

ПЕРЕХОД ВОЛНЫ ПУЗЫРЬКОВОЙ ДЕТОНАЦИИ В ХИМИЧЕСКИ НЕАКТИВНУЮ ПУЗЫРЬКОВУЮ СРЕДУ

А. И. Сычёв

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

Экспериментально исследован процесс перехода волны детонации из химически активной пузырьковой среды в химически неактивную пузырьковую среду. Изучена структура и измерены давления падающей (детонационной) и прошедшей (постдетонационной) волн при различных параметрах пузырьковых сред. Прослежена эволюция прошедшей волны. Определены постоянные затухания постдетонационных волн. Измерены скорости распространения детонационной и прошедшей волн. Проведен качественный анализ механизмов диссипации энергии детонационной и постдетонационной волн в пузырьковых средах.

Детонация — диссипативный процесс. Энергетические потери волны детонации компенсируются химической энергией, содержащейся в среде. При переходе детонационной волны из химически активной в химически неактивную среду энергетические потери волны остаются нескомпенсированными и вследствие диссипативных процессов волна затухает.

Цель настоящей работы — изучение процесса перехода волны детонации из химически активной пузырьковой среды в химически неактивную пузырьковую среду.

Экспериментальные исследования проведены на вертикально расположенной гидродинамической ударной трубе высотой 4,3 м с внутренним диаметром 40 мм [1]. Высота столба пузырьковой среды 3,6 м. Концентрация газовой фазы варьировалась в диапазоне $1/8 \leq \beta_0 \leq 4$ %. Диаметр пузырьков газа $(2,5 \pm 0,1)$ мм. Давление на поверхности пузырьковой среды было равно атмосферному.

Детонационные волны инициировали ударными волнами, генерируемыми в пузырьковой среде при сжигании ацетиленокислородной стехиометрической смеси. Амплитуду инициирующих ударных волн варьировали изменением начального давления взрывчатой газовой смеси. Инициировать пузырьковую детонацию способны ударные волны с амплитудой выше критического значения p_1^* , которое зависит от параметров пузырьковой среды и возрастает при увеличе-

нии β_0 . В исследованных пузырьковых средах $p_1^* = 17 \div 34$ атм.

Изучен процесс перехода детонационной волны из химически активной пузырьковой среды (минеральное вакуумное масло ВМ-3 с пузырьками кислорода) в химически неактивную пузырьковую среду (70 %-й (по объему) водоглицериновый раствор с пузырьками кислорода). Выбор данного состава водоглицеринового раствора определялся необходимостью обеспечить примерно равные скорости всплытия пузырьков газа в обеих жидкостях, что достигается при близких значениях вязкости жидкостей (вязкость ВМ-3 и 70 %-го водоглицеринового раствора равна $28,2 \cdot 10^{-3}$ и $27,1 \cdot 10^{-3}$ Па·с соответственно).

Параметры падающей (детонационной) и прошедшей (постдетонационной) волн на различных расстояниях x от границы раздела сред регистрировали четырьмя пьезоэлектрическими датчиками давления, сигналы которых фиксировали двумя осциллографами С9-16. Постдетонационная волна (как и волна детонации) имеет пульсационный профиль давления (рис. 1). Длительность пульсаций давления равна $4 \div 6$ мкс. Стохастичность пульсаций давления обусловлена хаотичностью распределения пузырьков газа в жидкости. Таким образом, распространение детонационной и постдетонационной волн сопровождается излучением высокочастотных волновых возмущений.

Осреднение пульсаций давления позволяет получить эффективный профиль давления детонационной и прошедшей волн. Волна пузырьковой детонации и прошедшая волна с осредненными пульсациями давления — это

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

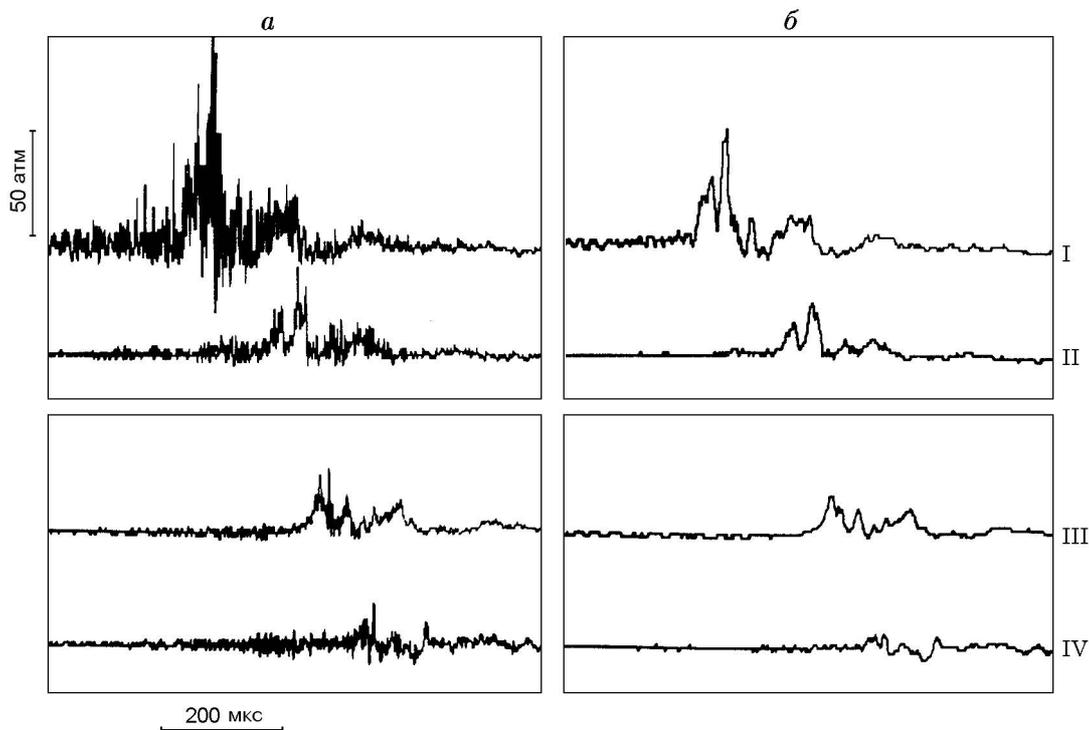


Рис. 1. Осциллограммы давления детонационной и прошедшей волн:

a — до осреднения, *б* — после осреднения пульсаций давления; I — p_1 , II-IV — p_2 ; $\beta_0 = 1/2 \%$; x , м: II — 0,055, III — 0,115, IV — 0,185

уединенные волны, давление за которыми релаксирует к величине, близкой к давлению перед волной (см. рис. 1). Сигналы датчиков давления осреднялись с использованием штатной процедуры осциллографа С9-16 по 10 точкам при временном интервале между точками (времени дискретизации), равном 1 мкс.

Для описания детонационной и прошедшей волн введем следующие характеристики волн: амплитуда (давление) волн p — осредненное по пульсациям давление в максимуме (p_1 и p_2 для детонационной и прошедшей волн соответственно); длительность волн τ — временная характеристика, определяемая на нулевом уровне осредненного по пульсациям сигнала датчика давления (τ_1 и τ_2 для детонационной и прошедшей волн соответственно); линейная протяженность (длина) волны λ — величина, определяемая длительностью волны τ и скоростью D ее распространения ($\lambda_1 = D_1\tau_1$ для детонационной волны и $\lambda_2 = D_2\tau_2$ для прошедшей волны, где D_1 и D_2 — скорости этих волн соответственно).

На рис. 1 прослежен процесс эволюции прошедшей волны, в которую трансформиру-

ется волна детонации после прохождения границы раздела «активная — неактивная пузырьковые среды»: по мере распространения прошедшей волны ее давление уменьшается.

На рис. 2 приведены результаты измерений осредненного по пульсациям давления детонационных волн p_1 (каждая точка — среднее $10 \div 20$ измерений). Значение p_1 зависит от параметров пузырьковой среды: если при

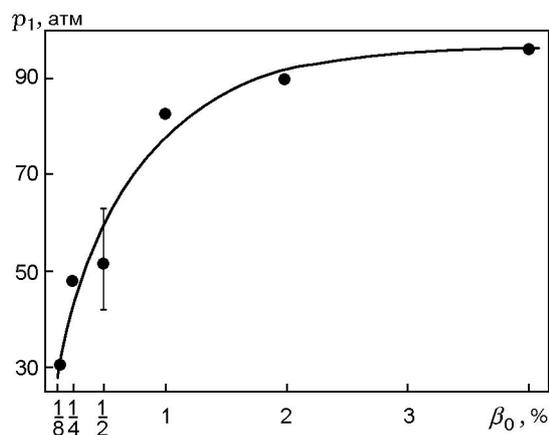
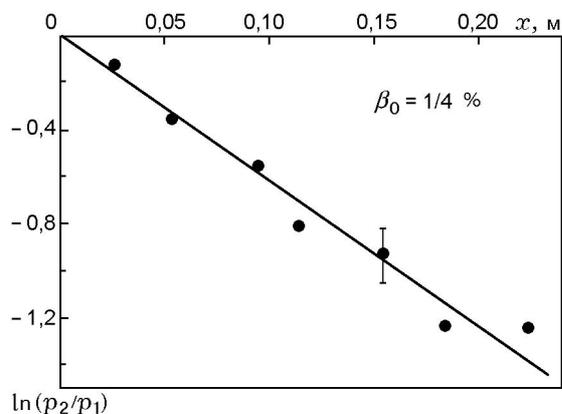
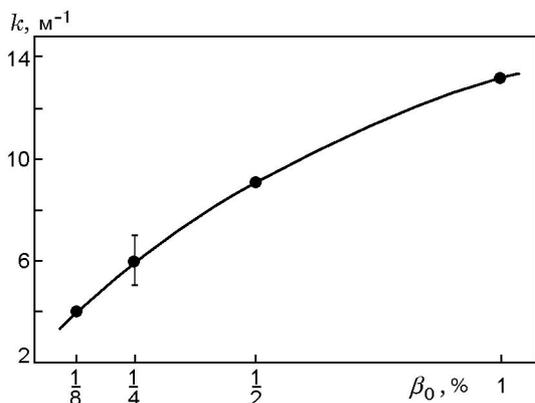


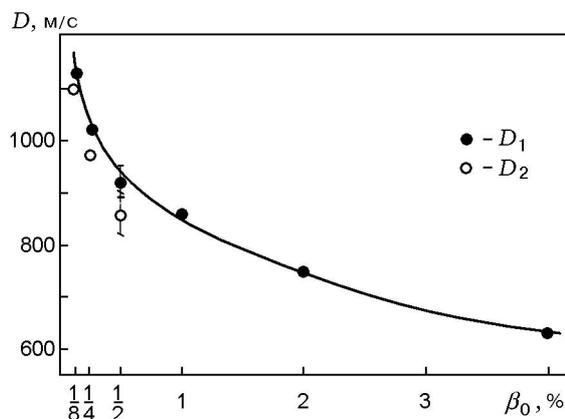
Рис. 2. Зависимость $p_1(\beta_0)$

Рис. 3. Зависимость $\ln(p_2/p_1)(x)$ Рис. 4. Зависимость $k(\beta_0)$

$\beta_0 > 2\%$ давление можно считать приблизительно постоянным, то при меньших концентрациях газовой фазы давление волн детонации уменьшается. Значительный разброс амплитуды детонационных волн является следствием хаотичного (неравномерного) распределения пузырьков газа в жидкости [2].

Результаты измерений осредненного по пульсациям давления прошедших волн p_2 представлены на рис. 3 в виде логарифмической зависимости отношения p_2/p_1 от расстояния x (каждая точка — среднее 10 ÷ 15 измерений). Зависимость относительного давления прошедшей волны от расстояния выражается соотношением $p_2/p_1 = \exp(-kx)$, где k — постоянная затухания (коэффициент ослабления) прошедшей волны.

Значения k приведены на рис. 4. Постоянная затухания возрастает при увеличении концентрации газовой фазы (каждая точка — среднее 10 ÷ 15 измерений).

Рис. 5. Зависимости $D(\beta_0)$

На рис. 5 приведены результаты измерений скорости распространения прошедших волн (каждая точка — среднее нескольких опытов). Скорость волн измеряли с помощью датчиков давления одновременно на двух участках ударной трубы с базами $\Delta x = 0,13$ м. В исследованном диапазоне расстояний от границы раздела сред скорость прошедших волн постоянна. На этом же рисунке для сравнения представлены значения скорости детонационных волн. Отметим факт существования волны детонации при чрезвычайно низкой концентрации газовой фазы — $\beta_0 = 1/8\%$. (Данные по скорости распространения волны детонации в системе (ВМ-3)– O_2 при больших концентрациях газовой фазы приведены в [3].)

Линейная протяженность детонационных и прошедших волн зависит от параметров системы, так как определяется скоростью распространения и длительностью волн. Согласно данным рис. 5 скорость детонационных волн изменяется в широком диапазоне ($D_1 = 650 \div 1150$ м/с при $1/8 \leq \beta_0 \leq 4\%$); при этом длительность волн детонации τ_1 не зависит от концентрации газовой фазы и равна (80 ± 20) мкс. Таким образом, длина волн детонации $\lambda_1 = 0,05 \div 0,09$ м при $1/8 \leq \beta_0 \leq 4\%$.

Длительность прошедшей волны равна длительности детонационной волны вблизи границы раздела сред и незначительно уменьшается по мере дальнейшего распространения волны: $\tau_2 = (70 \pm 20)$ мкс при $x = 0,20$ м. Таким образом, линейная протяженность прошедших волн, скорость распространения которых постоянна, равна длине детонационных волн вблизи границы раздела сред и при расстояниях пробега волны до $x = 0,20$ м уменьшается до значения $\lambda_2 \simeq 0,9\lambda_1$.

Затухание прошедших волн обусловлено диссипативными процессами. Механизмы диссипации энергии в пузырьковых средах разнообразны [4]. Так, существуют теплопотери пузырьков газа через границу раздела газ — жидкость, увеличивающиеся вследствие искажения поверхности пузырьков газа в процессе сжатия и в результате диспергирования в объеме пузырька кумулятивной струи жидкости, образующейся при сжатии пузырька. Кроме того, волна детонации затрачивает энергию на излучение ударных волн короткой длительности (см. рис. 1).

Энергетические потери детонационной волны компенсируются химической энергией, выделяющейся при воспламенении пузырьков газа. В случае постдетонационных волн компенсация энергопотерь отсутствует, и, как следствие, прошедшая волна затухает.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования процесса перехода детонационных волн из химически активной пузырьковой среды в химически неактивную пузырьковую среду показали, что детонационные и прошедшие волны имеют пульсационный профиль давления. Волна пузырьковой детонации и прошедшая волна с осредненными пульсациями давления — это уединенные волны. Давление детонационных волн возрастает при увеличении концентрации газовой фазы. Давление прошедшей волны с увеличением расстояния пробега уменьшается и описывается экспоненциальной зависимостью. Давление за волной детонации, так же как и за прошедшей волной, релаксирует к значению давления перед волной. Постоянная затухания (коэффициент ослабления) прошедших волн возрастает при увеличении концентрации газовой фазы. Скорость распространения прошедших волн в исследованном диапазоне расстояний от границы раздела сред постоянна и уменьшается с увеличением концентрации газовой фазы. Длина прошедших волн по мере распространения волны незначительно уменьшается. Затухание прошедших волн (уменьшение давления) обусловлено диссипативными процессами в пузырьковых средах.

В заключение сделаем замечание практического характера. Детонация в пузырьковых

средах со времени открытия этого явления вызывает широкий интерес, данной проблеме посвящены десятки работ. Однако вопрос о практическом использовании пузырьковой детонации остается открытым. В этой связи отметим, что детонационные и ударные волны в пузырьковых средах обладают особыми свойствами, что позволяет предположить возможность их использования в такой области практической деятельности, как, например, нефтегазодобывающая промышленность — как способ воздействия ударных и детонационных волн в пузырьковых средах на призабойную зону и стенки нефтегазовых скважин с целью повышения их производительности.

Пузырьковые среды широко распространены в различных отраслях промышленности: они необходимы для ведения технологических процессов (например, жидкофазное окисление углеводородов) или образуются в ходе процесса (например, при транспортировке нефтепродуктов), их используют также как элемент системы обеспечения взрывобезопасности (жидкостные предохранительные затворы). Поэтому результаты изучения пузырьковой детонации могут быть использованы при создании научных основ техники взрывобезопасности при эксплуатации жидкостных предохранительных затворов и для выбора взрывобезопасных режимов технологических процессов, протекающих в пузырьковых средах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сычев А. И. Детонационные волны в многокомпонентных пузырьковых средах // Физика горения и взрыва. 1993. Т. 29, № 1. С. 110–117.
2. Сычев А. И. Структура волны пузырьковой детонации // Физика горения и взрыва. 1994. Т. 30, № 4. С. 119–124.
3. Пинаев А. В., Сычев А. И. Структура и свойства детонации в системах жидкость — пузырьки газа // Физика горения и взрыва. 1986. Т. 22, № 3. С. 109–118.
4. Сычев А. И. Влияние размера пузырьков на характеристики волн детонации // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31, № 5. С. 83–91.

Поступила в редакцию 6/VI 2000 г.