

УДК 534.222.2

Детонационные волны в пузырьково–капельных средах*

А.И. Сычев

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

E-mail: sychev@hydro.nsc.ru

Экспериментально изучены волновые процессы в химически активных многокомпонентных средах жидкость–пузырьки газа–капли жидкости. Установлено существование детонационных волн в многокомпонентных (пузырьково-капельных) средах. Структура волн детонации в пузырьково-капельных и пузырьковых средах качественно идентична: детонационные волны представляют собой уединенные волны с пульсационным профилем, давление за которыми близко по величине к давлению в невозмущенной среде. Скорость распространения детонационных волн в пузырьковых и пузырьково-капельных средах падает с увеличением концентрации газовой фазы среды и с уменьшением вязкости несущей жидкости. Присутствие капель жидкости снижает скорость волны детонации по сравнению с пузырьковой средой, не содержащей капель жидкости. Распространение детонационных волн в многокомпонентных средах вызывает дробление пузырьков газа, а также дробление отдельных капель жидкости.

Ключевые слова: детонационная волна, многокомпонентные среды, пузырьковые среды, капельные среды, пузырьково-капельные среды, жидкость, пузырьки газа, капли жидкости.

ВВЕДЕНИЕ

Многокомпонентные среды — системы, жидкость в которых содержит одновременно пузырьки газа и капли жидкости. Можно выделить два класса многокомпонентных сред: химически неактивные (инертные) и химически активные среды. В последних либо один компонент, либо несколько являются химически активными. В инертных средах существуют ударные волны; в химически активных средах возможно существование детонационных волн.

Детонация — автоволновой процесс: характеристики детонационных волн определяются свойствами и параметрами среды. В свою очередь, волна детонации в процессе распространения вызывает необратимые изменения среды. Таким образом, изменение свойств среды при введении в пузырьковую среду капель жидкости может сказаться на характеристиках детонационной волны; при этом волна детонации, воздействуя на пузырьково-капельную среду, может изменить ее свойства.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 04-03-33106).

Многокомпонентные среды жидкость–пузырьки газа–капли жидкости являются новыми — волновые процессы в пузырьково-капельных средах не исследованы. Цель настоящей работы — изучить детонационные волны в системах инертная жидкость–пузырьки химически активного газа–капли инертной жидкости.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальные исследования детонационных волн в многокомпонентных средах проведены в вертикально расположенной ударной трубе из нержавеющей стали внутренним диаметром 40 мм, состоящей из секций низкого 1 и высокого 2 давления с разрывной диафрагмой 3 между ними (рис. 1). По длине ударной трубы располагались оптические секции 4 и 5, в стенки которых монтировались пьезоэлектрические датчики давления 7–12, и оптическая секция 6, служащая для определения концентрации компонентов среды. Секцию низкого давления заполняли жидкостью, в которой капли жидкости и пузырьки газа создавались при подаче жидкости и газа в форсунки 13 и 14 из резервуаров 15 и 16 соответственно. Капли жидкости и пузырьки газа, поднимающиеся на поверхность среды, эвакуировались в резервуар 17 и в атмосферу 18 соответственно. Высота столба среды составляла 3,6 м. Давление на поверхности среды равнялось атмосферному.

Созданы многокомпонентные химически активные среды жидкость–пузырьки газа–капли жидкости: водоглицериновые растворы с объемной концентрацией глицерина $\alpha = 0, 0,25$ и $0,5$, содержащие пузырьки ацетиленокислородной стехиометрической смеси ($C_2H_2 + 2,5 O_2$) и капли минерального вакуумного масла ВМ-3. Пузырьково-капельные среды характеризуются параметрами β_1 и β_2 — объемной концентрацией газовой (пузырьков газа) и жидкой (капель жидкости) фаз соответственно.

Частными случаями многокомпонентных (пузырьково-капельных) сред жидкость–пузырьки газа–капли жидкости являются пузырьковые — жидкость–пузырьки газа (здесь $\beta_1 \equiv \beta_0$ — объемная концентрация газовой фазы среды, $\beta_2 = 0$) и капельные — жидкость–капли жидкости (здесь $\beta_1 = 0$, $\beta_2 \equiv \beta_0$ — объемная концентрация капель жидкости).

Некоторые физические величины, характеризующие свойства жидкостей, приведены в таблице: $\rho_{ж}$ — плотность, $c_{ж}$ — скорость звука, μ — динамическая вязкость, σ — коэффициент поверхностного натяжения, λ_0 — коэффициент теплопроводности и c_p — удельная изобарическая теплоемкость. Скорость звука в жидкостях определялась по скорости распространения слабых ударных волн (измерения проводились при $t = 15$ °С). Остальные величины — данные работ [1, 2], получены при температуре $t = 0-20$ °С и давлении $P_0 = 1$ атм.

Диаметр пузырьков газа и капель жидкости измерялся по фотографиям (рис. 2). Распределение пузырьков и капель в жидкости хаотичное. Пузырьки

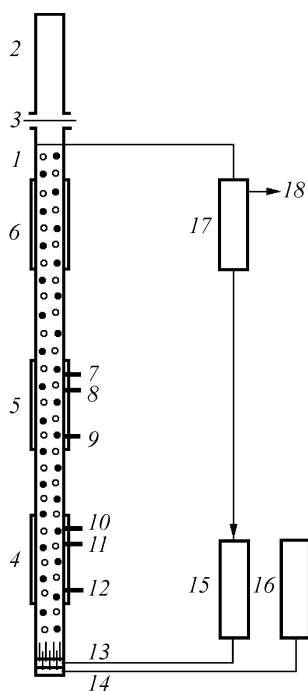


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки.

Таблица

| Жидкость | $\rho_{ж}^*$, кг/м ³ | $c_{ж}^*$, м/с | $\mu \cdot 10^3$, Па·с | $\sigma \cdot 10^3$, Дж/м ² | $\lambda_0 \cdot 10^2$, Дж/(м·с·К) | $c_p \cdot 10^{-3}$, Дж/(кг·К) |
|--------------|-------------------------------------|--------------------|----------------------------|--|--|------------------------------------|
| $\alpha = 0$ | 1000 | 1370 | 1,01 | 72,68 | 56,70 | 4,2 |
| 0,25 | 1065 | 1470 | 2,27 | 70,69 | 49,67 | 3,8 |
| 0,5 | 1130 | 1580 | 6,84 | 68,69 | 42,63 | 3,3 |
| ВМ-3 | 850 | ~1400 | 28,20 | – | – | – |

газа имеют несферичную форму и представляют собой сплюснутые эллипсоиды вращения (сфероиды). Эффективный диаметр пузырьков газа определялся из условия равенства объемов сфероиды и сферы $d = a(b/a)^{1/3}$, здесь a , b — большая и малая оси сфероиды. Величины a и b для каждого пузырька газа измерялись горизонтальным компаратором ИЗА-2 по фотографиям, полученным с использованием импульсной лампы ИФП-250. Отклонение формы пузырьков газа от сферической возрастает с увеличением диаметра пузырьков и при уменьшении вязкости жидкости. В исследованных средах диаметр пузырьков газа равен 2,5–3,0 мм. Капли жидкости имеют форму, близкую к сферической (см. рис. 2), при этом диаметр капель существенно зависит от вязкости несущей жидкости: диаметр капель ВМ-3 в водоглицериновых растворах с $\alpha = 0$ и 0,5 равен 5,0–5,5 и 3,5–4,0 мм соответственно.

Инициирование детонации в многокомпонентных средах осуществлялось ударными волнами, которые генерировались в среде при сжигании ацетиленокислородной стехиометрической смеси ($C_2H_2 + 2,5 O_2$) в секции высокого давления ударной трубы [3]. Амплитуду (давление) ударных волн варьировали изменением начального давления газовой смеси $C_2H_2 + 2,5 O_2$ в секции высокого давления. При этом величина давления ударных волн соответствует давлению, которое развивается над поверхностью среды при сгорании газовой смеси в замкнутом объеме секции высокого давления ударной трубы [4].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 3 приведены осциллограммы давления детонационных волн в пузырьковой и пузырьково-капельной средах. Сигналы датчиков давления регистрировали с помощью цифровых осциллографов С9-16. Инициировать детонацию способны ударные волны с амплитудой выше критической P_1^* : повышение давления в жидкости при распространении иницирующей ударной волны вызывает сжатие пузырьков газа; вследствие сжатия температура газа в пузырьках повышается и в ударных волнах сверхкритической амплитуды оказывается достаточной для воспламенения химически взаимодействующих веществ, содержащихся в пузырьках. Значение P_1^* определяется свойствами и параметрами среды и возрастает при увеличении объемной концентрации ее газовой фазы и при уменьшении вязкости водоглицеринового раствора. В исследованных пузырьковых средах с $\alpha = 0,5, 0,25$ и 0 при концентрации газовой фазы среды $\beta_0 \leq 6\%$ амплитуда $P_1^* = 17, 17\text{--}34$ и $34\text{--}60$ атм. соответственно. В пузырьково-капельных

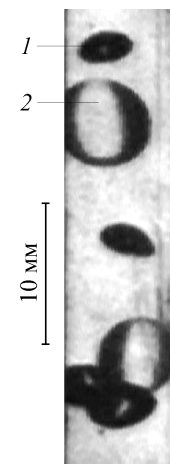


Рис. 2. Фотографии пузырьков газа (1) и капель жидкости (2) в воде.

$$\beta_1 = \beta_2 = 1\%.$$

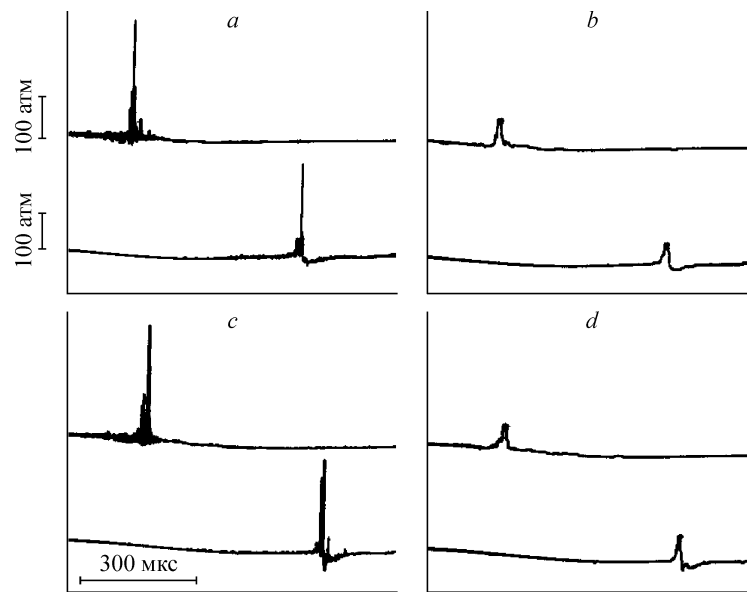


Рис. 3. Осциллограммы давления детонационной волны в пузырьковой (*a, b*) и пузырьково-капельной (*c, d*) средах до (*a, c*) и после (*b, d*) осреднения пульсаций давления.
 $\alpha = 0,25$; *a, b*: $\beta_1 = 3\%$, $\beta_2 = 0\%$; *c, d*: $\beta_1 = 3\%$, $\beta_2 = 2\%$.

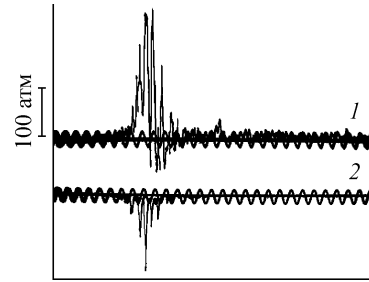
средах с $\alpha = 0,5$ и $0,25$ при концентрации пузырьков газа и капель жидкости β_1 и $\beta_2 = \leq 2\%$ параметр $P_1^* = 17$ атм.

Детонационные волны в системах жидкость–пузырьки газа–капли жидкости аналогичны волнам пузырьковой детонации (явление детонации в пузырьковых средах обнаружено в работе [4] и изучено в [5, 6]). Детонационная волна в пузырьково-капельных средах формируется на некотором расстоянии от поверхности среды: от инициирующей ударной волны отделяется уединенная волна с зоной горения — волна детонации, которая, ускоряясь, достигает постоянной скорости, большей скорости распространения следующей за ней ударной волны. Воспламенение среды (т. е. энерговыделение) имеет место лишь в детонационной волне и отсутствует в отставшей ударной волне. С увеличением амплитуды инициирующей ударной волны процесс формирования детонационной волны ускоряется — расстояние, на котором формируется волна детонации, уменьшается. Параметры детонационной волны не зависят от амплитуды инициирующей волны сверхкритической амплитуды: детонация в многокомпонентных средах жидкость–пузырьки газа–капли жидкости — самоподдерживающийся автоволновой процесс.

Механизм распространения волны детонации следующий: воспламенившиеся в детонационной волне пузырьки газа излучают в окружающую жидкость ударные волны, которые, в свою очередь, сжимают и, тем самым, воспаляют пузырьки газа, находящиеся перед волной [4].

Структура детонационных волн в пузырьковых и пузырьково-капельных средах качественно идентична. Волны детонации имеют пульсационный профиль давления (см. рис. 3, *a, c*). Пульсации давления детонационных волн, являющиеся следствием излучения воспламенившимися в волне детонации пузырьками ударных волн, имеют стохастический характер (рис. 4) (сигнал датчика давления регистрировали с помощью осциллографа ОК-33М; свечение пузырьковой среды, сопровождающее процесс распространения детонационной волны, фиксировали

Рис. 4. Осциллограммы давления детонационной волны (1) и свечения пузырьковой среды (2).
 $\alpha = 0,5$, $\beta_0 = 0,5\%$; период синусоиды $T = 10$ мкс.



фотоэлектронным умножителем ФЭУ-102, оптический ввод которого располагали диаметрально противоположно датчику давления).

Длительность детонационных волн (на уровне 0,1 от максимума давления) в исследованных средах $\tau_b = 50\text{--}70$ мкс существенно превышает длительность пульсаций давления $\tau_n = 3\text{--}5$ мкс. Следовательно, давление в волне детонации создается ударными волнами, излучаемыми многими пузырьками газа. Осреднение пульсаций давления позволяет получить эффективный профиль давления волны детонации — давления, действующего на каждый отдельный пузырек газа или каплю жидкости. Осциллограммы на рис. 3, *b*, *d* — сигналы датчиков давления после сглаживания, проведенного с использованием штатной процедуры цифрового осциллографа С9-16. Процедура сглаживания пульсаций давления заключается в осреднении сигнала по n точкам; при временном интервале между точками Δt (времени дискретизации) постоянная времени сглаживания сигнала $\tau_c = n\Delta t$. В данном случае $\Delta t = 2$ мкс, $n = 10$ и $\tau_c = 20$ мкс. Величина постоянной времени сглаживания сигнала выбиралась из условия $\tau_n < \tau_c < \tau_b$.

Волны детонации с осредненными пульсациями давления — это уединенные волны гауссовой формы, давление за которыми близко по величине к давлению в невозмущенной среде. Средняя величина эффективного (осредненного) давления детонационных волн во всех исследованных средах составляет $P = 60\text{--}80$ атм.

На рис. 5 приведены результаты измерений скорости распространения детонационных волн в пузырьковых и пузырьково-капельных средах. Скорость волн детонации измеряли с помощью датчиков давления, расположенных на участке ударной трубы с базой 0,595 м (см. рис. 3). Данные измерений представлены в виде зависимостей скорости детонационных волн D от концентрации газового компонента среды β_1 , при этом концентрация жидкого компонента среды β_2 является параметром (при $\beta_2 = 0$ — пузырьковая среда, при $\beta_2 \neq 0$ — пузырьково-капельная среда). Точки 1 на рис. 5, *a*, *b* — результат усреднения данных 5–10 опытов; точки 2 и 3 на рис. 5, *a*, *b* — данные измерений скорости детонационных волн в пузырьковых и в пузырьково-капельных средах, полученные в одной постановке опытов (при фиксированной концентрации газовой фазы β_1 сред).

Характер зависимостей $D(\beta_1)$ в исследованных пузырьковых и пузырьково-капельных средах является общим: с увеличением концентрации газовой фазы среды скорость распространения детонационных волн снижается. С уменьшением вязкости жидкого компонента системы (несущей фазы) скорость волн детонации падает. Присутствие в многокомпонентной среде капель жидкости снижает скорость волны детонации по сравнению с пузырьковой средой, не содержащей капель жидкости (см. рис. 5).

Детонация — диссипативный процесс: энергопотери волны детонации компенсируются химической энергией, выделяющейся в среде при ее распространении. При этом важно не столько абсолютное энергосодержание среды (которое в пузырьковых системах чрезвычайно низкое), сколько соотношение между

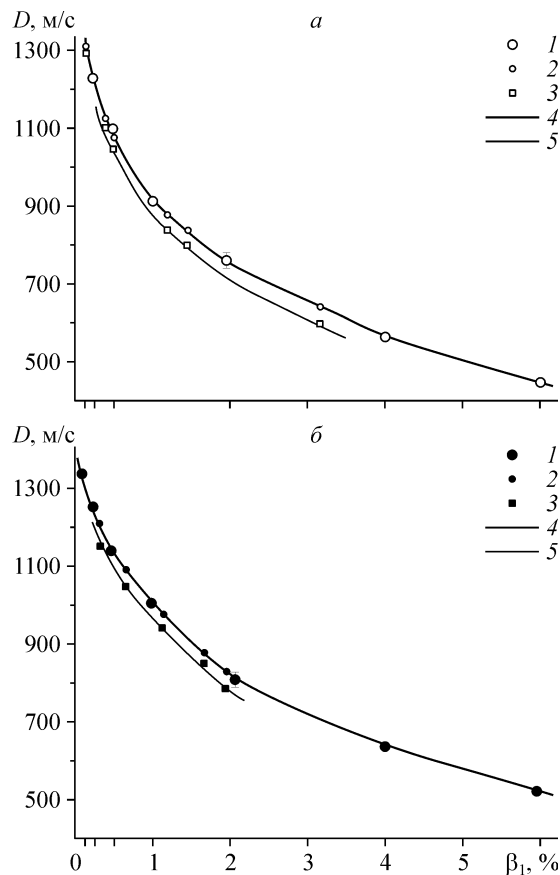


Рис. 5. Зависимости $D(\beta_1)$.

$\alpha = 0,25$ (a), $0,5$ (b), $\beta_2 = 0$ (1, 2, 4, a, b), 2 (3, 5, a), 1 (3, 5, b) %.

химической энергией, содержащейся в среде, и ее диссипацией в волне детонации. Введение капель инертной жидкости в пузырьковую среду не меняет энергосодержание среды. Следовательно факт уменьшения скорости детонационной волны свидетельствует об увеличении энергопотерь волны детонации.

При повышении в многокомпонентной среде концентрации жидкости, скорость звука в которой ниже, чем в несущей жидкости, скорость распространения волновых возмущений падает. Анализ результатов расчета, проведенного по формуле для равновесной скорости звука в многокомпонентной среде жидкость–пузырьки газа–капли жидкости

$$c = \left((1 - \beta_1 - \beta_2) \rho_{\text{ж}} + \beta_1 \rho_{\text{г}} + \beta_2 \rho_{\text{к}} \right)^{-1/2} \left(\frac{(1 - \beta_1 - \beta_2)}{\rho_{\text{ж}} c_{\text{ж}}^2} + \frac{\beta_1}{\rho_{\text{г}} c_{\text{г}}^2} + \frac{\beta_2}{\rho_{\text{к}} c_{\text{к}}^2} \right)^{-1/2}$$

(здесь $\rho_{\text{ж}}$, $\rho_{\text{г}}$, $\rho_{\text{к}}$ — плотность несущей жидкости, газа и жидкости капель соответственно, $c_{\text{ж}}$, $c_{\text{г}}$, $c_{\text{к}}$ — скорость звука в несущей жидкости, в газе и в жидкости капель соответственно), показывает, что в условиях настоящего эксперимента при близких значениях скорости звука в исследованных жидкостях (см. табл.) различие скоростей звука и, следовательно, скорости распространения

детонационных волн в пузырьковых и пузырьково-капельных средах (при фиксированной концентрации газовой фазы сред) должно быть незначительно.

Влияние капель жидкости в среде на скорость распространения детонационных волн может быть обусловлено проявлением следующего обстоятельства. Известно [7], что присутствие в жидкости даже незначительного числа пузырьков газа и твердых частиц заметно снижает скорость звуковых волн из-за рассеяния волны на неоднородностях среды. Таким образом, влияние присутствия капель жидкости в многокомпонентных средах жидкость–пузырьки газа–капли жидкости на скорость детонационных волн, представляющих собой совокупность волн сжатия короткой длительности (см. рис. 4), может быть обусловлено рассеянием волны детонации на каплях жидкости.

Зависимость скорости распространения детонационных волн от вязкости жидкого компонента (несущей фазы) многокомпонентных сред обусловлена влиянием вязкости жидкости на процесс сжатия пузырьков газа в волне детонации, а именно на состояние поверхности пузырьков в процессе сжатия. Развитие химических реакций в пузырьках газа — процесс, протекающий при переменных параметрах газа внутри пузырьков. Изменение температуры газа в пузырьках происходит в результате действия многих факторов. С одной стороны, температура газа повышается из-за сжатия пузырьков в поле давления волны детонации; с другой стороны, существуют процессы, приводящие к отклонению от адиабатического закона сжатия. Данные оптических исследований поведения пузырьков газа в волне детонации [6] и результаты изучения кавитационных пузырьков в химически неактивных системах [8] показывают, что поверхность пузырьков при схлопывании неустойчива. Общая деформация формы пузырьков с образованием кумулятивной струйки жидкости, пронизывающей пузырек насквозь, происходит из-за неоднородности поля давления в окружающей жидкости (следствие взаимодействия пузырьков газа в детонационной волне), а также при поступательном движении пузырьков в жидкости. Другой тип искажения поверхности пузырьков газа, возникающего при сжатии пузырьков в волне детонации, — неустойчивость поверхности раздела между жидкостью и газом при ускоренном движении (неустойчивость Тейлора). Следствием искажения поверхности пузырьков газа является возрастание эффективной площади поверхности раздела газ–жидкость, что приводит к интенсификации теплопотерь, обусловленных процессом теплопередачи. Возникают также энергопотери на нагрев и испарение микрокапель жидкости, срывающихся с искаженных неустойчивостями стенок пузырьков газа и образующихся в результате диспергирования кумулятивной струйки жидкости в объеме пузырьков. Кроме того, деформация формы пузырьков газа приводит к несимметричности самого процесса сжатия. В результате действия отмеченных факторов температура газа в пузырьках оказывается ниже, чем в идеальном (адиабатическом) процессе сжатия. С уменьшением вязкости жидкости поверхность пузырьков газа при схлопывании становится менее стабильной [9–11], влияние сопутствующих процессов усиливается и оказывается существенным: скорость распространения детонационной волны снижается вплоть до затухания (эффект вязкости [6]).

Распространение детонационной волны в многокомпонентной среде жидкость–пузырьки газа–капли жидкости приводит к необратимому изменению среды: после прохождения волны в среде визуально наблюдается множество мелких (< 1 мм в диаметре) пузырьков газа, а также образовавшиеся при дроблении отдельных капель жидкости мелкие капли, количество которых увеличивается с ростом концентрации газовой фазы среды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально исследованы детонационные волны в новом типе многокомпонентных сред — в системах жидкость–пузырьки газа–капли жидкости. Установлено, что критические значения амплитуды инициирующих ударных волн в многокомпонентных (пузырьково-капельных) и пузырьковых средах практически совпадают. Структура детонационных волн в пузырьково-капельных и пузырьковых средах качественно идентична: детонационные волны представляют собой уединенные волны длительностью 50–70 мкс с пульсационным профилем (длительность пульсаций давления 3–5 мкс), давление за которыми близко по величине к давлению в невозмущенной среде. Скорость распространения детонационных волн в пузырьковых и пузырьково-капельных средах снижается с увеличением концентрации газовой фазы и с уменьшением вязкости несущей жидкости. Присутствие в среде капель жидкости снижает скорость волны детонации по сравнению с пузырьковой средой, не содержащей капель жидкости. Влияние присутствия капель жидкости в многокомпонентной среде жидкость–пузырьки газа–капли жидкости на скорость детонационной волны обусловлено рассеянием волны детонации на каплях жидкости. Распространение детонационных волн в многокомпонентных средах вызывает дробление пузырьков газа, а также дробление отдельных капель жидкости. Таким образом, характеристики детонационной волны определяются параметрами многокомпонентной среды; в свою очередь, волна детонации, воздействуя на многокомпонентную среду в процессе распространения, изменяет свойства среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Физические величины** / Справочник под ред. Григорьева И.С., Мейлихова Е.З. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 1232 с.
2. **Папок К.К., Рагозин Н.А.** Словарь по топливам, маслам, смазкам, присадкам и специальным жидкостям. — М.: Изд-во «Химия», 1975. — 333 с.
3. **Сычев А.И.** Воспламенение систем жидкость–пузырьки газа ударной волной // Физика горения и взрыва. — 1985. — Т. 21, № 2. — С. 130–134.
4. **Сычев А.И.** Волна детонации в системе жидкость–пузырьки газа // Физика горения и взрыва. — 1985. — Т. 21, № 3. — С. 103–110.
5. **Сычев А.И., Пинаев А.В.** Самоподдерживающаяся детонация в жидкостях с пузырьками взрывчатого газа // ПМТФ. — 1986. — № 1. — С. 133–138.
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. **Бражников Н.И.** Ультразвуковые методы. — М.: Энергия, 1965.
8. **Кнэпп Р., Дейли Дж., Хэммит Ф.** Кавитация. — М.: Мир. — 1974. — 687 с.
9. **Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г., Шрейбер И.Р.** Распространение волн в газо- и парожидкостных средах. — Новосибирск: Ин-т теплофизики. — 1983. — 237 с.
10. **Нигматулин Р.И.** Динамика многофазных сред. — М.: Наука. — 1987. — Ч. I. — 464 с; Ч. II. — 360 с.
11. **Кедринский В.К.** Гидродинамика взрыва. Эксперимент и модели. — Новосибирск: Изд. СО РАН. — 2000. — 435 с.

Статья поступила в редакцию 26 мая 2008 г.