

6. Urtiev P. A. and Oppenheim A. K. Experimental observation of the transition to detonation in an explosive gas // Proc. Roy. Soc.— 1966.— A 295.— P. 13.
7. Oppenheim A. K., Liderman A. J. and Urtiev P. A. On the onset of detonation // Comb. and flame.— 1962.— 6.— P. 193.
8. Солоухин Р. И. Переход горения в детонацию в газах // ПМТФ.— 1961.— № 4.— С. 128—132.
9. Воинов А. Н. Экспериментальное исследование детонации в двигателях // Сгорание в транспортных поршневых двигателях/Под ред. Е. А. Чудакова.— М.: Изд-во АН СССР, 1951.— С. 112.
10. Соколик А. С. Основы теории детонации в двигателях/Там же.— С. 185.
11. Фролов С. М., Гельфанд Б. Е., Цыганов С. А. Спонтанные режимы горения // ФГВ.— 1992.—28, № 5.— С. 13— 27.
12. Неглетон М. Детонация в газах.— М.: Мир, 1989.
13. Вопросы использования детонации в технологических процессах. Сб. научн. тр. Под ред. В. В. Митрофанова.— Новосибирск: ИГиЛ СО АН СССР, 1986.
14. Шамшев К. Н., Товчигречко В. Н., Соболев Л. Ю. и др. Экспериментальные и теоретические исследования мощных акустических импульсов в атмосфере // Акуст. журн.— 1988.—XXXIV, вып. 2.— С. 232—236.
15. Бойченко А. П., Смирнов Н. Н. Динамика взаимодействия термогазодетонационного бурильного инструмента с грунтами // Проблемы динамики взаимодействия деформируемых сред.— Ереван: Изд-во АН АрмССР, 1984.— С. 75—79.
16. Борисов А. А., Лобань С. А. Пределы детонации углеводородовоздушных смесей в трубах // ФГВ.—1977.—13, № 5.— С. 729—733.
17. Lindstedt R. P., Michels H. J. Deflagration to Detonation Transition in Mixtures of Alkane LNG/LPG Constituents with O₂/N₂ // Comb. and Flame.—1988.—72, № 1.— P. 63—72.
18. Lindstedt R. P., Michels H. J. Deflagration to Detonation Transitions and Strong Deflagrations in Alkane and Alkene Air Mixtures // Ibid.—1989.—76, № 2.— P. 169—181.
19. Васильев А. А. Оптимизация условий перехода горения в детонацию для газовых смесей/Тез. докл. Всесоюз. симп. (г. Алма-Ата, 21—25 октября 1991 г.).— Новосибирск, 1991.—С. 36—37.
20. Клишкин В. Ф., Папырин А. Н., Солоухин Р. И. Оптические методы регистрации быстропротекающих процессов.— Новосибирск: Наука, 1980.
21. Митрофанов В. В. Теория детонации.— Новосибирск, 1982.
22. Физика взрыва/Под ред. К. П. Станюковича.— М: Наука, 1975.

119899, Москва,
МГУ

Поступила в редакцию 19/111 1993,
после доработки — 10/VII 1993

УДК 534.222.2:532.529

А. И. Сычев

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДЕЛЫ СУЩЕСТВОВАНИЯ ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН В ПУЗЫРЬКОВЫХ СРЕДАХ

Экспериментально изучены детонационные волны в одно- и многокомпонентных пузырьковых средах. Получены данные о критических условиях инициирования, структуре и свойствах волн детонации. Установлены энергетические пределы и определены области существования детонационных волн в исследованных системах.

Детонация в пузырьковых средах — явление, обладающее большой степенью общности. Системы жидкость — пузырьки газа, в которых обнаружены волны детонации, разнообразны:

— однокомпонентные по газовой фазе системы [1—3]: I — химически неактивная жидкость — пузырьки смеси химически активных и неактивных газов, II — жидкое горючее — пузырьки смеси газообразного окислителя и химически неактивных газов;

— многокомпонентные системы [4]: I — химически неактивная жидкость — смесь пузырьков химически активных газов и пузырьков неактивных газов, II — жидкое горючее — смесь пузырьков газообразного окислителя и пузырьков химически неактивных газов, (I—II) — жидкое горючее — смесь пузырьков газообразного окислителя и пузырьков химически активных газов.

Таким образом, детонационные волны (ДВ) существуют в системах, физико-химические свойства которых различаются в широком диапазоне. Область существования волн детонации в пузырьковых средах может огра-

© А. И. Сычев, 1994.

ничиваться действием многих факторов. Так, обнаружены пределы детонации (нижний и верхний) по концентрации газовой фазы в системе, по составу газовой смеси в пузырьках, предел по вязкости жидкого компонента системы [3]. По сути своей пределы существования ДВ — энергетические, т. е. обусловлены энергетическими потерями.

Отметим, что в одно- и многокомпонентных средах наряду с общими механизмами энергопотерь присутствуют качественно различные: в однокомпонентных системах часть выделяющейся в результате химических реакций энергии идет на нагрев содержащегося в пузырьках химически неактивного газа, в многокомпонентных системах часть энергии поглощается химически неактивными пузырьками.

Существование ДВ возможно при условии, если энергетические потери волны 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 химической энергией, содержащейся в среде, и ее диссипацией в волне детонации (энергетический баланс).

Если энергоемкость среды становится ниже некоторого значения или энергопотери волны детонации — выше критической величины, существование волны детонации оказывается невозможным. Разбавление химически активной газовой смеси в пузырьках инертным газом (однокомпонентные системы) или присутствие в системе наряду с химически активными пузырьками газа неактивных пузырьков (многокомпонентные системы) снижает энергоемкость среды и увеличивает энергопотери ДВ.

Таким образом, варьируя относительное энергосодержание среды, можно определить энергетические пределы и сравнить области существования волн детонации в одно- и многокомпонентных системах.

Экспериментальные исследования выполнены на установке, описанной в [4]. Вертикально расположенная ударная труба высотой ~4 м и внутренним диаметром 40 мм состоит из секций высокого и низкого давления с разрывной диафрагмой между ними. Секцию низкого давления заполняли жидкостью, в которой пузырьки диаметром 2—3 мм формировались при прохождении газа (или газов) через систему (или две независимые системы) капиллярных отверстий (получаемое при этом распределение пузырьков в жидкости близко к равномерному).

Параметры ДВ регистрировали установленными по длине трубы пьезоэлектрическими датчиками давления, сигналы с которых подавались на осциллографы ОК-33, ОК-33М и два С8-17 (постоянная времени измерительной цепи каждого датчика 10^{-3} —1 с). Объемную концентрацию газовой фазы определяли по подъему столба газожидкостной среды при прохождении пузырьков газа через жидкость. Давление на поверхности пузырьковой среды поддерживали равным атмосферному.

Инициирование пузырьковой детонации осуществляли ударными волнами (УВ), генерируемыми в газожидкостной среде при сжигании ацетиленокислородной стехиометрической смеси в секции высокого давления. Интенсивность иницирующих УВ варьировали изменением начального давления взрывчатой газовой смеси.

Изучены следующие химически активные пузырьковые среды:

— однокомпонентные системы 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 ($C_2H_2 + 2,5O_2$), 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);

— многокомпонентные системы Ж — $(\beta_1\Gamma_1 + \beta_2\Gamma_2)$ (β_1, β_2 — концентрация пузырьков Γ_1 и Γ_2 , общая концентрация газовой фазы $\beta_n = \beta_1 + \beta_2$): I — Ж (α) — водоглицериновые растворы, содержащие смесь пузырьков химически активного газа Γ_1 ($C_2H_2 + 2,5O_2$) и пузырьков химически неактивного газа Γ_2 (Ar, He, N_2); II — Ж — жидкое горючее (ВМ-3) с

Таблица 1

Газ	$\rho_r, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	γ_0	μ_0	$c_p \cdot 10^{-2}, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$\lambda_0 \cdot 10^{-2}, \frac{\text{Дж}}{\text{м} \cdot \text{с} \cdot \text{К}}$	$c_r, \frac{\text{м}}{\text{с}}$
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
C ₂ H ₂ + 2,5O ₂	1,24	1,33	30,29	1,14	2,49	329
O ₂	1,31	1,40	32,00	0,92	2,42	316

пузырьками газообразного окислителя Γ_1 (O₂) и пузырьками инертного газа Γ_2 (Ar).

Качественное различие систем I и II заключается в том, что химически взаимодействующие вещества в системах II находятся в разных агрегатных состояниях. Поэтому воспламенению пузырьков предшествуют процессы смесеобразования: нагрев и испарение жидкого горючего, перемешивание в объеме пузырька паров горючего и окислителя. Подготовительные процессы смесеобразования задерживают и затрудняют воспламенение пузырьков.

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

Физико-химические свойства газового и жидкого компонентов исследованных пузырьков сред различаются в широком диапазоне (см. табл. 1 и 2). Тем не менее структура ДВ во всех системах качественно идентична. На рис. 1 представлены осциллограммы, иллюстрирующие детонационный процесс в разнообразных средах. Волна детонации представляет собой короткую, длительностью 50—70 мкс (на уровне 0,1—0,2), уединенную волну с пульсациями давления длительностью 3—5 мкс и амплитудой, достигающей 150—400 атм.

На рис. 2 приведены результаты измерений скорости ДВ, распространяющихся в одно- и многокомпонентных средах (каждая точка — среднее нескольких опытов). Данные представлены в виде зависимостей скорости волны детонации D 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 и прийти к заключению об эффективности механизмов диссипации энергии в волне детонации.

Общий вид зависимостей $D(Q_0)$ при различных значениях концентрации газовой фазы β_0 ($0,5 \leq \beta_0 \leq 6$ %) во всех исследованных системах качественно сходный (см. рис. 2): уменьшение энергоемкости среды при разбавлении химически активной газовой смеси в пузырьках неактивным газом (рис. 2, а, в) или при добавлении в жидкость наряду с химически активными пузырьками газа неактивных пузырьков (рис. 2, б, г) ведет к снижению скорости распространения волны детонации.

Таблица 2

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

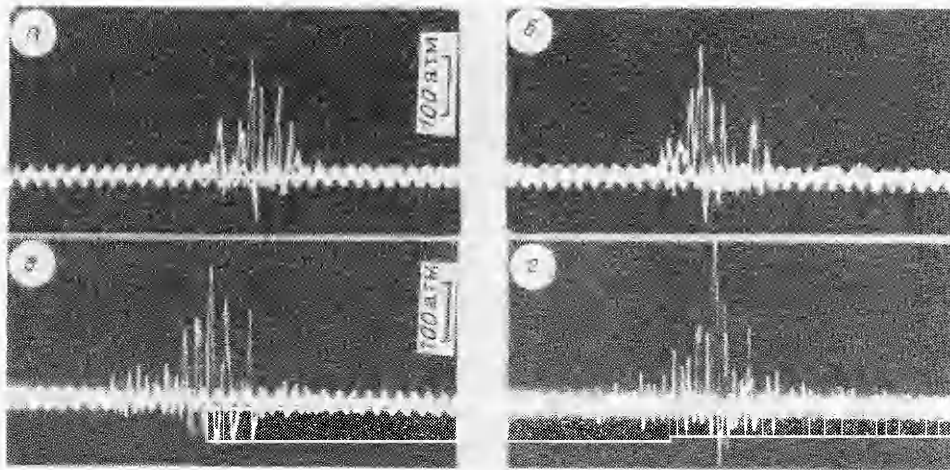


Рис. 1. Осциллограммы давления ДВ.

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

Зависимость скорости волны от энергоемкости среды слабая. Например, уменьшение относительного энергосодержания системы Ж(0,5) — $[x(C_2H_2 + 2,5O_2) + yAr]$ от 1 до 0,025, т. е. в 40 раз, приводит к снижению скорости волны в исследованном диапазоне концентраций газовой фазы в 1,5—2,0 раза (см. рис. 2, *a*). Если энергосодержание среды становится ниже критического, то детонация в системе отсутствует. С увеличением концентрации газовой фазы скорость волны уменьшается, критические значения энергосодержания при этом возрастают.

Сопоставление зависимостей $D(Q_0)$ в одно- и многокомпонентных средах позволяет выяснить особенности поведения ДВ в системах I (неактивная жидкость с пузырьками активного газа) и II (жидкость — горючее с пузырьками окислителя). В системах I (см. рис. 2, *a, б*) ДВ в однокомпонентных средах способны распространяться при существенно меньших значениях Q_0 , чем в многокомпонентных системах.

Обращает на себя внимание тот факт, что если в многокомпонентных средах (см. рис. 2, *б*) при введении в жидкость неактивных пузырьков физико-химические свойства химически неактивных газов не влияют на величину D , то в однокомпонентных средах свойства неактивных газов, которыми разбавляется химически активная газовая смесь в пузырьках, играют существенную роль (см. рис. 2, *a*). Так, если при разбавлении газовой смеси Ar и He зависимости $D(Q_0)$ для обоих газов практически совпадают (только для Ar детонация имеет более широкие пределы существования), то в случае с N_2 значение D заметно снижается.

Отсутствие влияния свойств газов в неактивных пузырьках на скорость распространения ДВ в многокомпонентных средах свидетельствует о том, что в процессе сжатия пузырьков определяющими являются свойства жидкости.

Зависимость параметров ДВ от свойств неактивных газов в однокомпонентных средах обусловлена тем обстоятельством, что присутствие неактивных газов в активных пузырьках влияет на условия воспламенения пузырьков. Различие в поведении зависимостей $D(Q_0)$ в однокомпонентных системах, содержащих одноатомные (Ar, He) и двухатомный (N_2) газы, показывает, что условия воспламенения при сжатии пузырьков в ДВ существенно зависят от показателя адиабаты γ_0 . Влияние других свойств газов проявляется в меньшей степени. Например, коэффициент теплопроводности Ar и He различается почти в 9 раз, тем не менее эти различия слабо сказываются на скорости распространения ДВ. Данный факт указывает на то, что процесс сжатия пузырьков близок к адиабатическому.

Свойства жидкого компонента системы влияют как в одно-, так и многокомпонентных средах: с уменьшением вязкости жидкости скорость

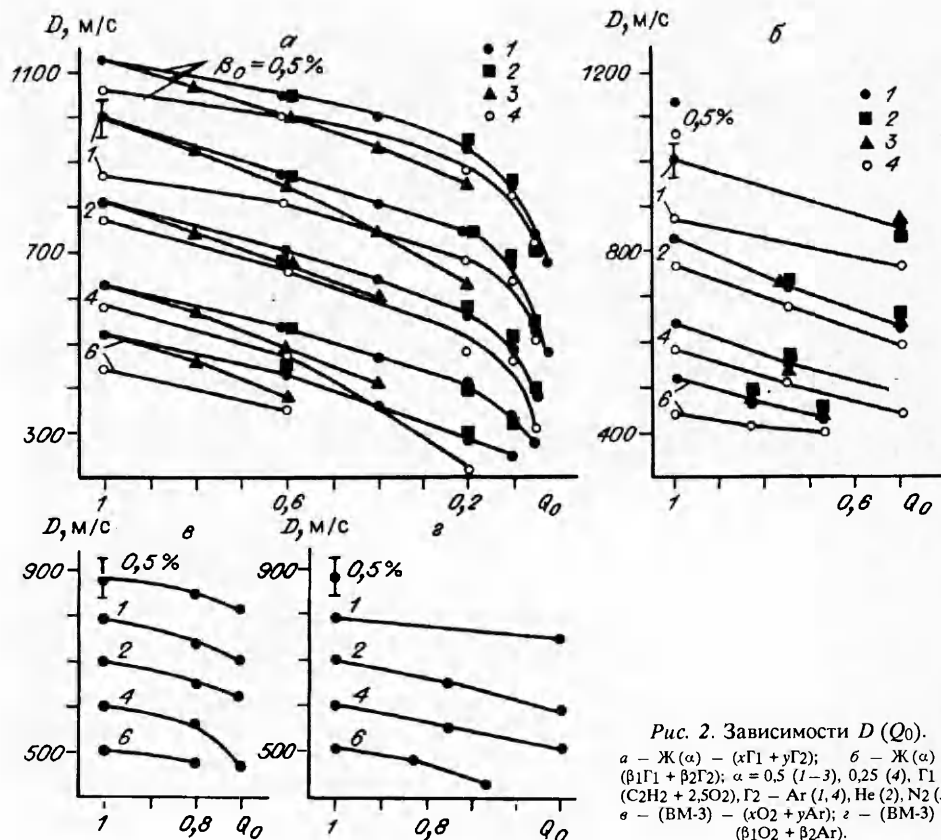


Рис. 2. Зависимости $D(Q_0)$.
 а — Ж(а) — $(x\Gamma_1 + y\Gamma_2)$; б — Ж(а) — $(\beta_1\Gamma_1 + \beta_2\Gamma_2)$; $\alpha = 0.5$ (1–3), 0.25 (4), Γ_1 — $(C_2H_2 + 2.5O_2)$, Γ_2 — Ar (1, 4), He (2), N_2 (3);
 в — (BM-3) — $(xO_2 + yAr)$; г — (BM-3) — $(\beta_1O_2 + \beta_2Ar)$.

волны детонации падает (см. рис. 2, а, б). В системах II (см. рис. 2, в, г) распространение ДВ в однокомпонентных средах более затруднено, чем в многокомпонентных. Данное обстоятельство свидетельствует о лимитирующей роли процессов смесеобразования.

Критические значения давления инициирующей ударной волны p_1^* возрастают с увеличением β_0 и при уменьшении Q_0 . Для исследованных систем $p_1^* = 17 \div 50$ атм.

Полученные результаты позволяют определить области существования ДВ в одно- и многокомпонентных пузырьковых средах. На рис. 3, а, б представлены зависимости критических значений Q_0 от β_0 в системах I и II. (Нижний предел по концентрации газовой фазы условно принят равным 0,25 %, поскольку при меньших значениях β_0 само понятие «пузырьковая среда» теряет смысл, так как соответствующие расстояния между пузырьками

$L > L_0 = d_0 \left(\frac{1}{18}\right)^{1/6} \left(\frac{\mu}{\beta_0}\right)^{1/3} \approx 6,7d_0 \approx 20$ мм (d_0 — диаметр пузырьков) становятся сопоставимыми с диаметром трубы.) Наиболее широкая область существования ДВ — в однокомпонентной системе Ж(0,5) — $[x(C_2H_2 + 2.5O_2) + yAr]$ (см. рис. 3, а). Так, детонация способна распространяться в упомянутой системе при $x = 0,025$, т. е. при концентрации ацетилена в газовой смеси $\sim 0,7$ %. Разбавление химически активной газовой смеси неактивными газами (He, N_2) или уменьшение вязкости жидкого компонента системы ведет к сужению области существования ДВ.

В многокомпонентных средах, содержащих пузырьки неактивных газов в жидкостях различной вязкости, области существования ДВ совпадают (см. рис. 3, а), при этом они уже, чем в однокомпонентных. В системах II (см. рис. 3, б), в отличие от систем I, область существования в многокомпонентных средах шире, чем в однокомпонентных.

Таким образом, потери химической энергии на нагрев содержащегося в пузырьках неактивного газа сильнее проявляются в системах II, поглощение

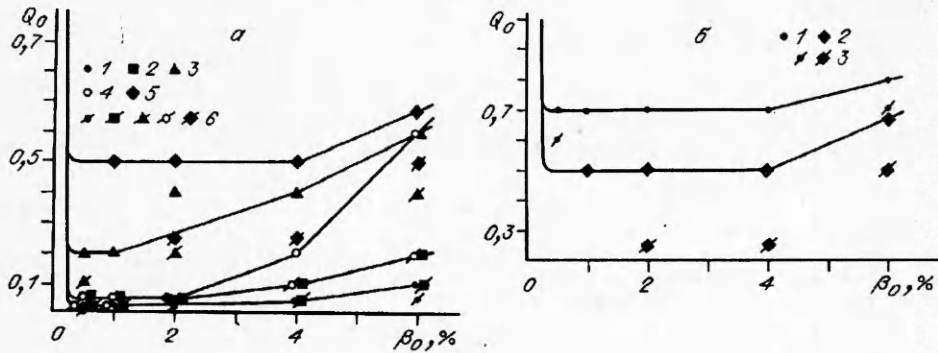


Рис. 3. Области существования ДВ.

a — Ж (α) — ($x\Gamma_1 + y\Gamma_2$) (1–4), $\alpha = 0,5$ (1, 2, 4), 0,25 (3), Γ_1 — ($C_2H_2 + 2,5O_2$), Γ_2 — Ar (1, 3), He (2), N_2 (4), Ж (α) — ($\beta_1\Gamma_1 + \beta_2\Gamma_2$) (5), $\alpha = 0,25, 0,5$, Γ_1 — ($C_2H_2 + 2,5O_2$), Γ_2 — Ar, He, N_2 , b — детонация отсутствует; b — (BM-3) — ($xO_2 + yAr$) (1), (BM-3) — ($\beta_1O_2 + \beta_2Ar$) (2), 3 — детонация отсутствует.

части энергии волны детонации неактивными пузырьками больше сказывается в системах I.

Области существования ДВ в многокомпонентных средах в системах I и II совпадают, в то время как в однокомпонентных средах они различаются значительно: в системах II пределы заметно уже, чем в I. (Сильное влияние на область существования ДВ разбавления кислорода азотом в пузырьках, содержащихся в вакуумном масле BM-3, отмечено в [3].) Представленные на рис. 3 данные свидетельствуют о том, что пределы существования ДВ зависят как от характера пузырьковой среды (одно- или многокомпонентная), так и от типа системы (I или II). Вне пределов инициирующая ударная волна может воспламенять пузырьки в жидкости, но ДВ не образуется; по мере распространения УВ ослабевает, и воспламенение пузырьков прекращается.

Таким образом, в работе установлены критические параметры инициирования, получены данные о структуре и свойствах волн детонации. Определены энергетические пределы и сопоставлены области существования ДВ в одно- и многокомпонентных пузырьковых средах.

Автор признателен В. В. Митрофанову за полезные обсуждения и критические замечания.

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.
5. Таблицы физических величин: Справочник/Под ред. И. К. Кикоина.— М.: Атомиздат, 1976.—1008 с.

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

Поступила в редакцию
28/IV 1993