

03

## Влияние начального давления 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 20 марта 2014 г. В окончательной редакции 7 июля 2014 г.)

Экспериментально исследовано влияние начального давления пузырьковых сред на условия инициирования, структуру, скорость распространения и давление детонационных волн в однокомпонентных пузырьковых средах типа „химически неактивная жидкость–пузырьки химически активного газа“: водно-глицериновые растворы с пузырьками ацетилено-кислородной стехиометрической смеси. Установлено, что варьирование начального давления пузырьковой среды является эффективным способом управления параметрами волн пузырьковой детонации.

### Введение

Детонация — явление универсальное. Детонационные волны существуют в разнообразных гомогенных 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 — это химически активные среды. 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. При этом детонация в пузырьковых средах, обладая общими для всех детонационных волн признаками (это самоподдерживающийся автоволновой стационарный процесс), имеет ряд особенностей, проявляющихся в структуре, свойствах и механизме распространения.

Детонация — диссипативный процесс: возможность распространения детонационных волн обеспечивается энерговыделением в среде, компенсирующим затраты энергии волной на необратимое преобразование среды. В пузырьковых средах типа „химически неактивная жидкость–пузырьки химически активного газа“ 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 образом, начальное давление пузырьковой среды является важным параметром, влияющим на характеристики и на саму возможность существования волн детонации. Цель настоящей работы — изучить влияние начального давления пузырьковых сред на условия инициирования, структуру, скорость распространения и давление дето-

национных волн и установить возможность управления параметрами волны пузырьковой детонации.

### Экспериментальная установка

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 диаметром  $2.5 \pm 0.1$  мм генерировались при прохождении газа через форсунку, установленную в торце ударной трубы. Высота столба пузырьковой среды с объемной концентрацией газа до 6% составляла 3.55 м.

Инициирование детонации в пузырьковых средах осуществляли ударными волнами. Ударные волны в пузырьковой среде создавали способом, предложенным в [1]: ударные волны в пузырьковых средах генерировали сжиганием ацетилено-кислородной стехиометрической смеси ( $C_2H_2 + 2.5O_2$ ) в секции высокого давления ударной трубы; амплитуду (давление) ударных волн варьировали изменением начального давления газовой смеси  $C_2H_2 + 2.5O_2$  (при этом амплитуда ударных волн соответствует давлению, развивающемуся над поверхностью пузырьковой среды при сгорании газа в замкнутом объеме секции высокого давления ударной трубы [2]).

Параметры детонационных волн (скорость распространения, давление) определяли с помощью пьезоэлектрических датчиков давления, установленных заподлицо со стенками ударной трубы на различных расстояниях от поверхности пузырьковой среды. Сигналы датчиков давления регистрировали осциллографами ОК-33М и С9-16.

Изучены однокомпонентные пузырьковые среды типа „химически неактивная жидкость–пузырьки химически активного газа“  $L(\alpha) - \beta_0 G$ , где  $L(\alpha)$  — жидкость (liquid),  $G$  — газ (gas),  $\beta_0$  — объемная концентрация

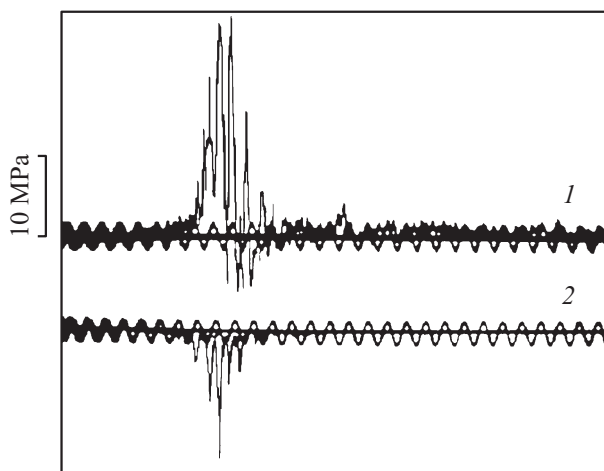
газовой фазы:  $L(\alpha)$  — водно-глицериновые растворы с объемной концентрацией глицерина  $\alpha = 0, 0.25$  и  $0.5$  (вязкость жидкости  $\mu = 1.01 \cdot 10^{-3}, 2.27 \cdot 10^{-3}$  и  $6.84 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ );  $G$  — пузырьки химически активного газа (ацетилено-кислородная стехиометрическая смесь  $\text{C}_2\text{H}_2 + 2.5\text{O}_2$ ).

## Экспериментальные результаты и их обсуждение

Распространение ударной волны в пузырьковой среде вызывает сжатие пузырьков газа и воспламенение химических веществ, содержащихся в среде. Явление воспламенения химически активных пузырьковых сред ударной волной обнаружено в [1]. Наличие энергосвободного волнового процесса — волны детонации. Явление детонации в пузырьковых средах обнаружено в [2].

Инициировать волны пузырьковой детонации способны ударные волны с амплитудой выше критической [2]; при этом характеристики волны детонации не зависят от амплитуды, длительности и способа создания иницирующей ударной волны и определяются свойствами и параметрами пузырьковой среды [2–4]. Критическая амплитуда ударной волны возрастает при увеличении концентрации газовой фазы и при уменьшении вязкости жидкого компонента среды и находится в диапазоне  $1.7\text{--}6.0 \text{ MPa}$  (давление ацетилено-кислородной стехиометрической смеси в секции высокого давления ударной трубы  $0.1\text{--}0.35 \text{ MPa}$ ) в пузырьковых средах с  $\alpha = 0, 0.25$  и  $0.5$  при  $\beta_0 \leq 6\%$  [2–4]. Детонационные волны в пузырьковых средах с  $\alpha = 0.5$  при  $\beta_0 \leq 2\%$  и начальном давлении  $p$  в диапазоне  $0.1\text{--}0.002 \text{ MPa}$  иницируются ударными волнами с амплитудами  $1.7 \text{ MPa}$ .

Волна „пузырьковой“ детонации имеет пульсационный профиль давления (рис. 1). Пульсации давления являются следствием генерирования ударных волн пу-



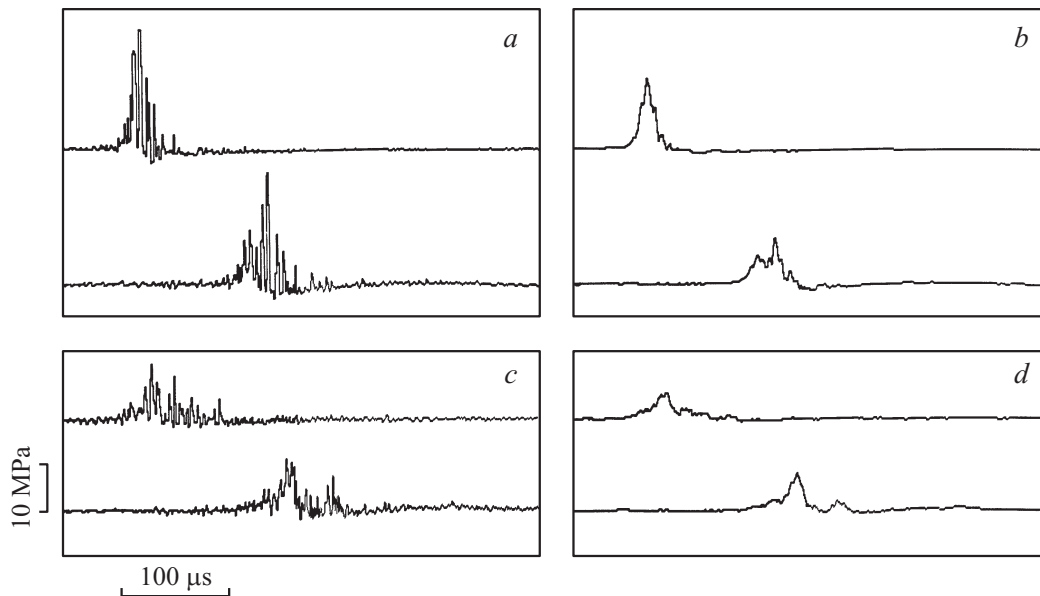
**Рис. 1.** Осциллограммы давления детонационной волны (1) и свечения пузырьковой среды (2);  $\alpha = 0.5, \beta_0 = 0.5\%$ ; период калибровочной синусоиды  $T = 10 \mu\text{s}$ .

зырьками газа, воспламенившимися в результате сжатия в детонационной волне. Воспламенение и горение газовой смеси в пузырьках сопровождается также световым излучением, регистрируемым фотоэлектронным умножителем ФЭУ-102 (см. рис. 1). Стохастичность пульсаций давления и светового излучения обусловлена хаотичностью распределения пузырьков газа в жидкости. Регистрируемая амплитуда пульсаций давления, длительность которых составляет  $3\text{--}5 \mu\text{s}$ , достигает  $15\text{--}30 \text{ MPa}$ .

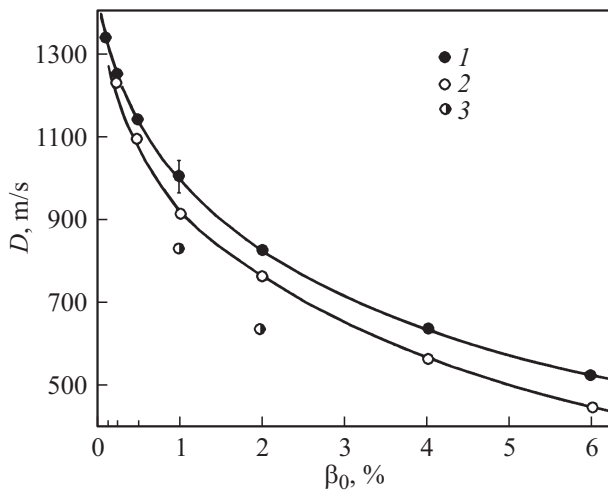
Детонация — это автоволновой процесс: характеристики детонационной волны не зависят от условий инициирования и определяются параметрами среды. При этом детонация является самоорганизующимся процессом — структура детонационных волн в пузырьковых средах при варьировании начального давления среды остается качественно идентичной (рис. 2).

Осреднение пульсаций давления позволяет получить эффективный профиль давления волны детонации. Сигналы датчиков давления осреднялись с использованием штатной процедуры цифрового осциллографа С9-16 по 10 точкам при временном интервале между точками (времени дискретизации), равном  $1 \mu\text{s}$ . Детонационные волны с осредненными пульсациями давления — это уединенные волны, давление за которыми релаксирует к величине, близкой к давлению перед волной (см. рис. 2, *b, d*). Эффективное (осредненное по пульсациям) давление детонационных волн в пузырьковых средах при атмосферном давлении составляет  $6\text{--}8 \text{ MPa}$ . Длительность детонационных волн  $\tau$  (временная характеристика, определяемая на нулевом уровне осредненного по пульсациям сигнала датчика давления) равна  $50\text{--}70 \mu\text{s}$ .

Детонационные волны в пузырьковых средах распространяются со скоростью, большей равновесной скорости звука в пузырьковой среде, но меньшей скорости звука в жидкости. На рис. 3 представлены результаты измерения скорости  $D$  детонационных волн в пузырьковых средах при различных концентрациях газовой фазы среды  $\beta_0$  (каждая точка — среднее данных 5–10 опытов). Характер зависимостей  $D(\beta_0)$  во всех средах является общим: с увеличением концентрации газовой фазы пузырьковой среды  $\beta_0$  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 — эффект „вязкости“ — объясняется влиянием вязкости на состояние поверхности пузырьков в процессе сжатия в волне детонации и в конечном итоге на величину энергопотерь пузырьков газа [3–5]). Скорость детонационных волн изменяется в широком диапазоне:  $D = 450\text{--}1350 \text{ m/s}$  (см. рис. 3). Таким образом, линейная протяженность (длина) детонационных волн  $\lambda$  (пространственная характеристика, определяемая длительностью волны  $\tau$  и скоростью ее распространения  $D$ :  $\lambda = D \cdot \tau$ ) составляет  $2\text{--}9 \text{ cm}$ .



**Рис. 2.** Осциллограммы давления детонационной волны до (*a, c*) и после (*b, d*) осреднения пульсаций давления;  $\alpha = 0.5$ ,  $\beta_0 = 0.5\%$ ;  $p/p_0 = 1$  (*a, b*) и  $0.02$  (*c, d*).

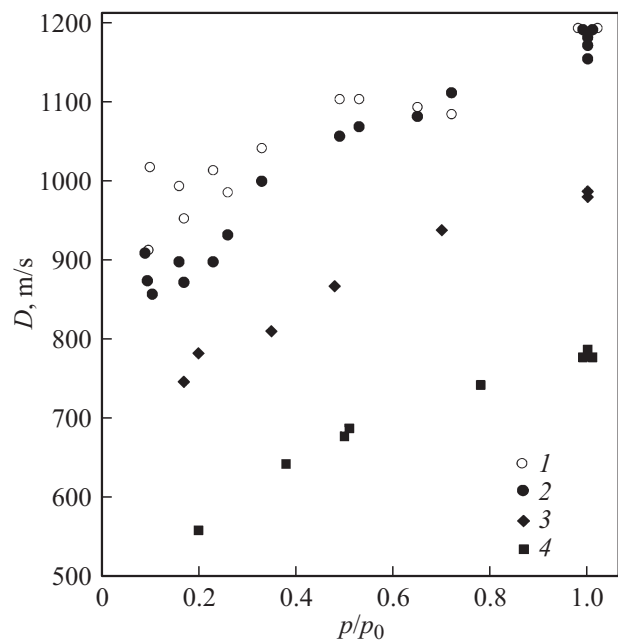


**Рис. 3.** Зависимости скорости детонационных волн  $D(\beta_0)$ ;  $\alpha = 0.5$  (1),  $0.25$  (2) и  $0$  (3).

Варьирование начального давления пузырьковой среды оказывает существенное влияние на параметры волны детонации. Понижение начального давления пузырьковой среды вызывает уменьшение скорости детонационных волн (рис. 4); давление волн детонации при этом уменьшается (примерно в 2 раза при снижении начального давления от атмосферного до  $0.01$  МПа), а длительность волн практически не меняется. В исследованном диапазоне изменения начального давления среды зависимости  $D(p/p_0)$  при различных концентрациях газовой фазы среды близки к линейным (см. рис. 4); при повышении начального давления среды (до  $0.7$  МПа) скорость детонационных волн (в системах „жидкое горючее–пузырьки окислителя“) стремится к скорости

звука в жидкости [5]. Отличие величин скорости распространения детонационных волн на различных расстояниях от поверхности пузырьковой среды  $L$ , обусловленное влиянием гидростатического давления, уменьшается при повышении начального давления пузырьковой среды и становится несущественным при  $p \geq 0.06\text{--}0.08$  МПа (см. рис. 4).

Зависимость параметров детонационных волн от начального давления пузырьковых сред обусловлена со-



**Рис. 4.** Зависимости скорости детонационных волн  $D(p/p_0)$ ;  $\alpha = 0.5$ ,  $\beta_0 = 0.5$  (1, 2),  $1$  (3) и  $2\%$  (4);  $L = 3.10$  (1) и  $2.55$  м (2–4).

путствующим 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 (см. рис. 4), а давление снижается (влияние энергосодержания пузырьковых сред на параметры детонационных волн изучено в [6]).

## Заключение

Изучены детонационные волны в однокомпонентных пузырьковых средах типа „химически неактивная жидкость–пузырьки химически активного газа“: водно-глицериновые растворы с пузырьками ацетиленокислородной стехиометрической смеси. Экспериментально исследовано влияние начального давления пузырьковых сред на условия инициирования, структуру, скорость распространения и давление детонационных волн. Установлено, что детонационные волны в пузырьковых средах с объемной концентрацией глицерина 50% при концентрации газовой фазы  $\leq 2\%$  и начальном давлении в диапазоне 0.1–0.002 МПа инициируются ударными волнами с амплитудами 1.7 МПа. Волна пузырьковой детонации — это уединенная волна длительностью 50–70  $\mu\text{s}$  с пульсационным профилем, давление за которой релаксирует к величине, близкой к давлению перед волной. Амплитуда пульсаций давления, длительность которых составляет 3–5  $\mu\text{s}$ , достигает 15–30 МПа. Осредненное по пульсациям давление детонационных волн в пузырьковых средах при атмосферном давлении равно 6–8 МПа. При варьировании начального давления пузырьковой среды структура детонационных волн остается качественно идентичной. Скорость распространения волн детонации снижается с увеличением концентрации газовой фазы пузырьковой среды и при уменьшении вязкости жидкого компонента системы. С понижением начального давления пузырьковой среды от атмосферного до 0.01 МПа скорость детонационных волн падает примерно в 1.5 раза; при этом давление волн детонации уменьшается примерно в 2 раза, а длительность волн практически не меняется. Зависимость скорости распространения и давления детонационных волн от начального давления пузырьковых сред обусловлена сопутствующим изменением энергосодержания системы. Таким образом, варьирование начального давления 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. № 2. С. 130–134.
- [2] Сычев А.И. // Физика горения и взрыва. 1985. Т. 21. № 3. С. 103–110.
- [3] Сычев А.И., Пинаев А.В. // Прикл. механика и техн. физика. 1986. № 1. С. 133–138.
- [4] Пинаев А.В., Сычев А.И. // Физика горения и взрыва. 1987. Т. 23. № 6. С. 76–84.
- [5] Пинаев А.В., Сычев А.И. // Физика горения и взрыва. 1986. Т. 22. № 3. С. 109–118.
- [6] Сычев А.И. // Физика горения и взрыва. 1994. Т. 30. № 1. С. 86–91.