

УДК 534.222.2

УПРАВЛЯЕМАЯ ПУЗЫРЬКОВАЯ ДЕТОНАЦИЯ

© 2019 г. А. И. Сычев*

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск, Россия

*E-mail: sychev@hydro.nsc.ru

Поступила в редакцию 25.09.2017 г.

После доработки 03.08.2018 г.

Принята к печати 10.10.2018 г.

Экспериментально исследовано влияние параметров моно- и полидисперсных одно- и многокомпонентных пузырьковых сред на условия инициирования, структуру, скорость распространения и давление детонационных волн. Установлено, что варьирование параметров пузырьковой среды, в частности начального давления, является эффективным способом управления характеристиками волн детонации.

DOI: 10.1134/S0040364419020224

ВВЕДЕНИЕ

Детонация – явление универсальное. Детонационные волны существуют в разнообразных однородных и гетерогенных средах. Несмотря на различия в строении и в физико-химических свойствах систем, волны детонации во всех средах обладают общими признаками: детонация – самоподдерживающийся процесс. Данное обстоятельство обусловлено проявлением общего для всех систем свойства – химической активности. Именно наличие энерговыделения в среде обеспечивает возможность существования волн детонации. В свою очередь, структурные особенности и физико-химические свойства систем определяют специфические черты детонационных волн в той или иной среде.

Детонация в пузырьковых средах – уникальное явление: волны пузырьковой детонации способны существовать в системах с чрезвычайно низким энергосодержанием. Обладая общими для всех волн детонации признаками (это самоподдерживающийся автоволновой стационарный процесс), волна пузырьковой детонации имеет ряд особенностей, проявляющихся в структуре, свойствах и механизме распространения.

Химически активные пузырьковые среды разнообразны: жидкий компонент среды может содержать пузырьки, различающиеся как по размерам, так и по составу газов; при этом химически взаимодействующие вещества могут находиться в газовой или (и) в жидкой фазе. Данные обстоятельства обуславливают существование химически активных пузырьковых сред, различающихся как структурно, так и качественно.

Выделим следующие виды пузырьковых сред – системы, жидкость в которых содержит пузырьки газа:

- монодисперсные – одного размера;
- полидисперсные – различных размеров;
- однокомпонентные – одного сорта;
- многокомпонентные – нескольких сортов.

Выделим также следующие типы химически активных пузырьковых сред [1]: I – химически неактивная жидкость–пузырьки химически активного газа; II – жидкое горючее (или окислитель)–пузырьки окислителя (или горючего); III – химически активная жидкость–пузырьки химически неактивного газа; IV – химически активная жидкость–пузырьки химически активного газа.

Явление пузырьковой детонации обладает большой общностью: детонационные волны обнаружены в пузырьковых средах различной структуры качественно различного типа (I и II). Пузырьковые среды – это многопараметрические системы, характеристики детонационных волн в которых определяются многими факторами: скорость распространения и давление волн детонации зависят как от параметров пузырьковой среды, так и от свойств газового и жидкого компонентов системы. Возможность распространения волны детонации как автоволнового процесса обеспечивается энерговыделением в среде, компенсирующим энергозатраты волны на необратимое преобразование среды. В пузырьковых средах типа I вещества, способные к энерговыделению, находятся в газовой фазе (в пузырьках газа). При изменении начального давления среды с заданной объемной концентрацией газовой фазы массовая концентрация газа и, следовательно, энергосодержание системы меняются. Таким об-

разом, начальное давление пузырьковой среды является важным параметром, влияющим на характеристики детонационных волн и определяющим саму возможность существования явления детонации.

Цель работы – выявить общие и специфические черты детонационных волн в разнообразных пузырьковых средах, изучить влияние параметров пузырьковых сред, в частности начального давления, на условия инициирования, структуру, скорость и давление детонационных волн и установить возможность управления характеристиками волн пузырьковой детонации.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

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 заполнялась жидкостью, в которой пузырьки газа генерировались форсункой, установленной в торце ударной трубы. Высота столба пузырьковой среды с объемной концентрацией газовой фазы в диапазоне $0.5 \leq \beta_0 \leq 6\%$ составляла 3.55 м.

Иницирование пузырьковой детонации осуществлялось ударными волнами, генерируемыми в пузырьковых средах при сжигании горючего газа (ацетилено-кислородная стехиометрическая смесь $C_2H_2 + 2.5O_2$) в секции высокого давления ударной трубы; амплитуда (давление) инициирующих ударных волн варьировалась изменением начального давления газовой смеси [1]. При этом амплитуда ударных волн соответствует давлению, развивающемуся над поверхностью пузырьковой среды при сгорании горючего газа в замкнутом объеме секции высокого давления ударной трубы [2]. Данный способ генерирования ударных волн в газожидкостных средах позволяет создавать волны с амплитудами, изменяемыми в широком диапазоне [3].

Параметры детонационных волн (скорость, давление и длительность) определялись с помощью пьезоэлектрических датчиков давления, установленных по длине ударной трубы. Сигналы датчиков давления регистрировались осциллографами С9-16. Свечение пузырьковых сред, сопровождающее процесс распространения детонационных волн, фиксировалось фотоэлектронными умножителями ФЭУ-102, оптические входы которых располагались диаметрально противоположно датчикам давления.

Изучено несколько различных видов химически активных пузырьковых сред типа I.

– Однокомпонентные монодисперсные среды (ОКМДС) $L(\alpha) - \beta_0 G$, где $L(\alpha)$ – водно-глицери-

новые растворы с объемной концентрацией глицерина $\alpha = 0, 0.25$ или 0.5 (вязкость растворов $\mu = 1.01 \times 10^{-3}, 2.27 \times 10^{-3}$ и 6.84×10^{-3} Па с соответственно); G – пузырьки химически активного газа ($C_2H_2 + 2.5O_2$) заданного диаметра $d = d_i$ ($i = 1-4$): $d_1 = 1.9 \pm 0.1, d_2 = 2.5 \pm 0.1, d_3 = 3.9 \pm 0.2$ и $d_4 = 5.0 \pm 0.3$ мм; β_0 – объемная концентрация газовой фазы пузырьковой среды.

– Многокомпонентные среды (МКС) $L(\alpha) - (\beta_1 G_1 + \beta_2 G_2)$, где $\alpha = 0.25$ или 0.5 ; G_1 – химически активный газ ($C_2H_2 + 2.5O_2$); G_2 – химически неактивный газ Ar, He, N_2 или H_2 ; β_1, β_2 – объемные концентрации газов G_1 и G_2 ; $\beta_0 = \beta_1 + \beta_2$.

– Полидисперсные среды (ПДС) $L(\alpha) - \beta_0 G$, где $\alpha = 0, 0.25$ или 0.5 ; G – смесь пузырьков химически активного газа ($C_2H_2 + 2.5O_2$) диаметром $d_1 - d_4$ при примерно равном газосодержании для пузырьков различных размеров.

Иницирование детонации заключается в актуализации химической энергии среды. Активация химических реакций возможна при определенных условиях, основным из которых является соответствующая температура взаимодействующих веществ. Обнаружено, что распространение ударных волн в пузырьковых средах сопровождается явлениями, свидетельствующими о высоких температурах газа, достигаемых в процессе сжатия пузырьков при повышении давления в среде: в инертных пузырьковых средах ударные волны вызывают свечение газа в пузырьках [4]; в химически активных пузырьковых средах ударные волны воспламеняют химически взаимодействующие вещества, содержащиеся в среде [1]. Энерговыделение в химически активных пузырьковых средах, инициируемое ударной волной, приводит к формированию самоподдерживающегося волнового процесса – волны детонации. Явление детонации в пузырьковых средах обнаружено в [2]. Теоретическому изучению детонационных волн в пузырьковых средах посвящены работы [5–24].

Воспламенять химически активные вещества и инициировать детонацию в пузырьковых средах способны ударные волны с амплитудой p_1 выше критической p_1^* [1, 2]. При этом характеристики волны детонации не зависят от амплитуды инициирующей ударной волны и определяются свойствами и параметрами пузырьковой среды [2, 25]: детонация в пузырьковых средах является автоволновым процессом. Критическая амплитуда ударной волны p_1^* возрастает при увеличении концентрации газовой фазы и уменьшении вязкости жидкого компонента среды и находится в диапазоне 1.7–6.0 МПа в ОКМДС с $\alpha = 0, 0.25$ и 0.5 при $\beta_0 \leq 6\%$ и атмосферном начальном давлении [2, 25]. В системах с $\alpha = 0.5$ при $\beta_0 \leq 2\%$ и начальном давлении пузырьковой среды p в

диапазоне от атмосферного p_0 до 2 кПа детонация инициируется ударными волнами с амплитудами $p_1^* \leq 1.7$ МПа.

В МКС при атмосферном начальном давлении значения p_1^* зависят как от общей концентрации газовой фазы пузырьковой среды, так и от соотношения концентраций активных и неактивных пузырьков [26, 27]. Так, в системе $L(0.25) - [\beta_1(C_2H_2 + 2.5 O_2) + \beta_2 Ar]$ при $\beta_2 \leq 1\%$ $p_1^* \leq 1.7$ МПа ($\beta_0 \leq 4\%$) и $p_1^* = 3.4$ МПа ($\beta_0 = 6\%$); при $\beta_2 = 2\%$ $p_1^* = 3.4$ МПа ($\beta_0 = 4\%$) и $p_1^* = 4.3$ МПа ($\beta_0 = 6\%$). Значения p_1^* повышаются при увеличении β_0 или β_2 . В системах с $\alpha = 0.5$ при $\beta_0 \leq 2\%$ и начальном давлении среды в диапазоне от атмосферного до 2 кПа пузырьковая детонация инициируется ударными волнами с $p_1^* \leq 1.7$ МПа.

Значения p_1^* в ПДС при атмосферном начальном давлении возрастают при увеличении концентрации газовой фазы и при уменьшении вязкости жидкого компонента среды [28]: $p_1^* = 1.7$ и 1.7–3.4 МПа в системах с $\alpha = 0.5$ и 0.25 соответственно при $0.5 \leq \beta_0 \leq 6\%$. В ОКМДС p_1^* зависит от диаметра пузырьков газа [29]: наименьшие значения p_1^* наблюдаются в системах с пузырьками газа диаметром $d = d_2$; при $\alpha = 0, 0.25$ и 0.5 $p_1^* = 1.7$ –6.0 МПа. В ПДС с $\alpha = 0$ самоподдерживающиеся режимы детонации отсутствуют: при $p_1 < 6.0$ МПа наблюдаются лишь “пересжатые” детонационные волны, затухающие по мере ослабления поддерживающей инициирующей ударной волны; при $\alpha = 0.5, \beta_0 = 0.5\%$ и начальном давлении среды в диапазоне от атмосферного до 10 кПа волны детонации инициируются ударными волнами с амплитудами $p_1^* \leq 1.7$ МПа.

Структура пузырьковых сред определяет специфические особенности пузырьковой детонации (рис. 1) [30]. Детонационные волны в ОКМДС имеют пульсационный профиль давления (рис. 1а). Пульсации давления являются следствием генерирования ударных волн пузырьками газа, воспламенившимися в результате сжатия в детона-

ционной волне. Воспламенение и горение газовой смеси в пузырьках сопровождается также световым излучением, регистрируемым фотоэлектронным умножителем [2]. Стохастичность пульсаций давления и светового излучения обусловлена хаотичностью распределения пузырьков газа в жидкости. Регистрируемая амплитуда пульсаций давления, длительность которых составляет 3–5 мкс, достигает 15–30 МПа.

Волны пузырьковой детонации в МКС и ПДС (как и в ОКМДС) — это уединенные волны с пульсационным профилем давления. Количественные характеристики детонационных волн зависят от вида и параметров пузырьковой среды. В исследованных ПДС длительность волн детонации τ (временная характеристика детонационных волн в пузырьковых средах, измеряемая на уровне 0.1 от максимума давления) равна примерно 120 мкс [28]. В ОКМДС длительность детонационных волн определяется размером пузырьков газа и равна примерно 25, 30, 40 и 50 мкс в системах с пузырьками газа диаметром $d = d_1, d_2, d_3$ и d_4 соответственно [29]; при этом длительность детонационных волн не зависит от концентрации газовой фазы и свойств жидкого компонента пузырьковых сред. Присутствие в ПДС пузырьков газа различных размеров приводит к возрастанию длительности волн детонации по сравнению со значениями длительности детонационных волн в сопоставимых ОКМДС — в системах, содержащих пузырьки газа, диаметр которых находится в диапазоне размеров пузырьков в ПДС. Увеличение длительности позволяет волне детонации взаимодействовать с пузырьками газа различного размера.

Сжатие пузырьков газа протекает в неоднородном поле давления детонационной волны, имеющей пульсационную структуру. Осреднение пульсаций давления позволяет получить эффективный профиль давления волны пузырьковой детонации (см. рис. 1б) (сигналы датчиков давления осреднялись с использованием штатной процедуры цифрового осциллографа С9-16 по 10 точкам при времени дискретизации, равном 1 мкс). Эффективное давление детонационных волн достигает 6–8 МПа во всех исследованных системах при атмосферном начальном давлении [26, 28, 31].

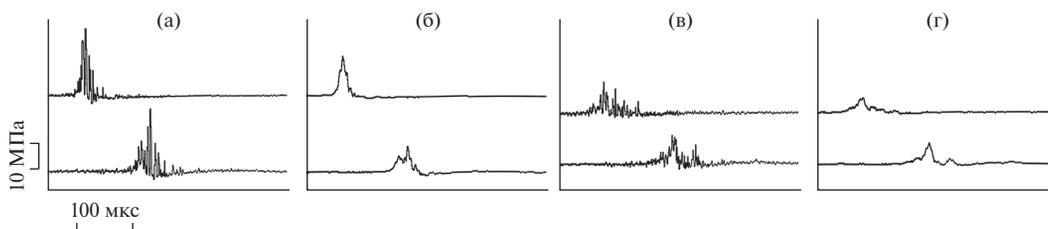


Рис. 1. Осциллограммы давления детонационной волны в ОКМДС до (а), (в) и после (б), (г) осреднения пульсаций давления при $\alpha = 0.5, \beta_0 = 0.5\%$: $p/p_0 = 1$ (а), (б) и 0.02 (в), (г).

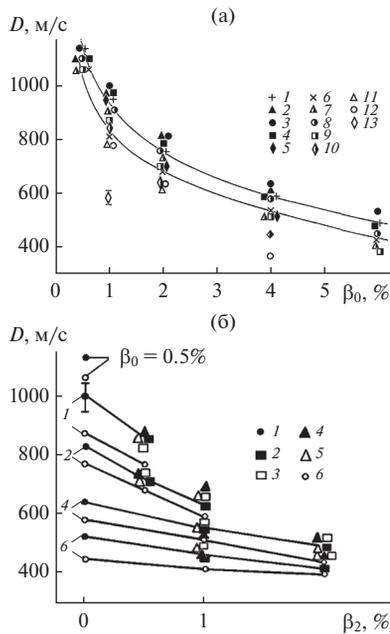


Рис. 2. Зависимости D от β_0 (а) и β_2 (б) при $p = p_0$: (а) – для ПДС (1, 6) и ОКМДС (2–5, 7–13); 1–5 – $\alpha = 0.5$, 6–10 – 0.25, 11–13 – 0; 2, 7, 11 – $d = d_1$; 3, 8, 12 – d_2 ; 4, 9 – d_3 ; 5, 10, 13 – d_4 ; (б) – для МКС: 1 – $L(0.5) - (C_2H_2 + 2.5O_2)$, 2–5 – $L(0.5) - [\beta_1(C_2H_2 + 2.5O_2) + \beta_2Ar]$ (He, N_2 , H_2); 6 – $L(0.25) - [\beta_1(C_2H_2 + 2.5O_2) + \beta_2Ar]$; 2, 6 – $\beta_2 = Ar$, 3 – He, 4 – N_2 , 5 – H_2 .

За волной детонации давление близко к давлению в невозмущенной пузырьковой среде.

Детонационные волны в пузырьковых средах распространяются со скоростью, большей равновесной скорости звука в пузырьковой среде c_0 (согласно формуле Мэллока $c_0 = (\gamma p_0 / \beta_0 \rho_0)^{1/2} < 100$ м/с при $\beta_0 > 1\%$, здесь $\rho_0 = (1 - \beta_0)\rho_l + \beta_0\rho_g$ – плотность пузырьковой среды, ρ_l и ρ_g – плотность жидкости и газа, γ – показатель адиабаты газа), но меньшей скорости звука в жидкости c_l ($c_l = 1500, 1600$ и 1700 м/с при $\alpha = 0, 0.25$ и 0.5 соответственно).

Детонация в пузырьковых средах – это стационарный процесс. На рис. 2 представлены результаты измерения скорости D детонационных волн в различных пузырьковых средах при атмосферном начальном давлении (каждая точка – среднее данных 5–10 опытов). Скорость волн измерялась с помощью датчиков давления или фотоэлектронных умножителей. Характер зависимостей $D(\beta_0)$ является общим для ОКМДС и ПДС (рис. 2а) [28]: с увеличением β_0 скорость волн детонации D снижается. С уменьшением вязкости жидкого компонента системы скорость детонационных волн падает. Существенное влияние вязкости жидкого компонента пузырьковых сред на критические условия инициирования, параметры и пределы распространения волн детонации [1, 2, 25, 26, 28, 32] – эффект “вязкости” – объясняется влия-

нием вязкости на состояние поверхности пузырьков в процессе сжатия в волне детонации и в конечном итоге на величину энергопотерь пузырьков газа. Скорость детонационных волн изменяется в широком диапазоне 450–1350 м/с (рис. 2а). При этом линейная протяженность (длина) детонационных волн λ (пространственная характеристика детонационных волн в пузырьковых средах, определяемая как $\lambda = D\tau$) составляет 2–9 см.

Результаты измерений параметров детонационных волн в МКС при атмосферном начальном давлении представлены на рис. 2б [26], где β_0 служит параметром. Общий вид зависимостей $D(\beta_2)$ при различных значениях β_0 во всех исследованных пузырьковых средах 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 детонационной волной, в результате которого увеличиваются энергетические потери волны детонации (вследствие диссипативных процессов энергия, затрачиваемая волной 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 потери энергии волной детонации. Действие этого фактора существенно: присутствие в системе пузырьков неактивного газа с концентрацией $\beta_2 \sim 0.5\beta_0$ (рис. 2б) оказывается критическим, так как детонационная волна при данных условиях не способна существовать. При достаточной интенсивности инициирующей ударной волны возможно воспламенение пузырьков газа. Однако по мере распространения амплитуда ударной волны уменьшается, и воспламенение пузырьков прекращается; детонационная волна при этом не возбуждается.

Увеличение концентрации активного газового компонента (при данной неизменной общей концентрации газовой фазы) ведет к росту скорости распространения волны детонации. Если возрастает концентрация пузырьков химически неактивного газа, скорость детонационной волны падает вплоть до затухания детонации при концентрации неактивных пузырьков выше критической (концентрационный предел распространения детонационных волн в многокомпонентных пузырьковых средах рассмотрен в [26]).

Детонация в системах, содержащих пузырьки химически неактивного газа, может быть охарактеризована как пузырьковая детонация “с потерями” [26].

Не установлено существенного влияния сорта инертного газового компонента пузырьковой

среды на параметры волны детонации. Различие в физических свойствах газов не влияет заметным образом на скорость распространения детонационной волны (см. рис. 26).

Более существенным является влияние свойств жидкого компонента пузырьковых сред. На рис. 26 приведены результаты измерений скорости распространения детонационных волн в многокомпонентных пузырьковых средах при атмосферном начальном давлении для различной вязкости жидкого компонента. Скорость волн детонации выше в системах с более вязкой жидкостью. Таким образом, параметры детонационных волн в многокомпонентных пузырьковых средах в значительной степени определяются свойствами жидкого компонента среды.

Значения скорости распространения детонационных волн в ПДС при атмосферном начальном давлении среды с $\alpha = 0.5$ и 0.25 находятся в диапазоне изменения скорости волн детонации, сопоставимом с ОКМДС. При $\alpha = 0$ детонация отсутствует во всем диапазоне изменения концентрации газовой фазы среды [28] в отличие от случая ОКМДС: при $\alpha = 0$ детонационные волны отсутствуют в системах, содержащих пузырьки с $d \leq d_1$ (при $\beta_0 \geq 4\%$) и $d \geq d_4$ ($\beta_0 \geq 2\%$). Имеет место предел распространения детонационных волн по диаметру пузырьков газа [29].

Существование детонационных волн возможно при условии, что энергетические потери волны компенсируются химической энергией, выделяющейся в среде при распространении волны. Если энергосодержание среды становится ниже порогового значения или энергопотери волны детонации возрастают выше критической величины, существование детонационной волны оказывается невозможным. При переходе из химически активных в инертные среды или в жидкость волны пузырьковой детонации трансформируются в постдетонационные волны, затухающие по

экспоненциальному закону [33]. При фиксированной концентрации газовой фазы пузырьковой среды энергосодержания ОКМДС и ПДС равны. Следовательно, факт существования детонационных волн в ОКМДС и отсутствия в ПДС (при $\alpha = 0$) указывает на то, что энергопотери волн детонации в ПДС выше, чем в ОКМДС. Таким образом, в ПДС область существования детонации уже, чем в сопоставимых ОКМДС.

Детонация — автоволновой процесс: характеристики волны детонации не зависят от условий инициирования и определяются параметрами среды. При этом детонация является самоорганизующимся процессом. Структура детонационных волн в пузырьковых средах при варьировании начального давления среды остается качественно идентичной (см. рис. 1).

Начальное давление пузырьковой среды оказывает существенное влияние на параметры волны детонации. Понижение начального давления пузырьковой среды (относительно атмосферного) вызывает уменьшение скорости детонационных волн (рис. 3); давление волн детонации при этом уменьшается, а длительность практически не меняется. Установлено, что с повышением начального давления пузырьковой среды (относительно атмосферного) скорость распространения волн детонации растет (рис. 3а). В исследованном диапазоне изменения начального давления среды зависимости $D(p/p_0)$ в ОКМДС при различных концентрациях газовой фазы среды близки к линейным (рис. 3а); при повышении начального давления среды (до 0.7 МПа) скорость детонационных волн (в системах жидкое горючее—пузырьки окислителя) стремится к скорости звука в жидкости [32]. Отличие величин скорости распространения детонационных волн на различных расстояниях от поверхности пузырьковой среды L , обусловленное влиянием гидростатического давления, уменьшается при повышении начального

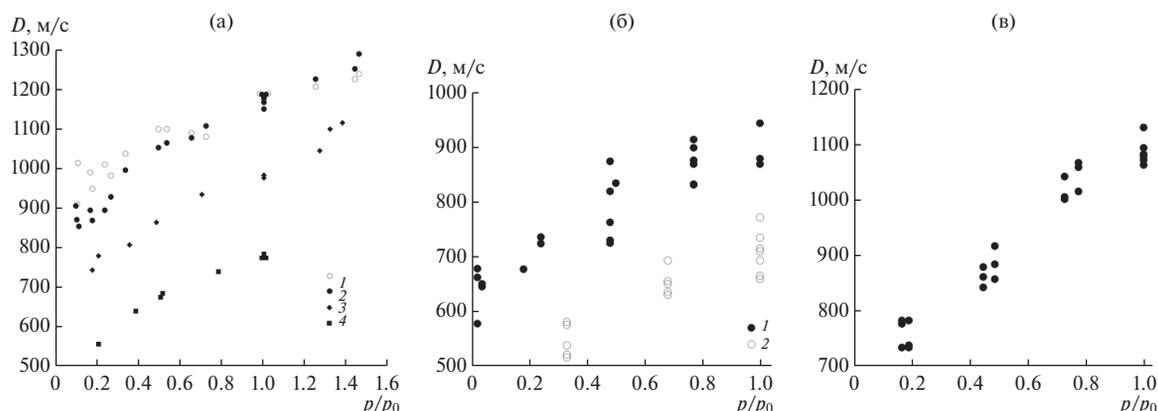


Рис. 3. Зависимости $D(p/p_0)$ при $L = 2.85$ м: (а) — для ОКМДС: 1, 2 — $\alpha = 0.5$, $\beta_0 = 0.5\%$, 3 — 1, 4 — 2%; 1 — $L = 3.10$, 2 — 4 — 2.55 м; (б) — для МКС, $L(0.5) - [\beta_1(C_2H_2 + 2.5 O_2) + \beta_2 N_2]$: 1 — $\beta_1 = \beta_2 = 0.5\%$, 2 — 1; (в) — для ПДС при $\alpha = 0.5$, $\beta_0 = 0.5\%$.

давления пузырьковой среды и становится существенным при $p \geq 0.06$ – 0.08 МПа (рис. 3а). Зависимости $D(p/p_0)$ в МДС и ПДС имеют аналогичный случаю ОКМДС вид (рис. 3б, 3в) [34, 35].

Зависимость параметров детонационных волн от начального давления пузырьковых сред обусловлена сопутствующим изменением энергосодержания системы: при понижении начального давления среды с заданной объемной концентрацией газовой фазы массовая концентрация газа и, следовательно, энергосодержание системы уменьшаются. Действие этого параметра оказывается существенным: скорость распространения волн детонации падает, а давление снижается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Явление пузырьковой детонации обладает большой степенью общности: детонационные волны существуют в системах, различающихся по своим свойствам как количественно, так и качественно, — в моно- и полидисперсных, одно- и многокомпонентных пузырьковых средах. Иницировать детонацию в пузырьковых средах способны ударные волны с амплитудой, большей критической. Значения критической амплитуды инициирующей ударной волны определяются параметрами пузырьковой среды и свойствами газового и жидкого компонентов системы. Детонационный процесс является результатом коллективного взаимодействия пузырьков газа, равномерно распределенных в жидкости: воспламенившиеся в волне детонации пузырьки газа излучают в окружающую жидкость ударные волны, которые сжимают и воспламеняют пузырьки, находящиеся перед детонационной волной. Характеристики детонационных волн не зависят от условий инициирования и определяются параметрами и физико-химическими свойствами пузырьковых сред, детонация — это автоволновой процесс. Структура детонационных волн качественно идентична во всех исследованных средах: волна “пузырьковой” детонации — это уединенная волна с пульсационным профилем, давление за которой релаксирует к величине, близкой к давлению в невозмущенной среде перед волной. Длительность детонационных волн определяется размером пузырьков газа, а эффективное (осредненное по пульсациям) давление детонационных волн — энергосодержанием среды. Скорость распространения волн пузырьковой детонации определяется параметрами среды: с понижением начального давления пузырьковой среды, с увеличением концентрации газовой фазы среды и с уменьшением вязкости жидкого компонента системы скорость волн детонации снижается.

Таким образом, варьирование параметров пузырьковой среды (концентрации газовой фазы, вязкости жидкого компонента, начального давле-

ния) является эффективным способом управления характеристиками волн пузырьковой детонации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сычев А.И. Воспламенение систем жидкость–пузырьки газа ударной волной // ФГВ. 1985. Т. 21. № 2. С. 130.
2. Сычев А.И. Волна детонации в системе жидкость–пузырьки газа // ФГВ. 1985. Т. 21. № 3. С. 103.
3. Сычев А.И. Ударные волны в многокомпонентных средах “жидкость–пузырьки газа–капли жидкости” // ТВТ. 2011. Т. 49. № 3. С. 409.
4. Сычев А.И. Световое излучение ударных волн в пузырьковых средах // Динамика сплошной среды. Акустика неоднородных сред. 2005. Вып. 123. С. 60.
5. Кедринский В.К. Волновые процессы и динамика структуры неоднородных сред при импульсном нагружении // ПМТФ. 1987. Т. 38. № 4. С. 111.
6. Beylich A.E., Gulhan A. Waves in Reactive Bubbly Liquids // Proc. IUTAM Symp. on Adiabatic Waves in Liquid-Vapor Systems. Gettingen, FRG, 1989. P. 39.
7. Красный Ю.П., Михо В.В. Самоподдерживающаяся нелинейная волна детонации в жидкости с пузырьками горючего газа // ФГВ. 1989. Т. 25. № 2. С. 75.
8. Кузнецов Н.М., Конопов В.А. Структура волны и условие Чепмена–Жуге при гетерогенной детонации в жидкостях с пузырьками газа // Докл. АН СССР. 1989. Т. 304. № 4. С. 850.
9. Шаганов В.Ш., Вахитова Н.К. Волны в пузырьковой системе при наличии химических реакций в газовой фазе // ФГВ. 1989. Т. 25. № 6. С. 14.
10. Gulhan A., Beylich A.E. Detonation Wave Phenomena in Bubbled Liquid // 17th Int. Symp. on Shock Waves and Shock Tubes, Bethlehem, USA. 1989 / Ed. Kim Y.W. N.Y., USA: AIP, 1990.
11. Замараев Ф.Н., Кедринский В.К., Мейдер Ч. Волны в химически активной пузырьковой среде // ПМТФ. 1990. № 2. С. 20.
12. Борисов А.А., Шарыпов О.В. О формировании волн пузырьковой детонации // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. 1990. Вып. 2. С. 50.
13. Ляпидевский В.Ю. О скорости пузырьковой детонации // ФГВ. 1990. Т. 26. № 4. С. 138.
14. Троцюк А.В., Фомин П.А. Модель пузырьковой детонации // ФГВ. 1992. Т. 28. № 4. С. 129.
15. Ждан С.А. О стационарной детонации в пузырьковой среде // ФГВ. 2002. Т. 38. № 3. С. 85.
16. Fomin P.A., Mitropetros K., Hieronymus H. Modeling of Detonation Processes in Chemically Active Bubble Systems at Normal and Elevated Initial Pressures // J. Loss Prev. Process Ind. 2003. V. 16. № 4. P. 323.
17. Нигматулин Р.И., Шаганов В.Ш., Гималтдинов И.К., Ахмадуллин Ф.Ф. Взрыв пузырьковой завесы с горючей смесью газов при воздействии импульсом давления // Докл. РАН. 2003. Т. 388. № 5. С. 611.
18. Нигматулин Р.И., Шаганов В.Ш., Гималтдинов И.К., Баязитова А.Р. Распространение детонационных волн вдоль трубчатого пузырькового кластера, находящегося в жидкости // Докл. РАН. 2005. Т. 403. № 4. С. 478.

19. *Воронин Д.В.* О возбуждении детонации в жидкости с пузырьками химически активного газа // Хим. физика. 2005. Т. 24. № 9. С. 51.
20. *Mitropetros K., Hieronymus H., Steinbach J.* Single Bubble Ignition after Shock Wave Impact // Chem. Eng. Sci. 2006. V. 61. № 2. P. 397.
21. *Шагапов В.Ш., Гималтдинов И.К., Баязитова А.Р., Сневак Д.С.* Распространение детонационных волн вдоль трубчатого пузырькового кластера, находящегося в жидкости // ТВТ. 2009. Т. 47. № 3. С. 448.
22. *Yakhoub H.A., Masalova I., Haldenwang R.* Highly Concentrated Emulsions: Role of Droplet Size // Chem. Eng. Commun. 2011. V. 198. № 2. P. 147.
23. *Grandjean H., Jacques N., Zaleski S.* Damping of Underwater Pressure Wave by Bubble Curtain // Houille Blanche. 2011. № 4. P. 19.
24. *Авдеев К.А., Аксенов В.С., Борисов А.А., Севастополева Д.Г., Тухватуллина Р.Р., Фролов С.М., Фролов Ф.С., Шамшин И.О., Басара Б., Эдельбауэр У., Пахлер К.* Расчет распространения ударной волны в воде с пузырьками реакционноспособного газа // Хим. физика. 2017. Т. 36. № 4. С. 20.
25. *Сычев А.И., Пинаев А.В.* Самоподдерживающаяся детонация в жидкостях с пузырьками взрывчатого газа // ПМТФ. 1986. № 1. С. 133.
26. *Сычев А.И.* Детонационные волны в многокомпонентных пузырьковых средах // ФГВ. 1993. Т. 29. № 1. С. 110.
27. *Сычев А.И.* Детонационные волны в одно- и многокомпонентных пузырьковых средах // Докл. АН СССР. 1994. Т. 334. № 5. С. 586.
28. *Сычев А.И.* Пузырьковая детонация в полидисперсных средах // ФГВ. 1997. Т. 33. № 3. С. 114.
29. *Сычев А.И.* Влияние размера пузырьков на характеристики волн детонации // ФГВ. 1995. Т. 31. № 5. С. 83.
30. *Сычев А.И.* Влияние начального давления пузырьковых сред на характеристики волн детонации // ЖТФ. 2015. Т. 85. Вып. 4. С. 126.
31. *Сычев А.И.* Структура волн детонации в пузырьковых средах // Динамика сплошной среды. Акустика неоднородных сред. 1995. Вып. 110. С. 153.
32. *Пинаев А.В., Сычев А.И.* Структура и свойства детонации в системах жидкость–пузырьки газа // ФГВ. 1986. Т. 22. № 3. С. 109.
33. *Сычев А.И.* Постдетонационные волны в пузырьковых средах // Динамика сплошной среды. Акустика неоднородных сред. 2007. Вып. 124. С. 29.
34. *Сычев А.И.* Влияние начального давления многокомпонентных пузырьковых сред на характеристики волн детонации // ЖТФ. 2016. Т. 86. Вып. 5. С. 15.
35. *Сычев А.И.* Влияние начального давления полидисперсных пузырьковых сред на характеристики волн детонации // ЖТФ. 2017. Т. 87. Вып. 4. С. 504.