

## ОТРАЖЕНИЕ ВОЛНЫ ПУЗЫРЬКОВОЙ ДЕТОНАЦИИ ОТ ТВЕРДОЙ ГРАНИЦЫ

А. И. Сычев

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

Экспериментально исследован процесс отражения детонационных волн от твердой границы в моно- и полидисперсных пузырьковых средах. Прослежена эволюция отраженной волны, образующейся при взаимодействии волны детонации с торцом ударной трубы. Изучена структура и измерены давления детонационной и отраженной волн при различных параметрах пузырьковых сред. Определены постоянные затухания отраженных волн. Измерены скорости распространения детонационной и отраженной волн. Исследовано влияние размера пузырьков газа на характеристики детонационной и отраженной волн. Проведен качественный анализ механизмов диссипации энергии детонационных и отраженных волн в пузырьковых средах.

Существование волны детонации как самоподдерживающегося процесса обеспечивается энергией, выделяющейся в химически активной среде. При этом детонационную волну можно представить как процесс, переводящий среду из химически активного в химически неактивное состояние. Отраженная волна, образующаяся при взаимодействии детонационной волны с твердой границей, распространяется, таким образом, в химически неактивной среде. Так как энергетические потери волны остаются нескомпенсированными, отраженная волна затухает.

Исследованию процессов распространения и отражения ударных волн в химически неактивных и активных пузырьковых средах посвящены работы [1–3] и [4, 5] соответственно. Цель настоящей работы — изучение отражения детонационных волн в различных пузырьковых средах от твердой границы.

Экспериментальные исследования проведены на вертикально расположенной гидродинамической ударной трубе высотой 4,3 м с внутренним диаметром 40 мм. Ударная труба состоит из секций высокого и низкого давления, разделенных разрывной диафрагмой. Секцию низкого давления заполняли жидкостью, пузырьки в которой формировались при прохождении газа через систему капиллярных отверстий. При этом использованы форсунки, позволяющие генерировать пузырьки газа заданного диаметра. Высота столба пузырьковой среды составляла 3,6 м. Объемную концентрацию газовой фазы  $\beta_0$  определяли по подъему столба пузырьковой среды при всплытии пу-

зырьков газа в жидкости. Опыты проводили при  $\beta_0 \leq 6\%$ . Давление на поверхности пузырьковой среды было равно атмосферному.

Детонационные волны инициировали ударными волнами, генерируемыми в пузырьковой среде при сжигании ацетиленокислородной стехиометрической смеси в секции высокого давления. Амплитуду инициирующих ударных волн варьировали изменением начального давления взрывчатой газовой смеси.

Параметры детонационных и отраженных волн регистрировали пьезоэлектрическими датчиками давления, сигналы с которых подавали на осциллографы С9-16 и С8-17. Свечение пузырьковой среды, сопровождающее детонационный процесс, фиксировали фотоэлектронным умножителем ФЭУ-102, оптический ввод которого располагали диаметрально противоположно датчику давления.

Процесс отражения детонационных волн исследован в моно- и полидисперсных пузырьковых средах типа «химически неактивная жидкость — пузырьки взрывчатого газа»: жидкость — водоглицериновые растворы с объемной концентрацией глицерина  $\alpha = 0,25$  и  $0,5$  (вязкость растворов  $\mu = 2,27 \cdot 10^{-3}$  и  $6,84 \cdot 10^{-3}$  Па·с соответственно); газ — ацетиленокислородная стехиометрическая смесь. Монодисперсные среды (МДС) — системы, содержащие пузырьки газа одного диаметра  $d = d_1 \div d_4$  ( $d_1 = 1,9 \pm 0,1$ ,  $d_2 = 2,5 \pm 0,1$ ,  $d_3 = 3,9 \pm 0,2$  или  $d_4 = 5,0 \pm 0,3$  мм). Полидисперсные среды (ПДС) — системы, жидкость в которых содержала смесь пузырьков газа диаметром  $d_1 \div d_4$

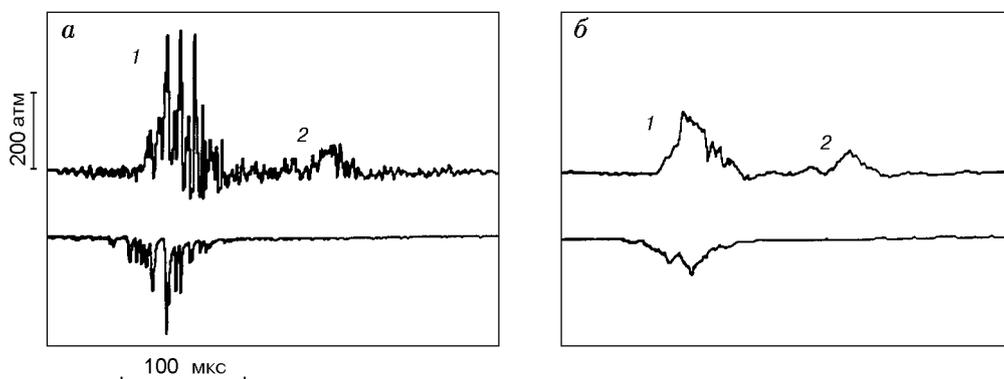


Рис. 1. Осциллограммы давления детонационной (1) и отраженной (2) волн (верхний луч) и свечения пузырьковой среды (нижний луч):

МДС,  $d = d_2$ ,  $\alpha = 0,5$ ,  $\beta_0 = 1/4 \%$ ,  $x = 0,080$  м; *a* — до осреднения, *б* — после осреднения пульсаций

при примерно равном газосодержании для пузырьков газа различных размеров.

Пузырьки газа в жидкости имеют, вообще говоря, несферичную форму и представляют собой сплюснутые эллипсоиды вращения (сфероиды). Эффективный диаметр пузырьков газа в МДС и ПДС определялся из условия равенства объемов сфероида и сферы:  $d = a(b/a)^{1/3}$  ( $a$ ,  $b$  — большая и малая оси сфероида). Величины  $a$  и  $b$  для каждого пузырька измерялись микрометром 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.

Инициировать пузырьковую детонацию способны ударные волны с амплитудой выше критической  $p_1^*$ , значение которой зависит от свойств пузырьковой среды и возрастает при увеличении  $\beta_0$  и уменьшении  $\mu$ . В МДС  $p_1^*$  зависит от диаметра пузырьков газа: наименьшие значения  $p_1^*$  наблюдаются в системах с пузырьками газа диаметром  $d_2$ . В исследованных МДС  $p_1^* = 17 \div 60$  атм. В ПДС при  $\alpha = 0,5$  значение  $p_1^* = 17$  атм.

Параметры падающей (детонационной) и отраженной (постдетонационной) волн регистрировали на различных расстояниях от торца ударной трубы ( $x = 0,006 \div 0,180$  м.) Волна пузырьковой детонации имеет сложную структуру (рис. 1, *a*). Пульсационный характер профиля давления детонационной волны обусловлен дискретным распределением источников химической энергии и является следствием из-

лучения пузырьками газа ударных волн. Длительность пульсаций давления  $\tau_{\text{п}} = 4 \div 6$  мкс. Пульсации меньшей амплитуды наблюдаются и в отраженной волне. Свечение пузырьковой среды, являющееся следствием воспламенения пузырьков газа, также носит пульсационный характер. Стохастичность пульсаций давления и свечения обусловлена хаотичностью распределения пузырьков газа в жидкости. Воспламенение пузырьков газа (энергосвечение) имеет место только в детонационной волне. В отраженной волне энергосвечение отсутствует. Таким образом, отраженная волна распространяется в химически неактивной среде.

Осреднение пульсаций давления позволяет получить эффективные профили давления волны детонации и отраженной волны. Осреднение пульсаций проводилось двумя способами. В примере, показанном на рис. 1, сглаживание пульсаций выполнено с использованием штатной процедуры осциллографа С9-16. Сигнал осреднялся по  $n$  точкам; при временном интервале между точками  $\Delta t$  (время дискретизации) постоянная времени сглаживания сигнала  $\tau_0 = n\Delta t$ . В данном случае  $\tau_0 = 10$  мкс. При измерении скорости распространения детонационных волн для сглаживания пульсаций давления использовались интегрирующие цепочки [6].

Волна пузырьковой детонации и отраженная волна с осредненными пульсациями давления — это уединенные волны, давление за которыми релаксирует к значению, близкому к начальному.

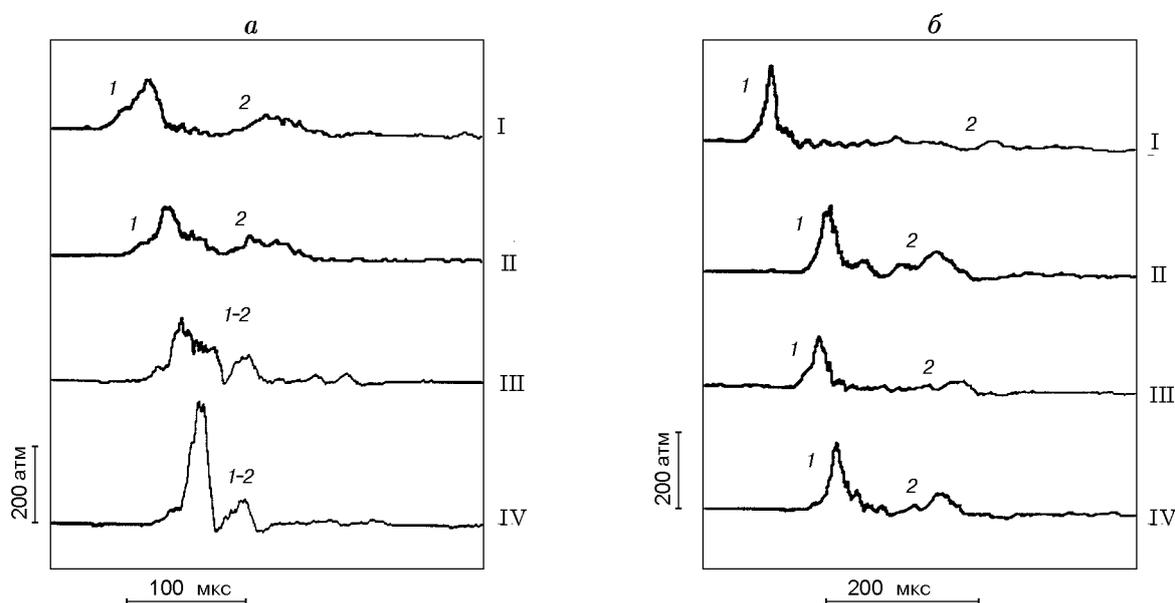


Рис. 2. Осциллограммы осредненных по пульсациям давлений  $p_1$  (1),  $p_2$  (2) и  $p_{1-2}$  (1-2): МДС,  $d = d_2$ ,  $\alpha = 0,5$ ,  $\beta_0 = 1/4 \%$ ; а —  $x$ , м: I — 0,066, II — 0,046, III — 0,026, IV — 0,006; б —  $x$ , м: I — 0,180, II, IV — 0,080, III — 0,110

Для описания детонационной и отраженной волн введем следующие характеристики волн: амплитуда (давление) волн  $p$  — осредненное по пульсациям давление в максимуме ( $p_1$  и  $p_2$  для детонационной и отраженной волн соответственно); длительность волн  $\tau$  — временная характеристика, определяемая на нулевом уровне осредненного по пульсациям сигнала датчика давления ( $\tau_1$  и  $\tau_2$  для детонационной и отраженной волн соответственно); линейная протяженность (длина) волны  $\lambda$  — величина, определяемая длительностью волны  $\tau$  и скоростью  $D$  ее распространения ( $\lambda_1 = D_1 \tau_1$  и  $\lambda_2 = D_2 \tau_2$  для детонационной и отраженной волн соответственно, где  $D_1$  и  $D_2$  — скорости распространения детонационной и отраженной волн соответственно).

На рис. 2,а представлен процесс трансформации детонационной волны в отраженную при взаимодействии волны детонации с твердой границей. (На рисунке даны осредненные по пульсациям сигналы датчиков давления, полученные в одном опыте.) Анализ процесса отражения детонационной волны показывает, что существуют две качественно различные пространственные области. В непосредственной близости от торца ударной трубы наблюдается наложение падающей детонационной волны и собственно отраженной волны, образу-

ющейся при взаимодействии волны детонации с твердой границей. Протяженность этой области определяется длиной детонационной и отраженной волн и равна примерно  $\lambda/2$ , так как вблизи отражающей поверхности  $\lambda_1 \simeq \lambda_2 = \lambda$ . На больших расстояниях от торца ударной трубы имеет место временное разделение падающей и отраженной волн. Процесс эволюции отраженной волны прослежен на рис. 2,б: по мере распространения волны ее давление уменьшается.

Давление волны, образующейся в результате суперпозиции детонационной и отраженной волн ( $p_{1-2}$ ) у твердой границы, примерно в два раза больше давления детонационной волны  $p_1$ :  $p_{1-2} = (2,0 \pm 0,5)p_1$ . Результаты измерений осредненного по пульсациям давления отраженной волны  $p_2$  в МДС представлены на рис. 3 в виде логарифмической зависимости отношения  $p_2/p_1$  от расстояния  $x$  (значения  $p_1$  приведены на рис. 5). Зависимость относительного давления отраженной волны от расстояния можно выразить соотношением  $p_2/p_1 = \exp(-kx)$ , где  $k$  — постоянная затухания (коэффициент ослабления) отраженной волны. Значения  $k$  представлены на рис. 4 (каждая точка — среднее  $10 \div 30$  измерений). Постоянная затухания  $k$  зависит от диаметра пузырьков газа и возрастает при увеличении  $\beta_0$  и  $\mu$ .

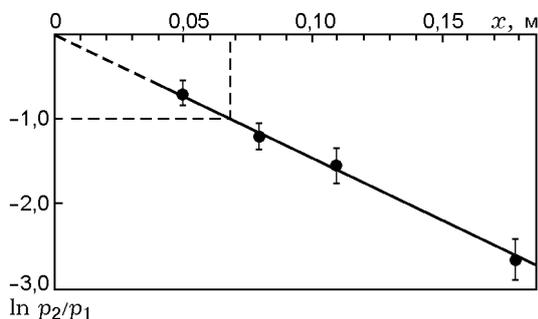


Рис. 3. Зависимость  $\ln(p_2/p_1)(x)$ :  
МДС,  $d = d_2$ ,  $\alpha = 0,5$ ,  $\beta_0 = 1/4 \%$

На рис. 5 приведены результаты измерений осредненного по пульсациям давления детонационных волн в различных МДС и ПДС (каждая точка — среднее  $10 \div 20$  измерений). Давление детонационных волн в МДС зависит от параметров и свойств пузырьковой среды: если при  $\beta_0 > 1 \div 2 \%$  давление можно считать приблизительно постоянным, то при меньших значениях  $\beta_0$  давление волн детонации уменьшается; величина  $p_1$  возрастает с увеличением вязкости жидкого компонента системы и зависит от диаметра пузырьков газа. Значительный разброс амплитуды детонационных волн является следствием хаотичного (неравномерного) распределения пузырьков газа в жидкости [6].

Заметим, что представленные на рис. 5 данные измерений осредненного по пульсациям давления детонационных волн носят в некотором смысле качественный характер, поскольку абсолютные значения осредненного давления зависят (в силу особенностей профиля давления детонационной волны (см. рис. 1, а)) от постоянной времени сглаживания сигнала [6] и от способа осреднения: значения осредненного давления, полученные с использованием интегрирующих цепочек, на  $25 \div 30 \%$  ниже, чем при использовании процедуры сглаживания осциллографа С9-16 (сопоставление проведено при одинаковых постоянных времени интегрирующей цепочки и процедуры сглаживания). Тем не менее результаты, полученные в одной постановке эксперимента, позволяют провести сопоставление значений осредненного давления детонационных волн при различных параметрах пузырьковых сред.

На рис. 6 приведены результаты измерений скорости детонационных и отраженных волн, распространяющихся в МДС и ПДС

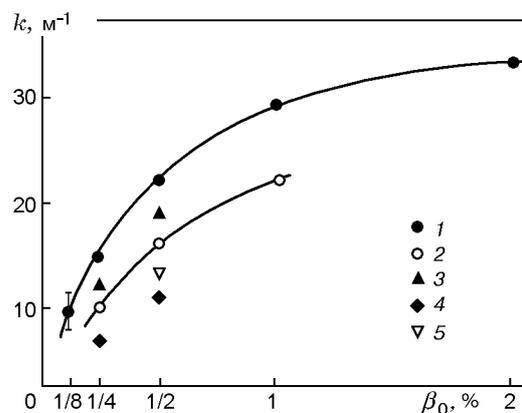


Рис. 4. Зависимости  $k(\beta_0)$ :  
1-4 — МДС, 5 — ПДС;  $\alpha = 0,5$  (1, 3-5) и  $0,25$  (2);  
1, 2 —  $d = d_2$ , 3 —  $d = d_1$ , 4 —  $d = d_4$

(каждая точка — среднее нескольких опытов). Скорость детонационных волн измеряли с помощью датчиков давления одновременно на двух участках ударной трубы с базами  $\Delta x = 0,10, 0,17$  м. Для сглаживания пульсаций давления использовали либо интегрирующие цепочки, либо процедуру сглаживания осциллографов С9-16. Характер зависимостей  $D_1(\beta_0)$  в различных средах общий: с увеличением концентрации газовой фазы скорость распространения детонационных волн уменьшается. Значение  $D_1$  зависит от диаметра пузырьков газа. Скорость распространения отраженных волн  $D_2$  измеряли на различных участках с базами  $\Delta x = 0,02 \div 0,10$  м. В исследованном диапазоне расстояний от торца ударной трубы скорость отраженных волн постоян-

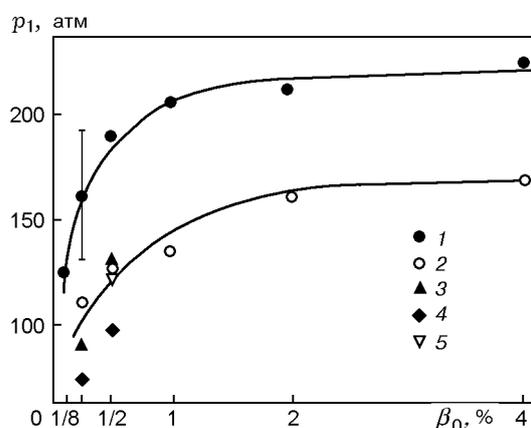


Рис. 5. Зависимости  $p_1(\beta_0)$ :  
1-4 — МДС, 5 — ПДС;  $\alpha = 0,5$  (1, 3-5) и  $0,25$  (2);  
1, 2 —  $d = d_2$ , 3 —  $d = d_1$ , 4 —  $d = d_4$

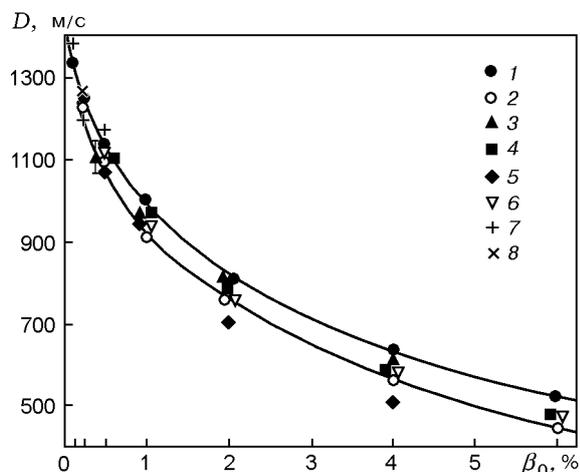


Рис. 6. Зависимости  $D_1(\beta_0)$  (1–6) и  $D_2(\beta_0)$  (7, 8): 1–5, 7, 8 — МДС, 6 — ПДС;  $\alpha = 0,5$  (1, 3–6, 7) и  $0,25$  (2, 8); 1, 2, 7, 8 —  $d = d_2$ , 3 —  $d = d_1$ , 4 —  $d = d_3$ , 5 —  $d = d_4$

на и примерно равна скорости детонационных волн (см. рис. 2,б):  $D_2 = (1, \pm 0,1)D_1$ .

Значение постоянной затухания, давления и скорости распространения отраженной волны в ПДС лежат в диапазоне изменения соответствующих параметров в МДС (см. рис. 4–6).

Линейная протяженность детонационных и отраженных волн — сложная функция параметров системы, так как определяется скоростью распространения и длительностью волн. Согласно данным рис. 6 скорость распространения детонационных волн в различных системах изменяется в широком диапазоне ( $D_1 = 400 \div 1300$  м/с); при этом длительность волн детонации  $\tau_1$ , определяемая на нулевом уровне осредненного по пульсациям сигнала датчика давления, зависит от диаметра пузырьков газа и равна  $45 \pm 15$ ,  $70 \pm 20$  и  $100 \pm 20$  мкс в системах с пузырьками диаметром  $d_1$ ,  $d_2$  и  $d_4$  соответственно. Таким образом, длина волн детонации  $\lambda_1$  в исследованных пузырьковых средах составляет  $0,02 \div 0,12$  м.

Отметим, что приведенные в [7] значения длительности волн детонации в системах с пузырьками газа диаметром  $d = d_1 \div d_4$ , лежащие в диапазоне  $\tau_1 = 25 \div 50$  мкс (при этом разброс значений от опыта к опыту достигал  $\pm 50\%$ ), следует считать нижней границей длительности волн детонации, так как значения  $\tau_1$  определялись в области с ярко выраженными пульсациями сигнала датчика давления (без осреднения пульсаций давления).

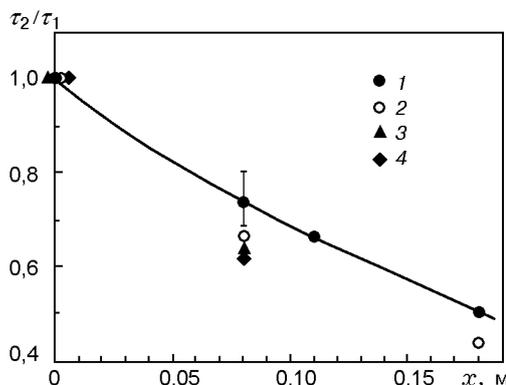


Рис. 7. Зависимости  $\frac{\tau_2}{\tau_1}(x)$ : 1–4 — МДС, 1, 2 —  $d = d_2$ , 3 —  $d = d_1$ , 4 —  $d = d_4$ ;  $\alpha = 0,5$  (1, 3, 4) и  $0,25$  (2)

Линейная протяженность отраженных волн вблизи твердой границы (на расстояниях от торца ударной трубы  $x \simeq \lambda_1$ ) примерно равна длине детонационной волны ( $\lambda_2 \simeq \lambda_1$ ) и уменьшается по мере дальнейшего распространения волны, так как, несмотря на то, что скорость распространения отраженной волны остается примерно постоянной ( $D_2 \simeq D_1$ ), длительность отраженных волн при этом уменьшается (см. рис. 2,б). Результаты измерения длительности отраженных волн  $\tau_2$  представлены на рис. 7.

При анализе результатов, приведенных на рис. 4–6, отмечена зависимость скорости распространения и давления детонационных волн и коэффициента ослабления отраженных волн от диаметра пузырьков газа. На рис. 8 данные рис. 4–6 представлены в виде таких зависимостей. Наибольшие значения  $D_1$ ,  $p_1$  и  $k$  достигаются в системе, содержащей пузырьки газа диаметром  $d_2$ . Следует отметить качественную корреляцию зависимостей  $D_1(d)$ ,  $p_1(d)$  и  $k(d)$ ; при этом затухание отраженных волн тем сильнее, чем выше скорость и давление детонационных волн.

Затухание отраженных волн связано с диссипативными процессами в пузырьковых средах. Существуют различные механизмы теплопотерь пузырьков газа через границу раздела газ — жидкость [7], относительная роль которых определяется физико-химическими свойствами среды, в частности размером пузырьков. В случае «малых» пузырьков газа (имеющих сферическую форму) основную роль играют теплопотери через стенки. С увеличением диаметра пузырьков газа

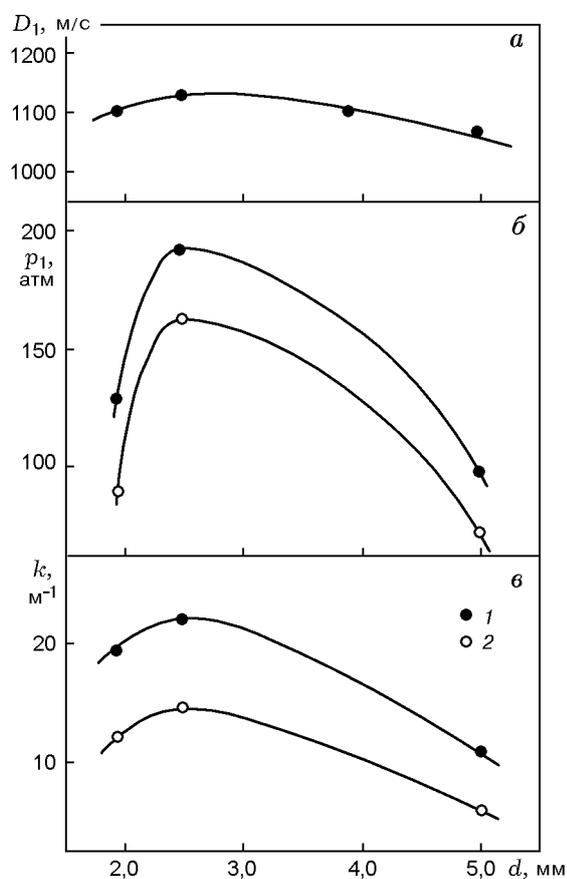


Рис. 8. Зависимости  $D_1(d)$  (а),  $p_1(d)$  (б) и  $k(d)$  (в):

а-в — МДС,  $d = d_2$ ,  $\alpha = 0,5$ ; а —  $\beta_0 = 1/2$  %, б, в —  $\beta_0 = 1/4$  (1) и  $1/2$  % (2)

эффективность этого механизма, с одной стороны, уменьшается из-за изменения соотношения площади поверхности и объема пузырька, а с другой стороны, увеличивается вследствие возрастания площади границы раздела газ — жидкость, обусловленного усиливающимися с ростом диаметра пузырьков искажениями поверхности пузырьков газа в процессе сжатия. Кроме этого, начальная деформация формы крупных пузырьков газа приводит (вследствие несимметричности процесса сжатия) к образованию кумулятивной струи жидкости, диспергирование которой в объеме пузырька также увеличивает теплотери пузырьков газа. Действие конкурирующих механизмов теплотери обуславливает немонотонный характер зависимостей от диаметра пузырьков газа как скорости распространения волн детонации [7], так и давления детонационных волн и коэффициента затухания отраженных волн.

Помимо тепловых потерь волна детонации при своем распространении затрачивает энергию на сжатие пузырьков газа. Потери детонационной волны компенсируются химической энергией, выделяющейся при воспламенении пузырьков газа. В случае отраженной волны компенсация энергетических потерь отсутствует, и, как следствие, отраженная волна затухает.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования процесса отражения детонационных волн от торца ударной трубы в пузырьковых средах показали, что детонационные и отраженные волны имеют пульсационный профиль давления. Волна пузырьковой детонации и отраженная волна с осредненными пульсациями давления — это уединенные волны. Давление детонационных волн возрастает при увеличении концентрации газовой фазы и при повышении вязкости жидкого компонента системы и зависит от диаметра пузырьков газа. Давление волны, образующейся в результате суперпозиции детонационной и отраженной волн, примерно в два раза больше давления детонационной волны. Давление отраженной волны с увеличением расстояния от торца ударной трубы уменьшается и описывается экспоненциальной зависимостью. Давление за волной детонации, так же как и за отраженной волной, релаксирует к значению давления перед волной. Постоянная затухания (коэффициент ослабления) отраженных волн зависит от диаметра пузырьков газа и возрастает при увеличении концентрации газовой фазы и повышении вязкости жидкого компонента системы. Скорость распространения детонационных волн понижается с увеличением концентрации газовой фазы и при уменьшении вязкости жидкого компонента системы и зависит от диаметра пузырьков газа. Скорость распространения отраженных волн в исследованном диапазоне расстояний от твердой границы постоянна и примерно равна скорости детонационных волн. Длительность отраженных волн с увеличением расстояния от торца ударной трубы уменьшается. Наибольшие значения скорости распространения, давления волн и постоянной затухания (при заданной концентрации газовой фазы) достигаются в системе, содержащей пузырьки газа определенного диаметра; при больших или меньших диаметрах пузырьков газа значения этих величин ниже. Затухание отраженных волн обусловлено наличием

диссипативных процессов в пузырьковых средах.

Автор признателен В. В. Митрофанову за обсуждение результатов работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 98-03-32325).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Паркин Б. Р., Гилмор Ф. Р., Броуд Г. А. Ударные волны в среде с пузырьками воздуха // Подводные и подземные взрывы. М.: Мир, 1974.
2. Гельфанд Б. Е., Губин С. А., Тимофеев Е. И. Отражение плоских ударных волн от твердой стенки в системе пузырьки газа — жидкость // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1978. № 2. С. 174–178.
3. Донцов В. Е., Кузнецов В. В., Марков П. Г., Накоряков В. Е. Распространение волн давления в жидкости с пузырьками газа разных размеров // Акуст. журн. 1989. Т. 35, № 1. С. 157–159.
4. Сычев А. И. Воспламенение систем жидкость — пузырьки газа ударной волной // Физика горения и взрыва. 1985. Т. 21, № 2. С. 130–134.
5. Сычев А. И. Волна детонации в системе жидкость — пузырьки газа // Физика горения и взрыва. 1985. Т. 21, № 3. С. 103–110.
6. Сычев А. И. Структура волны пузырьковой детонации // Физика горения и взрыва. 1994. Т. 30, № 4. С. 119–124.
7. Сычев А. И. Влияние размера пузырьков на характеристики волн детонации // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31, № 5. С. 83–91.

*Поступила в редакцию 16/IV 1999 г.*

---