико-химические свойства, параметры начального состояния исследованных пузырьков сред (за исключением диаметра пузырьков) различаются в широком диапазоне. Тем не менее структура ДВ во всех системах идентична (рис. 2). Следовательно, длительность ДВ определяется в основном диаметром пузырьков.

Время сжатия пузырьков в ДВ (10—20 мкс) [2, 4] существенно превышает длительность пульсаций давления (3—5 мкс), т.е. каждый отдельный пузырек сжимается ударными волнами, излучаемыми несколькими пузырьками. Осреднение пульсаций давления позволяет получить эффективный профиль давления волны детонации.

Представленные на рис. 2 осциллограммы — сигнал датчика давления (верхний луч) и тот же сигнал после интегрирующей RC-цепочки (нижний луч). ДВ с осредненным профилем давления в различных пузырьковых средах близки по форме к волнам коноидального типа.

Осреднение пульсаций давления волны пузырковой детонации встречает естественные затруднения. С одной стороны, для эффективного осреднения пульсаций давления требуется выполнение условия $\tau_n \gg \tau_p$ (τ_n — постоянная времени интегрирующей цепочки, τ_p — длительность пульсаций давления); с другой стороны, для исключения искажения формы осредненного профиля давления необходимо $\tau_n \ll \tau_b$ (τ_b — длительность ДВ). Так как временной диапазон $[\tau_p - \tau_b]$ узок ($\tau_p = 3 \div 5$ мкс, $\tau_b = 50 \div 70$ мкс), постоянная времени интегрирующей цепочки выбиралась из условия $\tau_n < \tau_p < \tau_b$ ($\tau_n = 10$ мкс).

Осциллограммы на рис. 3 — сигнал датчика давления до и после сглаживания пульсаций давления, проведенного на цифровом осциллографе С9-16. Процедура сглаживания заключается в осреднении сигнала по n точкам; при временном интервале между точками Δt (время дискретизации) постоянная времени сглаживания сигнала (величина, аналогичная постоянной времени интегрирующей цепочки) $\tau_c = n\Delta t$. Сопоставление осреднен-

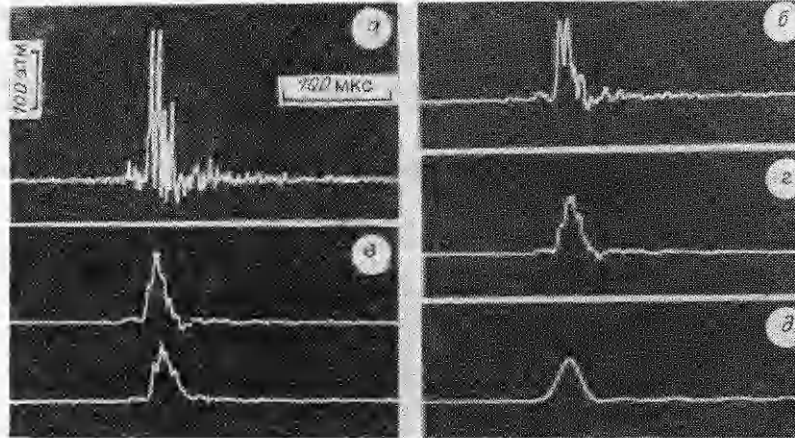


Рис. 3. Осциллограммы давления ДВ (а), сглаженного (б, в — верхний луч, г, д) и осредненного (в — нижний луч) профилей давления: Ж(0,25) — $[\beta_1(C_2H_2 + 2,5 O_2) + \beta_2 Ar]$,
 $\beta_0 = \beta_1 + \beta_2 = 0,5 + 0,5 = 1 \%$.
 τ_c , мкс: б — 5, в — 10, г — 15, д — 15 (3 раза); $\tau_i = 10$ мкс (е).

ных профилей давления, полученных после процедуры сглаживания и с помощью интегрирующей цепочки (рис. 3, в), свидетельствует о качественном сходстве сигналов.

Представленные на рис. 3 осциллограммы осредненных профилей давления получены при различных значениях τ_c (при этом $\Delta t = 1$ мкс); осциллограмма на рис. 3, д — результат трехкратного проведения процедуры сглаживания при $\tau_c = 15$ мкс. С увеличением τ_c форма осредненного профиля давления ДВ приближается к коноидальной. При этом амплитуда осредненного профиля давления уменьшается, так как с возрастанием τ_c затрудняется выполнение условия $\tau_c \ll \tau_s$, необходимого для регистрации сигнала без искажения.

Результаты, приведенные на рис. 4 (осциллограммы осредненных с помощью интегрирующих цепочек профилей давления), позволяют проследить эволюцию ДВ в процессе распространения по пузырьковой среде. Осциллограммы на рис. 4, а — сигналы датчиков давления 1 и 2, расстояние между которыми составляет 70 мм. Датчики давления 3 и 4, осциллограммы сигналов которых представлены на рис. 4, б, расположены диаметрально противоположно в одном сечении ударной трубы на расстоянии 170 мм от датчика 1.

Нестабильность профиля давления в процессе распространения волны указывает на квазистационарный характер пузырьковой детонации. Отмеченное свойство ДВ может быть обусловлено проявлением следующего обстоятельства. Пузырьки в жидкости распределены хаотично. Среднее расстояние между пузырьками при этом $\theta = d_0 \left(\frac{1}{18} \right)^{1/3} \left(\frac{\pi}{\beta_0} \right)^{1/3}$ (d_0 — диаметр пузырьков). В системе Ж — $(C_2H_2 + 2,5O_2)$ при $\beta_0 = 0,5 \%$ (см. рис. 4) $\theta \approx 5,2 d_0 \approx 10 + 15$ мм. Протяженность волны детонации в данном случае $\lambda = D\tau_b \approx 60 + 80$ мм ($D = 1130$ м/с, $\tau_b = 50 + 70$ мкс). Таким образом, детонационный процесс затрагивает одновременно примерно $N = \frac{\lambda}{\theta} \approx 6$ слоев пузырьков. В этих условиях возможные отклонения от равномерного распределения пузырьков в жидкости могут вызвать нарушение стационарности ДВ.

Следствием квазистационарного характера детонационных волн в пузырьковых средах является значительный разброс амплитуды осредненных профилей давления. На рис. 5 приведены результаты измерения давления

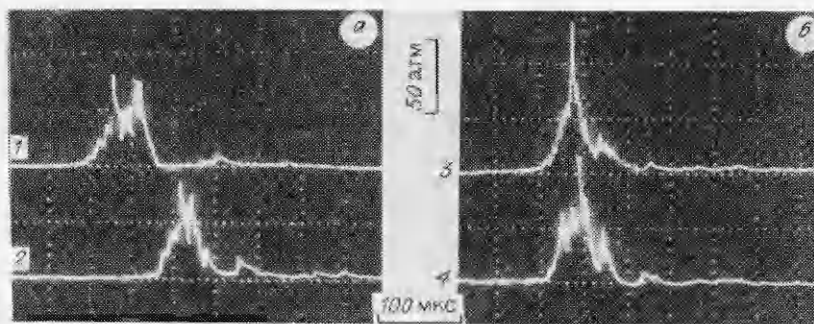


Рис. 4. Осциллограммы осредненных профилей ДВ; Ж(0,25) — $(\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5 \text{O}_2)$, $\beta_0 = 0,5 \%$.

ДВ в различных системах, полученные при осреднении пульсаций давления с помощью интегрирующих цепочек (каждая точка — среднее 5—10 опытов). Заметим, что вследствие отмеченных выше обстоятельств, сопутствующих процедуре осреднения пульсаций давления, приведенные данные носят качественный характер. Тем не менее результаты, полученные в одной постановке эксперимента, позволяют сравнить параметры ДВ в различных средах. Наибольшее давление имеет ДВ в системах, содержащих пузырьки стехиометрической ацетиленокислородной смеси. С уменьшением реакционной способности систем давление ДВ падает.

Данные для ацетиленосодержащих систем представлены в виде зависимостей эффективного (осредненного) давления волны детонации p_1 от относительного энергосодержания среды Q_0 . В однокомпонентных системах $Q_0 = \frac{x}{x+y} = x$; в многокомпонентных средах $Q_0 = \frac{\beta_1}{\beta_1 + \beta_2} = \frac{\beta_1}{\beta_0}$. Введение параметра относительного энергосодержания среды позволяет провести сопоставление одно- и многокомпонентных систем.

Общий вид зависимостей $p_1(Q_0)$ в исследованных системах качественной сходный (см. рис. 5): уменьшение энергоемкости среды при разбавлении химически активной газовой смеси в пузырьках неактивным газом (однокомпонентные системы) или при добавлении в жидкость наряду с химически активными пузырьками газа неактивных пузырьков (многокомпонентные среды) ведет к уменьшению давления волны детонации. Так, уменьшение относительного энергосодержания системы Ж(0,5) — $[x(\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5 \text{O}_2) + y\text{Ar}]$ от 1 до 0,025 приводит к снижению давления волны в ≈ 10 раз.

В рассматриваемых системах наряду с общими механизмами потерь энергии ДВ присутствуют и специфические механизмы: в однокомпонентных средах часть химической энергии идет на нагрев содержащегося в пузырьках химически неактивного газа, в многокомпонентных системах часть энергии поглощается химически неактивными пузырьками. Параметры волны детонации зависят от вида системы: давление волны в однокомпонентной системе выше, чем в многокомпонентной. Таким образом, меха-

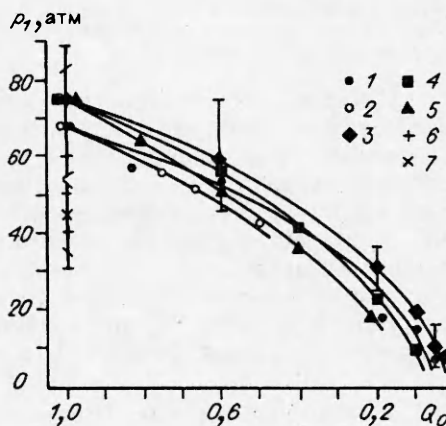


Рис. 5. Зависимости $p_1(Q_0)$; Ж(α) — $(x\Gamma_1 + y\Gamma_2)$ (1, 3—5), Ж(α) — $(\beta_1\Gamma_1 + \beta_2\Gamma_2)$ (2); ($\alpha = 0,25$ (1, 2), 0,5 (3—5); Γ_1 — $(\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5 \text{O}_2)$; Γ_2 — Ar (1—3), He (4), N_2 (5)); Ж(0,5) — $(2\text{H}_2 + \text{O}_2)$ (6); (BM-3) — O_2 (7).

низ диссипации энергии волны детонации в многокомпонентных средах более эффективен, чем в однокомпонентных системах.

На величину давления ДВ влияют свойства жидкого компонента системы и свойства неактивных газов, которыми разбавляется химически активная газовая смесь в пузырьках. С уменьшением вязкости жидкого компонента системы давление ДВ снижается (влияние вязкости жидкости на скорость распространения волны изучено в [2, 3]). Давление в системе, содержащей в качестве разбавителя He, ниже, чем в случае с Ar. В свою очередь, влияние двухатомного газа (N_2) сильнее, чем одноатомных (Ar, He).

В исследованном диапазоне концентраций газовой фазы ($0,5 \leq \beta_0 \leq 6\%$) давление волны детонации от газосодержания не зависит.

Данные, приведенные на рис. 5, свидетельствуют о том, что энергосодержание среды является основным фактором, определяющим величину давления волны детонации. Влияние остальных параметров системы оказывается второстепенным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сычев А.И. Волна детонации в системе жидкость — пузырьки газа // ФГВ. — 1985. — 21, № 3. — С. 103—110.
2. Пинаев А.В., Сычев А.И. Структура и свойства детонации в системах жидкость — пузырьки газа // Там же. — 1986. — 22, № 3. — С. 109—118.
3. 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.
4. Сычев А.И. Детонационные волны в многокомпонентных пузырьковых средах // Там же. — 1993. — 29, № 1. — С. 110—117.

630090, г. Новосибирск,
ИГиЛ СО РАН

Поступила в редакцию
25/VIII 1993

УДК 539.374 + 624.131

Л.А. Мержиевский, А.В. Тягельский

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО СЖАТИЯ ПОРИСТОГО ЖЕЛЕЗА

Построено соотношение, замыкающее модель пористой среды, которая базируется на максвелловских представлениях о механизмах необратимой деформации. Полученный вариант модели учитывает влияние размера зерен (частиц) на процесс динамического сжатия. Для конкретизации модели использованы экспериментальные данные об однородном сжатии образцов пористого железа. Рассчитаны ударные адиабаты. Результаты сравниваются с данными независимых экспериментов. Проанализирована эволюция импульсов сжатия конечной длительности, распространяющихся по пористому полупространству. Показано влияние размера зерен на ударно-волновые процессы в пористой среде. Установлена возможность проведения оценок напряжения (давления) в затухающей ударной волне по известной массовой скорости и ударной адиабате.

Интерес к изучению поведения пористых материалов при динамических нагрузках связан как с научными задачами, так и с технологическими вопросами, возникающими при прессовании. Важнейшая особенность пористых материалов — высокая способность поглощать энергию. Это позволяет изготавливать из них эффективные устройства для локализации действия взрывных и ударных нагрузок. Другое, весьма важное применение пористых материалов — это их использование в исследованиях, проводимых с целью построения уравнений состояния веществ при высоких плотностях энергии. В данном случае пористые материалы позволяют существенно расширить диапазон достигаемых в экспериментах термодинамических пара-

© Л.А. Мержиевский, А.В. Тягельский, 1994.