

ПУЗЫРЬКОВАЯ ДЕТОНАЦИЯ В ПОЛИДИСПЕРСНЫХ СРЕДАХ

УДК 534.222.2:532.529

А. И. Сычев

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

Экспериментально исследованы детонационные волны в полидисперсных пузырьковых средах. Получены данные о критических условиях инициирования, структуре и свойствах волн детонации. Проведено сопоставление характеристик детонационных волн в поли- и монодисперсных средах. Изучено поведение пузырьков газа различного диаметра в волне детонации.

Волна детонации в пузырьковых средах — самоорганизующийся процесс. Характеристики волны определяются физико-химическими свойствами пузырьковой среды. В свою очередь, процессы в среде (сжатие и воспламенение пузырьков газа) зависят от параметров волны.

Диаметр пузырьков газа в жидкости — важный параметр системы, определяющий характеристики волны детонации. Предшествующие экспериментальные исследования пузырьковой детонации выполнены на примере монодисперсных сред (МДС): изучено распространение волн детонации в различных средах, содержащих пузырьки газа одного заданного размера. Детонационные волны в полидисперсных средах (ПДС), т. е. в системах, жидкость в которых содержит одновременно пузырьки газа различного размера, не исследованы.

Цель данной работы — выяснить влияние присутствия в жидкости пузырьков газа различного диаметра на характеристики волны детонации.

Экспериментальные исследования выполнены на вертикально расположенной ударной трубе высотой $\sim 4,3$ м с внутренним диаметром 40 мм, которая состоит из секций высокого и низкого давления с разрывной диафрагмой между ними [1]. Секцию низкого давления заполняли жидкостью, пузырьки в которой формировались при прохождении газа через систему капилляров (высота столба пузырьковой среды 3,6 м).

Объемную концентрацию газовой фазы β_0 определяли по подъему столба газожидкостной среды при всплытии пузырьков газа в жидкости. Опыты проводили при $0,5 \leq \beta_0 \leq 6$ %. Давление на поверхности пузырьковой среды было равно атмосферному.

Пузырьковую детонацию инициировали ударными волнами (УВ), генерируемыми в газожидкостной среде при сжигании ацетиленокислородной стехиометрической смеси в секции высокого давления. Интенсивность инициирующих УВ варьировали изменением начального давления взрывчатой газовой смеси.

Параметры детонационных волн (ДВ) регистрировали пьезоэлектрическими (керамика ЦТС) датчиками давления, сигналы с которых подавали на осциллографы С9-16, С8-17 и ОК-33М (постоянная времени измерительной цепи каждого датчика $> 10^{-3}$ с). Свечение пузырьковой среды, сопровождающее детонационный процесс, фиксировали фотоэлектронным умножителем ФЭУ-102, оптический ввод которого располагался диаметрально про-

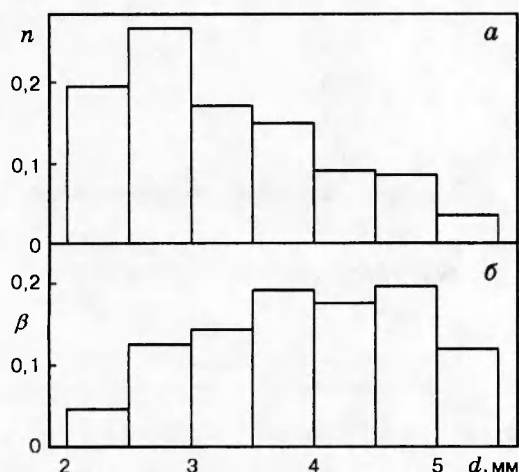


Рис. 1. Распределение пузырьков газа по размерам (а) и относительное газосодержание (б) ($\alpha = 0,25$)

тивоположно датчику давления. Регистрацию ДВ осуществляли через окно оптической секции скоростным фоторегистратором в режимах фоторазвертки и покадровой съемки (теневая картина с подсветкой импульсной лампой ИФП-250).

Детонационные волны изучены в системах химически неактивная жидкость — пузырьки взрывчатого газа: жидкость — водоглицериновые растворы с объемной концентрацией глицерина $\alpha = 0, 0,25, 0,5$ (вязкость растворов $\mu = (1,01, 2,27, 6,84) \cdot 10^{-3}$ Па·с соответственно); газ — ацетиленокислородная стехиометрическая смесь $C_2H_2 + 2,5O_2$.

На рис. 1,а показано распределение пузырьков газа $n = N_i/N_0$ по размерам в ПДС, где N_i — число пузырьков газа в единице объема, имеющих диаметр $d = d_i$ в диапазоне $2,0 \leq d_i \leq 5,5$ мм, N_0 — общее число пузырьков газа в единице объема пузырьковой среды. На рис. 1,б дано распределение относительной газовой концентрации $\beta = \beta_i/\beta_0$ в зависимости от диаметра пузырьков газа; здесь β_i — концентрация газа, содержащегося в пузырьках данного диапазона размеров, β_0 — общая концентрация газовой фазы пузырьковой среды. Распределения пузырьков газа по размерам в жидкостях с $\alpha = 0$ и $0,5$ имеют аналогичный характер. Изучены также ДВ в МДС, жидкость в которых содержала пузырьки газа заданного диаметра $d = d_{1-4}$ ($d_1 = 1,9 \pm 0,1$, $d_2 = 2,5 \pm 0,2$, $d_3 = 3,9 \pm 0,2$, $d_4 = 5,1 \pm 0,3$ мм).

Распределение пузырьков газа в жидкости в ПДС и МДС хаотичное. Форма пузырьков несферичная. Пузырьки газа представляют собой сплюснутые эллипсоиды вращения (сфероиды). Отклонение формы пузырьков газа от сферической возрастает с увеличением диаметра пузырьков и уменьшением вязкости жидкого компонента системы. Деформация формы пузырьков газа происходит вследствие гидродинамического воздействия при всплытии пузырьков в жидкости. Эффективный диаметр пузырьков газа в ПДС и МДС определялся из условия равенства объемов сфероида и сферы: $d = a(b/a)^{1/3}$ (a, b — большая и малая оси сфероида).

Волны пузырьковой детонации в ПДС и МДС — это уединенные волны с пульсационным профилем давления (рис. 2). Свечение газожидкостной среды также имеет пульсационный характер. Пульсации давления и свечения являются следствием генерирования ударных волн и светового излучения пузырьками газа, воспламенившимися в ДВ. Стохастичность пульсаций давления и свечения обусловлена хаотичностью распределения пузырьков газа в жидкости.

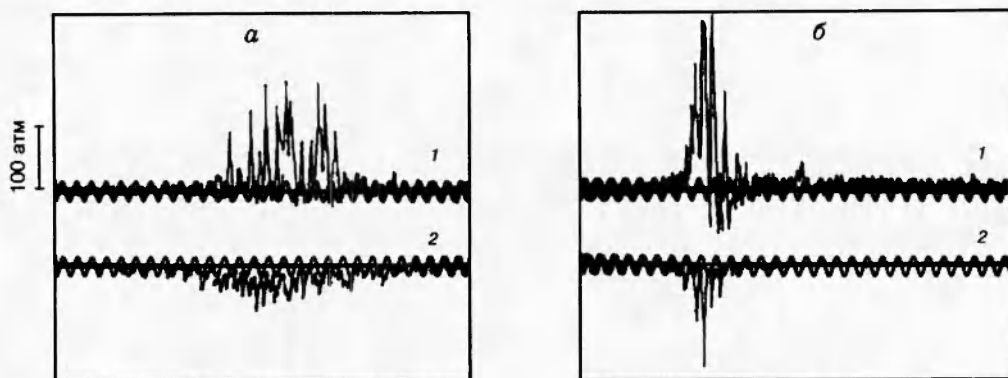


Рис. 2. Осциллограммы давления ДВ (1) и свечения пузырьковой среды (2):
 а — ПДС, $\alpha = 0,25$, $\beta_0 = 2\%$; б — МДС, $d = d_2$, $\alpha = 0,5$, $\beta_0 = 0,5\%$; период синусоиды
 $T = 10$ мкс

Количественные характеристики ДВ зависят от свойств пузырьковой среды. Так, длительность ДВ (на уровне 0,1 от максимума давления) в ПДС $\tau_b \simeq 120$ мкс. В МДС длительность ДВ определяется размером пузырьков газа: $\tau_b \simeq 25, 30, 40, 50$ мкс в системах с пузырьками газа диаметром $d = d_1, d_2, d_3$ и d_4 соответственно. При этом τ_b не зависит от концентрации газовой фазы и вязкости жидкого компонента пузырьковых сред.

Отметим, что величина τ_b при постоянных параметрах системы колеблется от опыта к опыту в широком диапазоне ($\pm 20 \div 50\%$). Разброс значений τ_b , обусловленный отклонением распределения пузырьков газа в жидкости от равномерного [2], уменьшается с увеличением β_0 . Приведенные данные получены усреднением результатов 10–15 опытов.

Таким образом, в МДС имеет место корреляция между размером пузырьков газа и длительностью ДВ; в ПДС присутствие в системе пузырьков газа различного размера приводит к возрастанию длительности ДВ по сравнению со значениями τ_b в сопоставимых МДС, т. е. в системах, содержащих пузырьки газа, диаметр которых находится в диапазоне размеров пузырьков в ПДС.

Регистрируемая амплитуда пульсаций давления ДВ, длительность которых $\tau_{\text{п}} = 5 \pm 2$ мкс, достигает $150 \div 400$ атм. Давление в максимуме осредненного по пульсациям (по методике [2]) профиля ДВ имеет значение $\Delta p = 60 \div 80$ атм для всех исследованных систем. За волной давление близко к давлению в невозмущенной среде.

На рис. 3 приведены результаты измерения скорости распространения ДВ в различных ПДС и МДС (каждая точка — среднее значение нескольких опытов). Характер зависимостей $D(\beta_0)$ во всех исследованных системах является общим: с увеличением β_0 скорость распространения волн детонации D снижается. С уменьшением вязкости жидкого компонента системы μ значение D падает.

В МДС скорость волн детонации максимальна при некотором определенном диаметре пузырьков газа. Влияние размера пузырьков газа на характеристики ДВ изучено в [3–5]. При $\alpha = 0,5$ и $0,25$ значения D в ПДС при данном распределении пузырьков газа (см. рис. 1, б) лежат в диапазоне изменения скорости детонации в сопоставимых МДС. При $\alpha = 0$ волна детонации в МДС отсутствует в системах, содержащих пузырьки газа диаметром $d \geq d_4$ (при $\beta_0 \geq 2\%$) и $d \leq d_1$ ($\beta_0 \geq 4\%$). В ПДС детонация отсутствует во всем диапазоне изменения β_0 при $\alpha = 0$.

Существование ДВ возможно при условии, что энергетические потери волны ком-

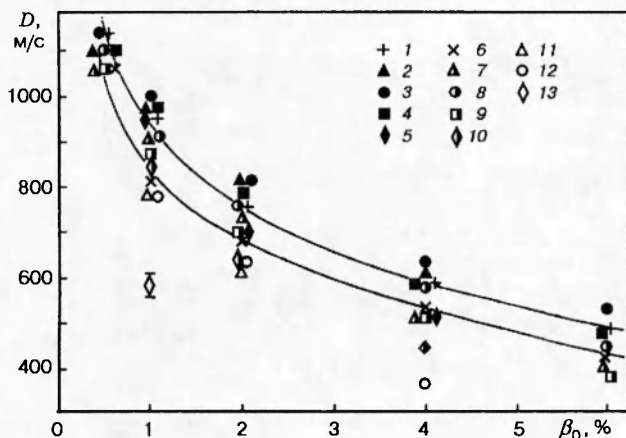


Рис. 3. Зависимости $D(\beta_0)$ для ПДС (1, 6) и МДС (2-5, 7-13):
 $\alpha = 0,5$ (1-5), $0,25$ (6-10) и 0 (11-13);
 2, 7, 11 — $d = d_1$, 3, 8, 12 — $d = d_2$,
 4, 9 — $d = d_3$, 5, 10, 13 — $d = d_4$

пенсируются химической энергией, выделяющейся в среде при ее распространении. Если энергоемкость среды становится ниже некоторого значения или энергопотери ДВ возрастают выше критической величины, существование ДВ оказывается невозможным. При фиксированном газосодержании энергоемкости МДС и ПДС равны. Следовательно, тот факт, что ДВ существуют в МДС и отсутствуют в ПДС (при $\alpha = 0$) указывает на то, что энергопотери ДВ в ПДС выше, чем в МДС. Таким образом, область существования волны детонации в ПДС уже области в сопоставимых МДС.

Вне области существования детонации инициирующая УВ может воспламенять пузырьки газа в жидкости, но по мере распространения УВ ослабевает, и воспламенение пузырьков прекращается. С увеличением вязкости жидкого компонента системы пределы существования ДВ расширяются.

Критическое значение давления инициирующей УВ p_1^* возрастает при увеличении β_0 и уменьшении μ . В МДС величина p_1^* зависит от диаметра пузырьков газа: наименьшие значения p_1^* наблюдаются в системах с пузырьками газа диаметром $d = d_2$. В исследованных МДС $p_1^* = 17 \div 60$ атм. В ПДС $p_1^* = 17$ и $17 \div 34$ атм при $\alpha = 0,5$ и $0,25$ соответственно. При $\alpha = 0$ самоподдерживающиеся режимы детонации отсутствуют: при значениях давления инициирующих УВ до 60 атм наблюдаются лишь пересжатые ДВ, затухающие по мере ослабления поддерживающей УВ.

Результаты оптических исследований иллюстрируют процесс взаимодействия пузырьков газа различного диаметра с волной детонации в ПДС (рис. 4). Повышение давления в среде при распространении ДВ приводит к сжатию и воспламенению пузырьков газа. Высвобождение химической энергии вызывает повышение давления газа в пузырьке, сжатие прекращается, и пузырек расширяется. После расширения возможны последующие более слабые сжатия и расширения пузырьков газа.

Время сжатия пузырьков газа до момента воспламенения τ_c зависит от диаметра: в ПДС $10 \leq \tau_c \leq 40$ мкс для пузырьков газа диаметром $d = d_i$; в МДС $\tau_c = 10-15, 15-20, 20-30, 30-40$ мкс для пузырьков диаметром $d = d_1, d_2, d_3$ и d_4 соответственно.

Воспламенение взрывчатого газа в пузырьках различного диаметра происходит при степени сжатия $d/d_{\text{восп}} = 3-4$, где $d_{\text{восп}}$ — диаметр пузырьков при воспламенении. В МДС пузырьки газа воспламеняются в области максимального давления в ДВ [6, 1]. В процессе взаимодействия пузырьков газа с ДВ давление в волне и степень сжатия пузырьков изменяются синфазно. Время расширения пузырьков газа до первоначального размера $\tau_p \simeq$

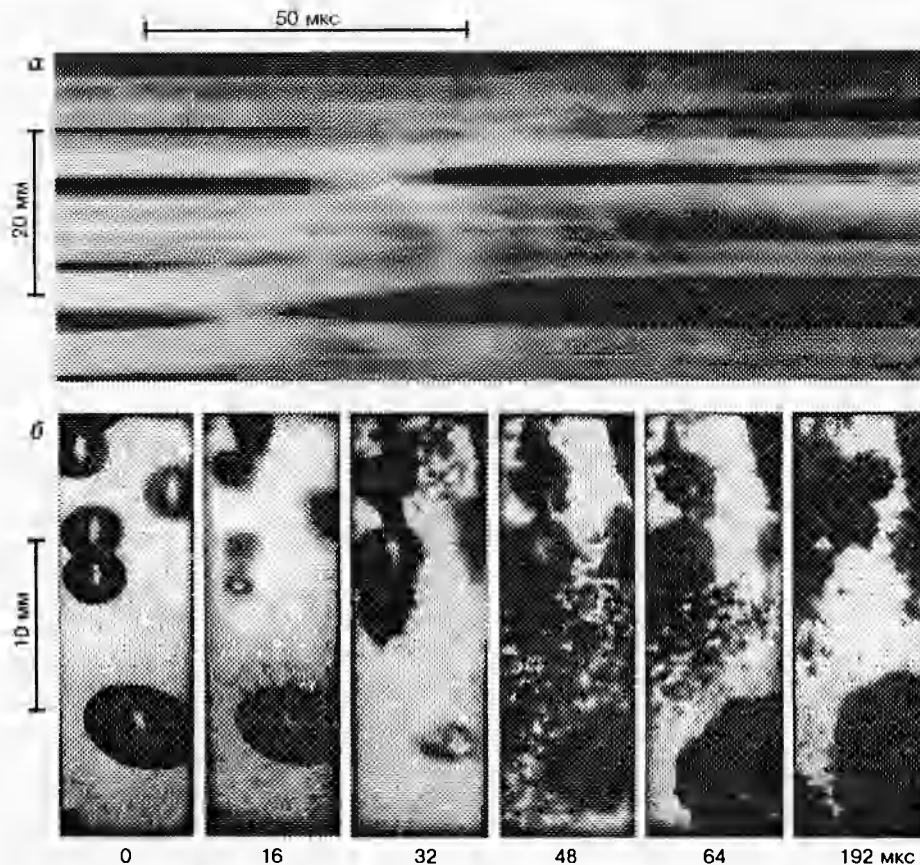


Рис. 4. Фоторегистрограмма (а) и кинограмма (б) пузырьков газа в ДВ (ПДС, $\alpha = 0,5$, $\beta_0 = 1,5\%$)

$(0,6-0,8)\tau_c$. В МДС время сжатия — расширения пузырьков газа $\tau_{ср} = \tau_c + \tau_p$ в ДВ коррелирует с длительностью волны τ_b , при этом $\tau_{ср} \simeq \tau_b$ (явление резонанса [7]). В ПДС $\tau_b > \tau_{ср}$ для всех пузырьков газа, содержащихся в жидкости.

Таким образом, в МДС процесс взаимодействия ДВ с пузырьками газа имеет резонансный характер: длительность ДВ примерно равна времени сжатия — расширения пузырьков газа в ДВ. В ПДС в силу того, что временные характеристики процесса взаимодействия пузырьков газа с ДВ зависят от диаметра и потому различны для пузырьков разного размера, условие резонанса нарушается.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сычев А. И. Детонационные волны в многокомпонентных пузырьковых средах // Физика горения и взрыва. 1993. Т. 29, № 1. С. 110–117.
2. Сычев А. И. Структура волны пузырьковой детонации // Физика горения и взрыва. 1994. Т. 30, № 4. С. 119–124.
3. Сычев А. И. Влияние размера пузырьков на характеристики волн детонации // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31, № 5. С. 83–91.
4. Gulhan A., Beylich A. E. Detonation wave phenomena in bubbled liquid // Proc. 17th Int. Symp. on Shock Waves and Shock Tubes, Bethlehem, USA, 1989 / Yong W. Kim (Ed.). New York: Amer. Inst. of Physics, 1990.

5. Scarinci T., Bassin X., Lee J. H. S., Frost D. L. Propagation of reactive wave in a bubbly liquid // Proc. 18th Int. Symp. on Shock Waves, Sendai, Japan, 1991 / K. Takayama (Ed.). Heidelberg, Hong Kong: Springer-Verl., 1992.
6. 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.
7. 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.

*Поступила в редакцию 11/VI 1996 г.,
в окончательном варианте — 11/XI 1996 г.*
