

03

## Влияние начального давления многокомпонентных пузырьковых сред на характеристики волн детонации

© А.И. Сычев

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,  
630090 Новосибирск, Россия  
e-mail: sychev@hydro.nsc.ru

(Поступило в Редакцию 16 июня 2015 г. В окончательной редакции 12 октября 2015 г.)

Экспериментально исследовано влияние начального давления многокомпонентных пузырьковых сред на условия инициирования, структуру, скорость распространения и давление детонационных волн. Установлено, что варьирование начального давления пузырьковой среды является эффективным способом управления параметрами волн „пузырьковой“ детонации.

### Введение

Детонация — самоподдерживающийся процесс, существующий в химически активных средах. Возможность распространения волны детонации обеспечивается энерговыделением в среде, компенсирующим энергозатраты детонационной волны на необратимое преобразование среды.

Волна „пузырьковой“ детонации существует в химически активных пузырьковых средах. Явление детонации в пузырьковых средах обнаружено в [1]. Обладая общими для всех детонационных волн признаками (это самоподдерживающийся автоволновой стационарный процесс) волна „пузырьковой“ детонации имеет специфические черты, проявляющиеся в структуре, свойствах и механизме распространения. Изучению детонационных волн в пузырьковых средах посвящены работы [1–21]; результаты исследований обобщены в монографиях [22–24].

Детонация в пузырьковых средах — уникальное явление: волны „пузырьковой“ детонации способны существовать в системах с чрезвычайно низким энерго содержанием. Присутствие в жидкости наряду с пузырьками химически активного газа пузырьков химически неактивного газа (многокомпонентные пузырьковые среды [8–11]) еще более уменьшает энергосодержание среды. При изменении начального давления пузырьковой среды с заданной объемной концентрацией химически активной газовой фазы массовая концентрация газа и, следовательно, энергосодержание системы меняются. Можно предположить, что с уменьшением начального давления скорость распространения волны детонации в многокомпонентных пузырьковых средах будет падать еще сильнее, чем в однокомпонентных пузырьковых средах [21]. Цель настоящей работы — изучить влияние начального давления многокомпонентных пузырьковых сред на условия инициирования, структуру, скорость распространения и давление детонационных волн и установить возможность управления параметрами волн „пузырьковой“ детонации.

### Экспериментальная установка

Детонационные волны изучены в многокомпонентных пузырьковых средах типа „химически неактивная жидкость—смесь пузырьков химически активного газа и пузырьков химически неактивного газа“  $L(\alpha) - (\beta_1 G_1 + \beta_2 G_2)$ , здесь  $L(\alpha)$  — жидкость (водно-глицериновые растворы с объемной концентрацией глицерина  $\alpha = 0.25$  или  $0.5$ ), содержащая пузырьки газа  $G_1$  и пузырьки газа  $G_2$  ( $\beta_1, \beta_2$  — объемная концентрация газов  $G_1$  и  $G_2$ ; общая концентрация газовой фазы пузырьковой среды  $\beta_0 = \beta_1 + \beta_2$ ) ( $G_1$  — химически активный газ ( $C_2H_2 + 2.5 O_2$ ),  $G_2$  — химически неактивный газ (Ar, He,  $N_2$  или  $H_2$ )).

Параметры, характеризующие физические свойства газов и жидкостей, приведены в табл. 1 и 2 соответственно. Здесь  $\rho_g$  и  $\rho_l$  — плотность газа и жидкости соответственно,  $\gamma$  — показатель адиабаты газа,  $\mu_0$  — молярная масса газа,  $c_p^g$  — удельная теплоемкость газа,  $\lambda_0^g$  — коэффициент теплопроводности газа,  $\mu$  — вязкость жидкости,  $c_g$  и  $c_l$  — скорость звука в газе и в жидкости соответственно. Вязкость жидкостей  $\mu$  измерена вискозиметром ВПЖ-2; скорость звука в жидкости  $c_l$  определена по скорости распространения слабых ударных волн, остальные параметры — данные [25], полученные при нормальных условиях.

Экспериментальные исследования детонационных волн в многокомпонентных пузырьковых средах проведены в вертикально расположенной ударной трубе с внутренним диаметром 40 mm и высотой 4.3 m, состоящей из секций высокого и низкого давления с разрывной диафрагмой между ними. Секция низкого давления заполнялась жидкостью, в которой пузырьки диаметром  $2.5 \pm 0.1$  mm генерировались форсункой при прохождении газов через две независимые системы капилляров [8]. Высота столба пузырьковой среды с объемной концентрацией газовой фазы в диапазоне  $0.5 \leq \beta_0 \leq 6\%$  составляла 3.55 m.

Иницирование детонации в пузырьковых средах осуществляли ударными волнами. Ударные волны в пузырьковой среде генерировали сжиганием ацетиленокислородной стехиометрической смеси ( $C_2H_2 + 2.5 O_2$ ) в секции высокого давления ударной трубы [2]. Амплитуду (давление) ударных волн варьировали изменением начального давления газовой смеси  $C_2H_2 + 2.5 O_2$  (при этом амплитуда ударных волн соответствует давлению, развивающемуся над поверхностью пузырьковой среды при сгорании газа в замкнутом объеме секции высокого давления ударной трубы [1]).

Параметры детонационных волн (скорость распространения, давление и длительность) определяли с помощью пьезоэлектрических датчиков давления, установленных по длине ударной трубы. Сигналы датчиков давления регистрировали осциллографами ОК-33М и С9-16. Свечение пузырьковых сред, сопровождающее процесс распространения детонационных волн, фиксировали фотоэлектронными умножителями ФЭУ-102, оптические вводы которых располагали диаметрально противоположно датчикам давления.

## Экспериментальные результаты и их обсуждение

Явление „пузырьковой“ детонации обладает большой общностью — детонационные волны существуют в разнообразных пузырьковых средах. На рис. 1 приведены осциллограммы, иллюстрирующие детонационный процесс в одно- и многокомпонентных пузырьковых средах при начальном давлении  $p$ , равном атмосферному  $p_0$ . Физико-химические свойства (табл. 1 и 2) и параметры начального состояния ( $0.5 \leq \beta_0 \leq 6\%$ ) исследованных сред изменялись в широком диапазоне. Однако структура детонационных волн во всех системах качественно идентична: волна „пузырьковой“ детонации представляет собой уединенную волну с пульсационным профилем давления; присутствие в жидкости пузырьков инертного

Таблица 1.

Газ	$\rho_g$ , kg/m <sup>3</sup>	$\gamma$	$\mu_0 \cdot 10^3$ , kg/mol	$c_p^g \cdot 10^{-3}$ , J/(kg · K)	$\lambda_0^g \cdot 10^2$ , J/(m · s · K)	$c_g$ , m/s
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 <sub>2</sub>	1.25	1.40	28.00	1.04	2.40	334
H <sub>2</sub>	0.09	1.40	2.02	14.31	16.78	1284
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> + 2.5O <sub>2</sub>	1.24	1.33	30.29	1.14	2.49	329

Таблица 2.

Жидкость	$\rho_l$ , kg/m <sup>3</sup>	$\mu \cdot 10^3$ , Pa · s	$c_l$ , m/s
0.75H <sub>2</sub> O + 0.25 глицерин	1065	2.27	1600
0.5H <sub>2</sub> O + 0.5 глицерин	1130	6.84	1700

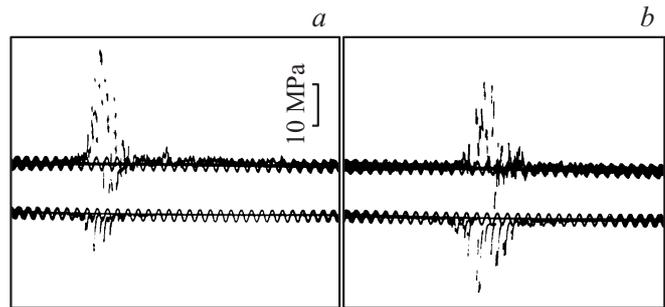


Рис. 1. Осциллограммы давления волны детонации (верхний луч) и свечения пузырьковой среды (нижний луч) в одно- (a) и многокомпонентной (b) пузырьковых средах. a —  $L(0.5) - (C_2H_2 + 2.5 O_2)$ ,  $\beta_0 = 0.5\%$ ; b —  $L(0.5) - [\beta_1(C_2H_2 + 2.5 O_2) + \beta_2 Ar]$ ,  $\beta_0 = \beta_1 + \beta_2 = 0.5 + 0.5 = 1\%$ ;  $p_0 = 0.1$  МПа; период синусоиды  $T = 10 \mu s$ .

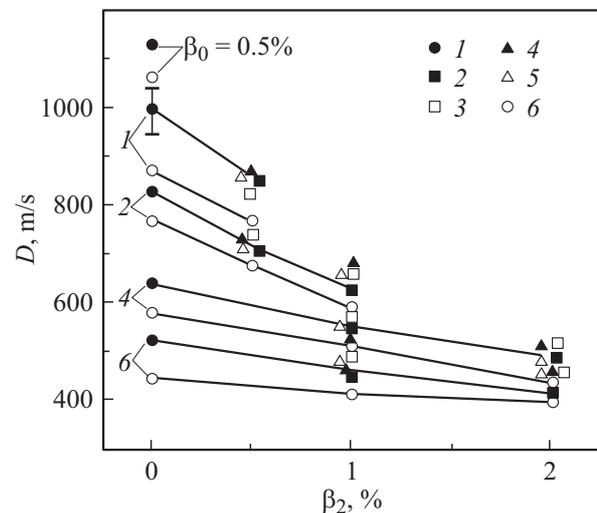


Рис. 2. Зависимости скорости волны детонации „с потерями“  $D$  от концентрации компонента газовой фазы  $\beta_2$ . 1 —  $L(0.5) - (C_2H_2 + 2.5 O_2)$ , 2–5 —  $L(0.5) - [\beta_1(C_2H_2 + 2.5 O_2) + \beta_2 Ar]$  (He, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>), 6 —  $L(0.25) - [\beta_1(C_2H_2 + 2.5 O_2) + \beta_2 Ar]$ ;  $\beta_0 = \beta_1 + \beta_2$ ,  $\beta_1$  — (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> + 2.5 O<sub>2</sub>),  $\beta_2$  — Ar (2, 6), He (3), N<sub>2</sub> (4), H<sub>2</sub> (5);  $p_0 = 0.1$  МПа.

газа также не сказывается на структуре волн детонации (рис. 1, верхний луч).

Таким образом, волна детонации в системах „жидкость–пузырьки газа“ является самоорганизующимся процессом: структура детонационной волны устойчива относительно изменений параметров системы в широком диапазоне.

Длительность детонационной волны (на уровне 0.1 от максимума давления) равна 50–70  $\mu s$  во всех исследованных системах; при этом длительность пульсаций давления, регистрируемая амплитуда которых достигает 15–30 МПа, составляет 3–5  $\mu s$ . Пульсации давления являются следствием генерирования ударных волн пузырьками газа, воспламенившимися в результате сжатия в детонационной волне. Воспламенение и горение газовой

смеси в пузырьках сопровождаются также световой эмиссией (рис. 1, нижний луч). Стохастичность пульсаций давления и светового излучения волны детонации обусловлена хаотичностью распределения пузырьков газа в жидкости.

На рис. 2 приведены результаты измерений скорости детонационных волн, распространяющихся в различных пузырьковых средах (каждая точка — среднее данных 5–10 опытов). Скорость волн измерялась с помощью датчиков давления или фотоэлектронных умножителей. Результаты представлены в виде зависимостей скорости распространения волны детонации  $D$  от концентрации химически неактивного газового компонента  $\beta_2$  пузырьковой среды, при этом общая концентрация газовых компонентов  $\beta_0 = \beta_1 + \beta_2$  служит параметром (зависимости  $D(\beta_2)$  получены при различных значениях  $\beta_0 = \beta_1 + \beta_2 = \text{const}$ ).

Детонационные волны в многокомпонентных пузырьковых средах распространяются со скоростью, большей равновесной скорости звука в пузырьковой среде  $c_0$  (согласно формуле Мэллока,  $c_0 = (\gamma p_0 / \beta_0 \rho_0)^{1/2} < 100 \text{ m/s}$  (здесь  $\rho_0 = (1 - \beta_0)\rho_l + \beta_0\rho_g$  — плотность пузырьковой среды) при  $\beta_0 > 1\%$ ), но меньшей скорости звука в жидкости  $c_l$  (табл. 2). Общий вид зависимостей  $D(\beta_2)$  при различных значениях  $\beta_0$  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 (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. 2) оказывается критическим — детонационная волна в таких пузырьковых средах 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 повышению 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).

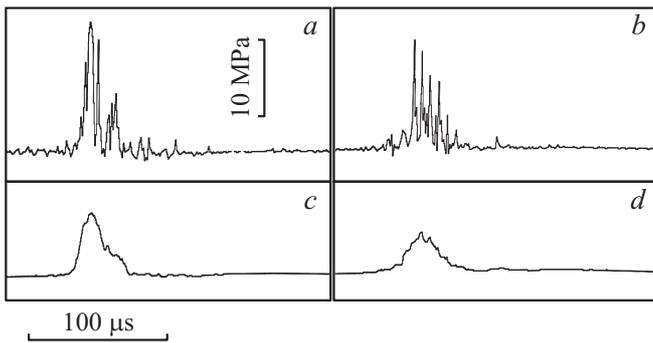
Детонация в системах, содержащих пузырьки химически неактивного газа, может быть охарактеризована как „пузырьковая“ детонация „с потерями“.

Не установлено существенного влияния сорта газа инертного газового компонента пузырьковой среды на параметры волны детонации. Различие в физических свойствах газов (табл. 1) не сказывается заметным образом на скорости распространения детонационной волны.

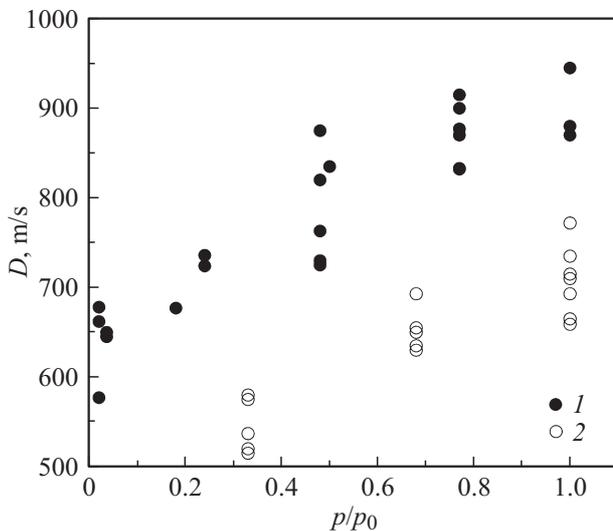
Значительно существеннее действие жидкого компонента пузырьковых сред: на рис. 2 приведены результаты измерений скорости распространения детонационных волн в многокомпонентных пузырьковых средах, вязкость жидкого компонента которых различна (табл. 2). Скорость волн детонации выше в системах с более вязкой жидкостью. Существенное влияние вязкости жидкого компонента пузырьковых сред на критические условия инициирования, параметры и пределы распространения волн детонации (эффект „вязкости“ [4]) объясняется влиянием вязкости жидкости на процесс сжатия пузырьков газа в волне детонации, а именно на состояние поверхности пузырьков в процессе сжатия — с уменьшением вязкости жидкости поверхность пузырьков становится менее стабильной, и энергопотери пузырьков увеличиваются. Таким образом, параметры детонационных волн в значительной степени определяются свойствами жидкого компонента многокомпонентных пузырьковых сред.

Инициировать детонацию в многокомпонентных пузырьковых средах способны ударные волны с амплитудой, большей критической. Значения критической амплитуды инициирующей ударной волны  $p_1^*$  зависят как от общей концентрации газовой фазы пузырьковой среды, так и от соотношения концентраций активных и неактивных пузырьков. Так, в системе  $L(0.25) - [\beta_1(C_2H_2 + 2.5O_2) + \beta_2Ar]$  при  $\beta_2 \leq 1\%$   $p_1^* \leq 1.7 \text{ MPa}$  ( $\beta_0 \leq 4\%$ ) и  $p_1^* \approx 3.4 \text{ MPa}$  ( $\beta_0 = 6\%$ ) ( $\beta_0 = \beta_1 + \beta_2$  — общая концентрация газовой фазы,  $\beta_1$  и  $\beta_2$  — концентрация пузырьков ( $C_2H_2 + 2.5O_2$ ) и Ar соответственно); при  $\beta_2 = 2\%$   $p_1^* \approx 3.4 \text{ MPa}$  ( $\beta_0 = 4\%$ ) и  $p_1^* \approx 4.3 \text{ MPa}$  ( $\beta_0 = 6\%$ ). Значения  $p_1^*$  повышаются при увеличении  $\beta_0$  или  $\beta_2$ . Детонационные волны в многокомпонентных пузырьковых средах с объемной концентрацией глицерина 50% при общей концентрации газовых компонентов  $\beta_0 \leq 2\%$  и начальном давлении в диапазоне 100–2 кПа инициируются ударными волнами с амплитудами  $\leq 1.7 \text{ MPa}$ .

Детонация — автоволновой процесс: характеристики детонационной волны определяются параметрами среды. При этом детонация является самоорганизующимся процессом — структура детонационных волн в пузырьковых средах при варьировании начального давления среды остается качественно идентичной: волны „пузырьковой“ детонации имеют пульсационный профиль давления (рис. 3, *a, b*). Осреднение пульсаций давления позволяет представить качественную картину эффективного профиля давления волны детонации. Детонационная волна



**Рис. 3.** Осциллограммы давления детонационной волны в системе  $L(0.5) - [\beta_1(C_2H_2 + 2.5 O_2) + \beta_2 N_2]$  до (a, b) и после (c, d) осреднения пульсаций давления.  $\beta_0 = \beta_1 + \beta_2 = 1 + 1 = 2\%$ ;  $p/p_0 = 1$  (a, c) и 0.02 (b, d).



**Рис. 4.** Зависимости скорости детонационных волн  $D(p/p_0)$  в системе  $L(0.5) - [\beta_1(C_2H_2 + 2.5 O_2) + \beta_2 N_2]$ .  $\beta_0 = \beta_1 + \beta_2 = 0.5 + 0.5 = 1$  (1) и  $1 + 1 = 2\%$  (2).

с осредненным профилем давления — это уединенная волна, характеризующаяся плавным передним фронтом и давлением за волной, близким по величине давлению в невозмущенной среде (рис. 3, c, d) (сигналы датчиков давления осреднялись с использованием штатной процедуры цифрового осциллографа С9-16 по 10 точкам при временном интервале между точками (времени дискретизации), равном  $1 \mu s$ ). Эффективное (осредненное по пульсациям) давление детонационных волн в пузырьковых средах при атмосферном давлении составляет 6.0–8.0 МПа; с понижением начального давления многокомпонентных пузырьковых сред давление волн детонации уменьшается (примерно в 2 раза при снижении начального давления до 2 кПа) (рис. 3, c, d). Длительность детонационных волн (временная характеристика, определяемая на нулевом уровне осредненного по пульсациям сигнала датчика давления) при изменении

начального давления пузырьковой среды практически не меняется.

С уменьшением начального давления многокомпонентных пузырьковых сред скорость распространения детонационных волн снижается (рис. 4) (скорость волн детонации измерена с помощью шести датчиков давления, расположенных на участке ударной трубы высотой 1.07 м; при этом середина измерительного участка отстояла от поверхности пузырьковой среды на расстоянии 2.85 м). В исследованном диапазоне изменения начального давления пузырьковых сред зависимости  $D(p/p_0)$  при различных концентрациях газовой фазы среды близки к линейным (рис. 4).

Зависимость скорости и давления детонационных волн от начального давления многокомпонентных 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 (влияние энергосодержания пузырьковых сред на параметры детонационных волн изучено в [10]).

## Заключение

Экспериментально исследовано влияние начального давления многокомпонентных пузырьковых сред на условия инициирования, структуру, скорость распространения и давление детонационных волн. Значения критической амплитуды инициирующей детонацию ударной волны зависят как от общей концентрации газовой фазы, так и от соотношения концентраций активных и неактивных пузырьков газа: амплитуда инициирующей ударной волны повышается при увеличении общей концентрации газовой фазы и концентрации неактивных пузырьков газа. Детонационные волны в многокомпонентных пузырьковых средах с объемной концентрацией глицерина 50% при общей концентрации газовых компонентов  $\leq 2\%$  и начальном давлении в диапазоне 100–2 кПа инициируются ударными волнами с амплитудами  $\leq 1.7$  МПа.

Волна „пузырьковой“ детонации в многокомпонентных средах — это уединенная волна длительностью 50–70  $\mu s$  с пульсационным профилем, давление за которой релаксирует к величине, близкой к давлению перед волной. Амплитуда пульсаций давления, длительность которых составляет 3–5  $\mu s$ , достигает 15–30 МПа. Осредненное по пульсациям давление детонационных волн в пузырьковых средах при атмосферном давлении равно 6.0–8.0 МПа. При варьировании начального давления многокомпонентных пузырьковых сред структура детонационных волн остается качественно идентичной.

Детонационные волны в многокомпонентных пузырьковых средах распространяются со скоростью, большей

равновесной скорости звука в пузырьковой среде, но меньшей скорости звука в жидкости. Скорость распространения волн детонации снижается с увеличением общей концентрации газовых компонентов пузырьковой среды и при уменьшении вязкости жидкого компонента системы. Наличие в системе пузырьков неактивного газа приводит к снижению скорости распространения волны детонации вплоть до затухания детонации при концентрации неактивных пузырьков выше критической (концентрационный предел).

С уменьшением начального давления многокомпонентной пузырьковой среды в диапазоне от атмосферного до 2 кПа скорость детонационных волн снижается примерно в 1.5 раза, давление падает в 2 раза, а длительность практически не меняется. Зависимость скорости распространения и давления детонационных волн от начального давления многокомпонентных пузырьковых сред обусловлена сопутствующим изменением энерго-содержания системы.

Таким образом, варьирование начального давления многокомпонентной пузырьковой среды является эффективным способом управления параметрами волн „пузырьковой“ детонации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 13-03-01165).

## Список литературы

- [1] Сычев А.И. // Физика горения и взрыва. 1985. Т. 21. № 3. С. 103–110.
- [2] Сычев А.И. // Физика горения и взрыва. 1985. Т. 21. № 2. С. 130–134.
- [3] Кедринский В.К. // Прикл. механика и техн. физика. 1987. Т. 38. № 4. С. 111–139.
- [4] Пинаев А.В., Сычев А.И. // Физика горения и взрыва. 1987. Т. 23. № 6. С. 76–84.
- [5] Красный Ю.П., Михо В.В. // Физика горения и взрыва. 1989. Т. 25. № 2. С. 75–81.
- [6] Ляпидевский В.Ю. // Физика горения и взрыва. 1990. Т. 26. № 4. С. 138–140.
- [7] Троцюк А.В., Фомин П.А. // Физика горения и взрыва. 1992. Т. 28. № 4. С. 129–136.
- [8] Сычев А.И. // Физика горения и взрыва. 1993. Т. 29. № 1. С. 110–117.
- [9] Сычев А.И. // ДАН. 1994. Т. 334. № 5. С. 586–588.
- [10] Сычев А.И. // Физика горения и взрыва. 1994. Т. 30. № 1. С. 86–91.
- [11] Сычев А.И. // Физика горения и взрыва. 1994. Т. 30. № 4. С. 119–124.
- [12] Ждан С.А. // Физика горения и взрыва. 2002. Т. 38. № 3. С. 85–95.
- [13] Fomin P.A., Mitropetros K., Hieronymus H. // J. Loss Prevention in the Process Industries. 2003. Vol. 16. N 4. P. 323–331.
- [14] Нигматулин Р.И., Шагапов В.Ш., Гималтдинов И.К., Ахмадуллин Ф.Ф. // ДАН. 2003. Т. 388. № 5. С. 611–615.
- [15] Воронин Д.В. // Химическая физика. 2005. Т. 24. № 9. С. 51–58.
- [16] Mitropetros K., Hieronymus H., Steinbach J. // Chemical Engineering Science. 2006. Vol. 61. N 2. P. 397–416.
- [17] Da Silva G., Dlugogorski B.Z., Kennedy E.M. // AIChE Journal. 2006. Vol. 52. N 4. P. 1558–1565.
- [18] Шагапов В.Ш., Гималтдинов И.К., Баязитова А.Р., Сневак Д.С. // Теплофизика высоких температур. 2009. Т. 47. № 3. С. 448–456.
- [19] Yakhoub H.A., Masalova I., Haldenwang R. // Chemical Engineering Communications. 2011. Vol. 198. N 2. P. 147–171.
- [20] Grandjean H., Jacques N., Zaleski S. // HAUILLE BLANCHE. 2011. № 4. P. 19–24.
- [21] Сычев А.И. // ЖТФ. 2015. Т. 85. Вып. 4. С. 126–129.
- [22] Зверев И.Н., Смирнов Н.Н. Газодинамика горения. М.: Наука. 1987. 308 с.
- [23] Кедринский В.К. Гидродинамика взрыва. Эксперимент и модели. Новосибирск: Изд. СО РАН. 2000. 435 с.
- [24] Митрофанов В.В. Детонация гомогенных и гетерогенных систем. Новосибирск: Изд-во Ин-та гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН. 2003. 200 с.
- [25] Таблицы физических величин: Справочник / Под ред. И.К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.