

## Столкновение детонационных волн в пузырьковых средах

© 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 2018 г.)

Экспериментально исследован процесс взаимодействия детонационных волн в пузырьковых средах при столкновении. Осуществлен процесс встречного столкновения детонационных волн в пузырьковых средах. Получены данные о критических условиях инициирования, структуре и параметрах волн детонации в пузырьковых средах. Изучены структура и свойства постдетонационных волн — волновых возмущений, образующихся при столкновении волн „пузырьковой“ детонации.

DOI: 10.21883/JTF.2019.02.47066.233-18

### Введение

Детонация — самоподдерживающийся процесс. Существование детонационных волн обеспечивается химической энергией, содержащейся в среде. Детонационная волна осуществляет процесс высвобождения химической энергии среды. В свою очередь, выделяющаяся энергия компенсирует энергопотери волны детонации на преобразование среды и тем самым обеспечивает процесс распространения волны. В случае перехода волны детонации из химически активной в химически неактивную среду энергетические потери волны остаются некомпенсированными, и волна затухает.

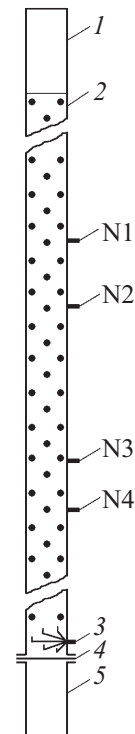
Волновые возмущения, в которые трансформируются детонационные волны при переходе в химически неактивные (инертные) среды, определяются [1,2] как постдетонационные волны. Постдетонационные волны образуются, в частности, при переходе волны детонации в жидкость [1,2] или в химически неактивную пузырьковую среду [2,3] и при отражении волны пузырьковой детонации от твердой границы [2,4]. Другим примером постдетонационных волн являются волновые возмущения, в которые преобразуются детонационные волны при столкновении.

Цель настоящей работы — изучить закономерности процесса взаимодействия детонационных волн в пузырьковых средах при столкновении.

### Экспериментальная установка

Экспериментальные исследования детонационных волн в пузырьковых средах проведены в вертикально расположенной ударной трубе с внутренним диаметром 40 мм и высотой 4.35 м (рис. 1), состоящей из секции низкого давления и двух секций высокого давления, расположенных сверху и снизу секции низкого давления (нижняя секция высокого давления отделена от секции низкого давления разрывной диафрагмой). Секция низкого давления высотой 3.25 м содержала пузырьковую среду; пузырьки диаметром  $2.5 \pm 0.1$  мм

генерировались при прохождении газа через форсунку — систему капилляров, вводимых в жидкость через стенку ударной трубы в непосредственной близости от диафрагмы; давление на поверхности пузырьковой среды поддерживалось равным атмосферному. Секции высокого давления ударной трубы высотой 0.65 (верхняя) и 0.45 м (нижняя) заполнялись до атмосферного давления ацетилено-кислородной стехиометрической газовой смесью ( $C_2H_2 + 2.5O_2$ ), сжигание которой



**Рис. 1.** Принципиальная схема экспериментальной установки: 1 — верхняя секция высокого давления, 2 — секция низкого давления, 3 — форсунка, 4 — диафрагма, 5 — нижняя секция высокого давления; N1–N4 — датчики давления (расстояние между датчиками N1 и N2, N2 и N3, N3 и N4 — 170, 370 и 70 мм соответственно).

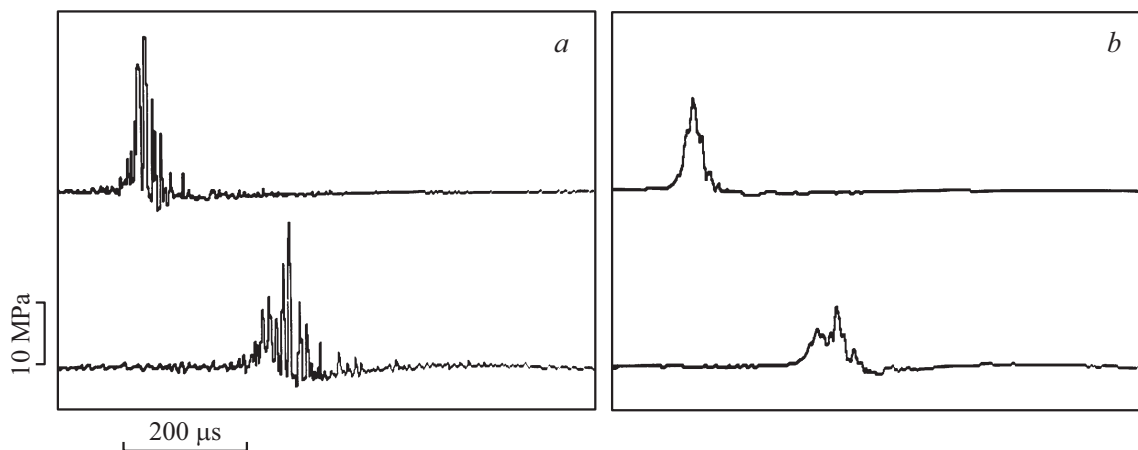


Рис. 2. Осциллограммы давления детонационной волны ДВ до (а) и после (б) осреднения пульсаций давления.  $\alpha = 0.5$ ,  $\beta_0 = 0.5\%$ .

генерирует ударные волны в пузырьковой среде [5]. При этом амплитуда ударных волн соответствует давлению, развивающемуся над поверхностью пузырьковой среды при сгорании горючего газа в замкнутом объеме секции высокого давления ударной трубы [6]. Распространяющиеся навстречу друг другу ударные волны в свою очередь инициировали в химически активной пузырьковой среде встречные детонационные волны. Параметры детонационных волн (скорость распространения, давление) измеряли с помощью четырех пьезоэлектрических датчиков давления, расположенных в средней части секции низкого давления ударной трубы. Сигналы датчиков давления регистрировались цифровыми осциллографами С9-16.

Детонационные волны изучены в пузырьковых средах типа „химически неактивная жидкость — пузырьки химически активного газа“ [5]  $L(\alpha) - \beta_0(C_2H_2 + 2.5O_2)$ : здесь  $L(\alpha)$  — водно-глицериновый раствор с объемной концентрацией глицерина  $\alpha = 0.25$  или  $0.5$  (вязкость растворов  $2.27 \cdot 10^{-3}$  и  $6.84 \cdot 10^{-3}$  Pa · s соответственно);  $(C_2H_2 + 2.5O_2)$  — пузырьки химически активного газа;  $\beta_0$  — объемная концентрация газовой фазы.

## Экспериментальные результаты и их обсуждение

Распространение ударной волны в пузырьковой среде вызывает сжатие пузырьков газа и воспламенение химически активных веществ, содержащихся в среде [5]. Энерговыделение в среде приводит к формированию самоподдерживающегося автоволнового стационарного процесса — волны „пузырьковой“ детонации [6].

Детонационные волны в пузырьковых средах способны инициировать ударные волны с амплитудой, большей критической. В пузырьковых средах с  $\alpha = 0.5$  при  $\beta_0 = 0.5$  и  $1\%$  ударные волны, инициирующие детонационные волны, распространяющиеся в пузырьковой среде сверху вниз (ВДВ — „верхняя“ детонационная волна) и снизу вверх (НДВ — „нижняя“ детонационная волна),

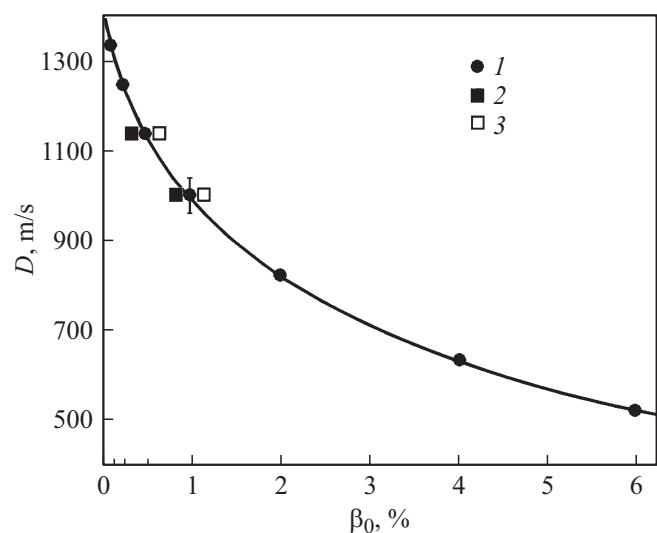
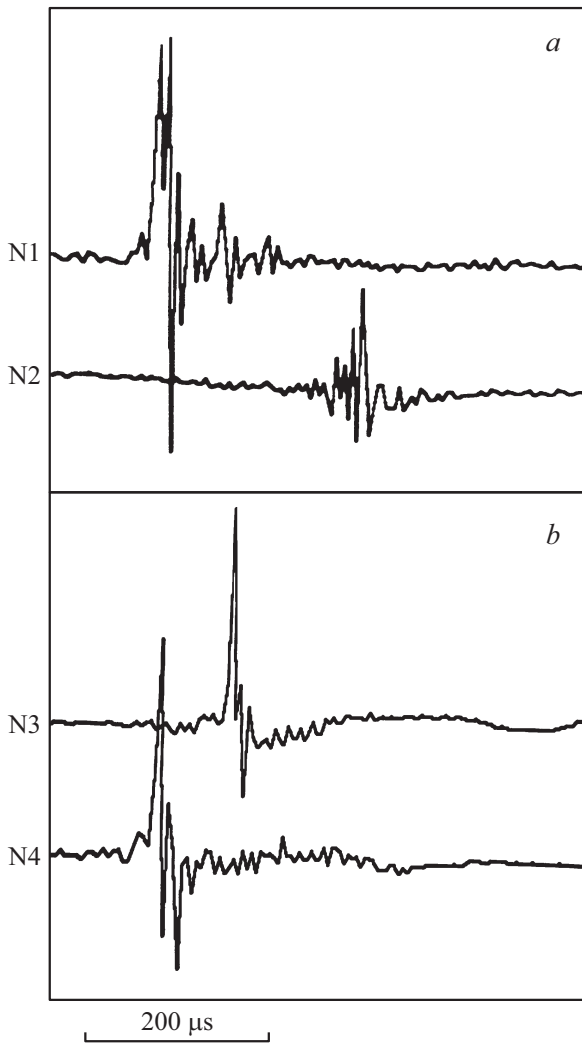


Рис. 3. Зависимости скорости  $D(\beta_0)$  волн детонации ДВ (1), ВДВ (2) и НДВ (3).  $\alpha = 0.5$ .

имеют критические амплитуды  $\leq 1.7$  МПа, совпадающие с величиной критической амплитуды ударной волны, инициирующей одиночную детонационную волну (ДВ).

Структура детонационных волн ВДВ, НДВ и ДВ качественно идентична: волны „пузырьковой“ детонации это уединенные волны с пульсационным профилем давления (рис. 2, а). Пульсации давления являются следствием генерирования ударных волн пузырьками газа, воспламенившихся в результате сжатия в волне детонации. Стохастичность пульсаций давления обусловлена хаотичностью распределения пузырьков газа в жидкости. Регистрируемая амплитуда пульсаций давления, длительность которых составляет  $3-5 \mu s$ , достигает  $15-30$  МПа.

Осреднение пульсаций давления позволяет получить эффективный профиль давления волны детонации (рис. 2, б). Сигналы датчиков давления осреднялись с



**Рис. 4.** Осциллограммы давления детонационных волн ВДВ (а) и НДВ (б).  $\alpha = 0.5$ ,  $\beta_0 = 1\%$ .

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. Эффективное (осредненное по пульсациям) давление детонационных волн в исследованных пузырьковых средах составляет 6–8 МПа. Длительность детонационных волн (временная характеристика, определяемая на нулевом уровне осредненного по пульсациям сигнала датчика давления) равна 50–70  $\mu\text{s}$ .

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  $D$  в пузырьковых средах при различных концентрациях газовой фазы среды  $\beta_0$  (каждая точка — среднее данных 5–10 опытов). Характер зави-

симостей  $D(\beta_0)$  детонационных волн ДВ, ВДВ и НДВ является общим: с увеличением концентрации газовой фазы пузырьковой среды  $\beta_0$  скорость волн детонации  $D$  снижается.

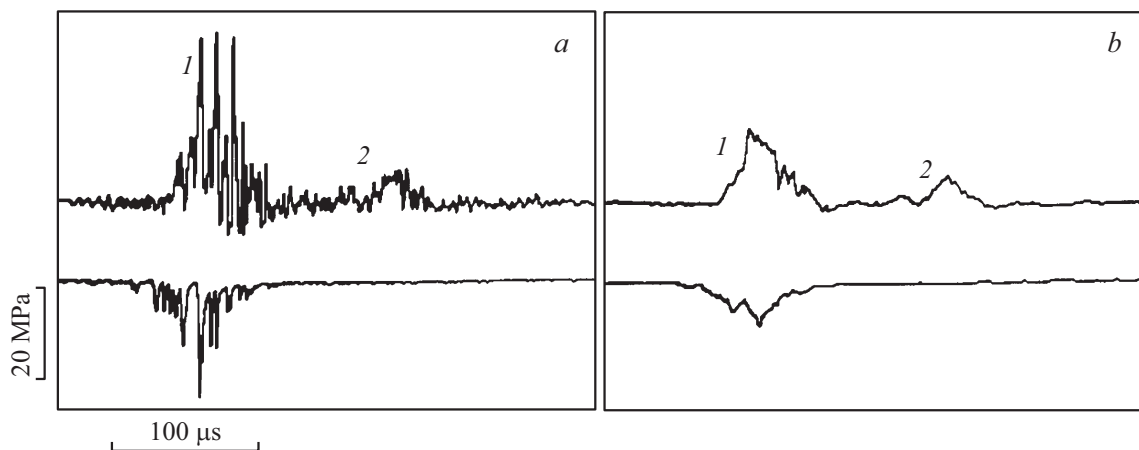
Таким образом, критические условия инициирования, структура и свойства волн „пузырьковой“ детонации ДВ, ВДВ и НДВ совпадают — детонационные волны ДВ, ВДВ и НДВ идентичны. Детонация в пузырьковых средах это автоволновой процесс: характеристики детонационных волн не зависят от условий инициирования и определяются параметрами и свойствами пузырьковой среды.

На рис. 4 зарегистрировано встречное взаимодействие детонационных волн: сигналы датчиков (N1, N2) и (N3, N4) — осциллограммы давления детонационных волн ВДВ и НДВ соответственно, полученные в одном опыте. В этом случае столкновение детонационных волн ВДВ и НДВ произошло на участке ударной трубы между датчиками N2 и N3.

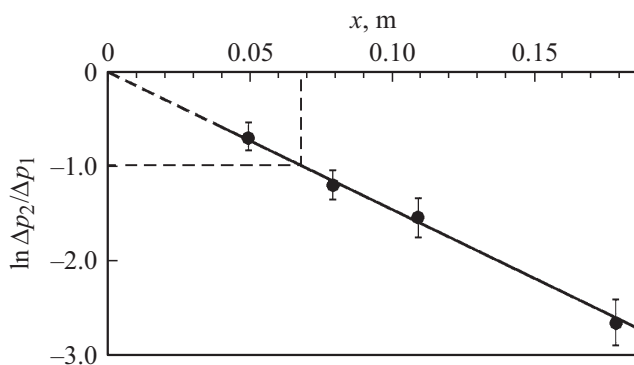
Детонация — самоподдерживающийся процесс. Существование детонационных волн обеспечивается энерговыделением в среде. При этом распространение волн детонации приводит к необратимому преобразованию среды — детонацию можно представить как процесс, переводящий среду из химически активного в химически неактивное состояние. Волны, в которые трансформируются детонационные волны ВДВ и НДВ после столкновения (постдетонационные волны), распространяются уже по химически неактивной среде. Отсутствие энерговыделения в среде приводит (вследствие действия диссипативных процессов) к затуханию постдетонационных волн. На рис. 4 не наблюдается постдетонационных волн; данный факт позволяет сделать вывод о том, что постдетонационные волны при данных начальных параметрах пузырьковой среды затухают на расстоянии < 185 mm (половина расстояния между датчиками N2 и N3).

Чрезвычайно быстрое затухание постдетонационных волн и стохастичность самого процесса взаимодействия детонационных волн не позволяют проследить динамику постдетонационных волн, образующихся при взаимодействии волн пузырьковой детонации. С учетом данного обстоятельства заметим, что образующиеся при взаимодействии волн „пузырьковой“ детонации постдетонационные волны, распространяющиеся от границы взаимодействия детонационных волн, аналогичны постдетонационной волне, в которую трансформируется волна детонации при отражении от твердой преграды. Исследования процесса отражения детонационных волн от твердой преграды позволяют получить данные о свойствах постдетонационных волн.

Параметры детонационной и отраженной волн регистрировали на различных расстояниях от торца ударной трубы ( $x = 6\text{--}180\text{ mm}$ ). Волна „пузырьковой“ детонации имеет пульсационную структуру (рис. 5, а). Пульсации давления меньшей амплитуды наблюдаются и в отраженной волне (рис. 5, а).



**Рис. 5.** Осциллограммы давления детонационной (1) и отраженной (2) волн (верхний луч) и свечения пузырьковой среды (нижний луч).  $\alpha = 0.5$ ,  $\beta_0 = 1/4\%$ ,  $x = 80$  мм; *a* — до осреднения пульсаций давления, *b* — после осреднения пульсаций давления.



**Рис. 6.** Зависимость  $\ln(\Delta p_2/\Delta p_1)(x)$ .  $\alpha = 0.5$ ,  $\beta_0 = 1/4\%$ .

Свечение пузырьковой среды, являющееся следствием воспламенения пузырьков газа в волне детонации, также имеет пульсационный характер (рис. 5, *a*). В отраженной волне свечение пузырьковой среды отсутствует (рис. 5, *a*). Отраженная волна, образуемая при взаимодействии волны детонации с твердой преградой, распространяется в химически неактивной среде и является, таким образом, постдетонационной волной.

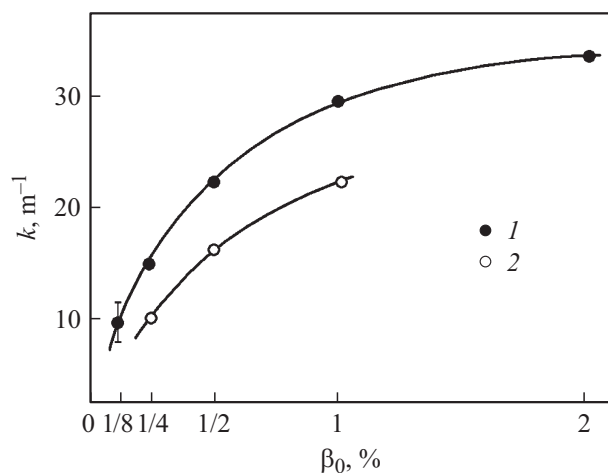
Волна „пузырьковой“ детонации и отраженная волна с осредненными пульсациями давления это уединенные волны, давление за которыми релаксирует к значению, близкому к начальному давлению в пузырьковой среде.

Для описания детонационной и отраженной волн введем следующие характеристики волн:  $p_1$  и  $p_2$  — амплитуда (осредненное по пульсациям давление в максимуме) детонационной и отраженной волн соответственно;  $\tau_1$  и  $\tau_2$  — длительность (временная характеристика, определяемая на нулевом уровне осредненного по пульсациям сигнала датчика давления) детонационной и отраженной волн соответственно;  $\lambda_1 = D_1 \cdot \tau_1$  и  $\lambda_2 = D_2 \cdot \tau_2$  — линейная протяженность (длина) детонационной и отраженной волн соответственно (здесь

$D_1$  и  $D_2$  — скорости распространения детонационной и отраженной волн соответственно).

Результаты измерений осредненного давления отраженной волны  $p_2$  представлены на рис. 6 в виде логарифмической зависимости отношения давлений  $\Delta p_2/\Delta p_1$  от расстояния пробега волны  $x$  (здесь  $\Delta p_2 = p_2 - p_0$ ,  $\Delta p_1 = p_1 - p_0$ , осредненное по пульсациям давление детонационных волн  $p_1 = 6-8$  МПа,  $p_0 = 0.1$  МПа — начальное давление пузырьковой среды).

Зависимость относительного давления отраженной (постдетонационной) волны от расстояния выражается соотношением  $\Delta p_2/\Delta p_1 = \exp(-k \cdot x)$ ; здесь  $k$  — постоянная затухания (коэффициент ослабления) постдетонационной волны. Значения  $k$  представлены на рис. 7 (каждая точка — среднее нескольких измерений). Величина  $k$  возрастает при увеличении концентрации газовой фазы и вязкости жидкого компонента пузырьковой среды. Отметим, что полученная на основании анализа рис. 4 экспериментальная оценка расстояния затухания постдетонационных волн, образующихся при



**Рис. 7.** Зависимости  $k(\beta_0)$ .  $\alpha = 0.5$  (1) и 0.25 (2).

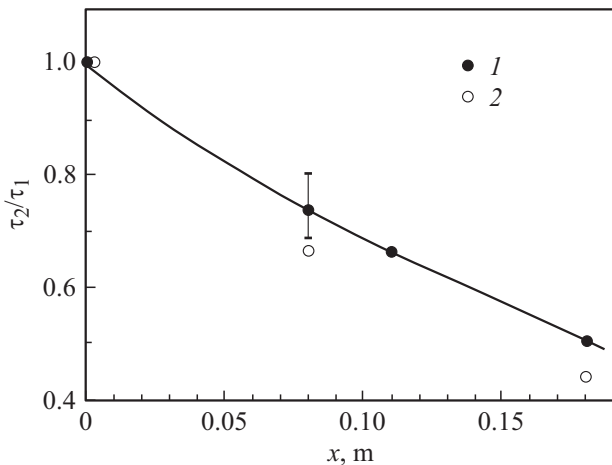


Рис. 8. Зависимости  $\tau_2/\tau_1(x)$ .  $\alpha = 0.5$  (1) и  $0.25$  (2).

встречном столкновении волн детонации, согласуется с приведенными на рис. 7 данными.

Скорость распространения отраженных волн в исследованном диапазоне расстояний от торца ударной трубы постоянна и примерно равна скорости детонационных волн:  $D_2 = (1.0 \pm 0.1) \cdot D_1$ .

Линейная протяженность детонационных волн  $\lambda_1$  в исследованных пузырьковых средах (рис. 3) составляет 3–8 см (длительность волн  $\tau_1 \approx 60 \mu s$ ). Линейная протяженность отраженной волны  $\lambda_2$  вблизи от твердой преграды равна длине детонационной волны ( $\lambda_2 \approx \lambda_1$ ) и уменьшается по мере дальнейшего распространения: несмотря на то, что скорость отраженной волны с расстоянием пробега остается примерно постоянной ( $D_2 \approx D_1$ ), длительность волны  $\tau_2$  при этом уменьшается (рис. 8).

## Заключение

Экспериментально исследован процесс столкновения детонационных волн в пузырьковых средах. Установлено, что детонационные волны, распространяющиеся в пузырьковой среде как сверху вниз, так и снизу вверх, идентичны одиночным волнам „пузырьковой“ детонации. Инициировать детонационные волны в пузырьковых средах способны ударные волны с амплитудой, большей критической. Волны „пузырьковой“ детонации это уединенные волны с пульсационным профилем давления. Пульсации давления являются следствием генерирования ударных волн пузырьками газа, воспламенившихся в результате сжатия в волне детонации. Детонационные волны с осредненными пульсациями давления это уединенные волны, давление за которыми релаксирует к величине, близкой к давлению перед волной. Детонационные волны в пузырьковых средах распространяются со скоростью, большей равновесной скорости звука в пузырьковой среде, но меньшей скорости звука в

жидкости. С увеличением концентрации газовой фазы пузырьковой среды скорость волн детонации снижается.

При столкновении волны „пузырьковой“ детонации „аннигилируют“ — трансформируются в постдетонационные волны, затухающие на расстоянии нескольких длин детонационных волн. Установлено, что постдетонационные волны имеют, также как и волна детонации, пульсационную структуру; постдетонационные волны с осредненными пульсациями давления это уединенные волны, давление за которыми релаксирует к значению, близкому к начальному давлению в пузырьковой среде. Скорость распространения постдетонационных волн постоянна и примерно равна скорости детонационных волн. Длительность постдетонационных волн с расстоянием пробега уменьшается. Давление постдетонационных волн спадает по экспоненциальному закону. Коэффициент затухания постдетонационных волн возрастает при увеличении концентрации газовой фазы и вязкости жидкого компонента пузырьковой среды.

## Список литературы

- [1] Сычев А.И. // Физика горения и взрыва. 2002. Т. 38. № 2. С. 99–103.
- [2] Сычев А.И. // Динамика сплошной среды. Акустика неоднородных сред. 2007. Вып. 124. С. 29–36.
- [3] Сычев А.И. // Физика горения и взрыва. 2001. Т. 37. № 4. С. 96–99.
- [4] Сычев А.И. // Физика горения и взрыва. 2000. Т. 36. № 3. С. 107–113.
- [5] Сычев А.И. // Физика горения и взрыва. 1985. Т. 21. № 2. С. 130–134.
- [6] Сычев А.И. // Физика горения и взрыва. 1985. Т. 21. № 3. С. 103–110.