

УДК 532.529

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ СО СФЕРИЧЕСКИМ ГАЗОЖИДКОСТНЫМ КЛАСТЕРОМ

В. Е. Донцов

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск

Экспериментально исследовано взаимодействие плоской ударной волны со сферическим газожидкостным кластером (поролонным шариком, насыщенным жидкостью с пузырьками газа) в вертикальной ударной трубе, заполненной жидкостью. Показано, что кластер генерирует уединенную волну давления большой амплитуды.

Ключевые слова: ударная волна, пузырьковый кластер, жидкость.

В [1] на основе численных расчетов процесса захлопывания слоя кавитационных пузырьков вблизи твердой стенки обнаружено возникновение на стенке серии импульсов давления большой амплитуды, обусловленных инерционными эффектами коллективного схлопывания пузырьков. В экспериментах [2, 3] при использовании оптических методов визуально зафиксирована мощная вторичная ударная волна, возникающая при захлопывании одиночного пузырька в жидкости. В [4–8] экспериментально установлено, что в жидкости с пузырьками пара и пузырьками легкорастворимого газа наблюдается усиление ударных волн. Усиление может происходить как в проходящей волне, так и в волне, отраженной от твердой границы. Генерация импульсов давления большой мощности сферическими пузырьковыми кластерами численно исследовалась в работе [9], где впервые предложена постановка задачи и объяснен механизм усиления ударных волн сферическим пузырьковым кластером.

В данной работе экспериментально изучено взаимодействие плоской ударной волны со сферическим пузырьковым кластером в жидкости.

Опыты проводились на установке типа ударной трубы. Рабочий участок представлял собой вертикально расположенную толстостенную стальную трубу внутренним диаметром 53 мм и длиной 1 м. На оси вдоль рабочего участка располагалась проволока из нержавеющей стали диаметром 1 мм, концы которой закреплялись на торцевых стенках рабочего участка. Рабочий участок частично заполнялся жидкостью под вакуумом, что позволяло избежать появления пузырьков газа в жидкости. В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная вода. В рабочем участке вода насыщалась воздухом до равновесного состояния при комнатной температуре и атмосферном давлении. На проволоку в центре трубы надевался пузырьковый кластер — поролонный шарик, заполненный жидкостью с пузырьками газа. Кластер размещался вблизи дна рабочего участка (рис. 1). Верхний край кластера находился на расстоянии 10 мм от поверхности жидкости. В опытах использовались поролонные шарики диаметром 30 и 45 мм, а также поролонная пластина диаметром 53 мм и высотой 20 мм.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 03-01-00211) в рамках программы “Ведущие научные школы” (грант № НШ-523.2003.1) и Интеграционного проекта № 22 (2003 г.) СО РАН.

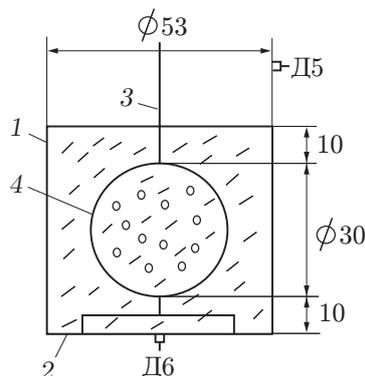


Рис. 1. Схема расположения пузырькового кластера в ударной трубе:
 1 — рабочий участок; 2 — дно рабочего участка; 3 — стальная проволока; 4 — газожидкостный кластер; Д5, Д6 — датчики давления

Пузырьковый кластер готовился на вспомогательной установке следующим образом. Поролоновый шарик помещался в рабочий объем этой установки и насыщался дистиллированной водой под вакуумом. Далее через жидкость в рабочем объеме прокачивались воздушные пузырьки при повышенном (по сравнению с атмосферным) статическом давлении. Жидкость в рабочем объеме насыщалась воздухом до равновесного состояния при данном статическом давлении, и вследствие диффузии газ растворялся внутри поролонового шарика. Время выравнивания концентрации растворенного в жидкости газа на поверхности и в центре шарика τ составляло несколько десятков часов ($\tau \approx R^2/(2D)$ [10], где R — радиус кластера; D — коэффициент диффузии). После сброса статического давления до атмосферного происходило выделение из жидкости газовых пузырьков, которые прилипали к поролоновому скелету и формировали газожидкостный кластер.

Отметим, что пористость поролонового шарика достаточно велика (около 98 %), а жесткость мала, поэтому пористый скелет не оказывал влияния на распространение волны давления [11].

Считая процесс образования зародышей газовых пузырьков в кластере при сбросе статического давления гетерогенным, что справедливо для обычной дистиллированной воды, можно оценить критический радиус зародыша, с которого начинается его рост [12]: $a_* = 2\sigma/\Delta p_s$ (σ — коэффициент поверхностного натяжения жидкости; Δp_s — перепад статического давления). При приготовлении кластера, насыщенного водой с пузырьками воздуха, давление $\Delta p_s \geq 0,2$ МПа. Размер критического зародыша $a_* \leq 10^{-6}$ м. Учитывая, что число зародышей с характерным размером $a \approx 10^{-6}$ м в единице объема воды составляет $n \approx 10^{12}$ м⁻³ [12], можно оценить радиус пузырька, до которого вырастет зародыш при сбросе статического давления. В исследованном диапазоне значений объемного газосодержания диаметр воздушных пузырьков обычно составляет $d \approx 10^{-4}$ м. Однако на поверхности кластера наблюдались пузырьки газа размером вплоть до $d \approx 5 \cdot 10^{-4}$ м, что может быть обусловлено слиянием пузырьков в процессе их роста после сброса статического давления.

Варьируя Δp_s , можно изменять начальное объемное газосодержание в кластере φ . Значение среднего объемного газосодержания в кластере определялось по увеличению объема жидкости при уменьшении начального статического давления в среде и по объему кластера [11]. Погрешность измерения начального объемного газосодержания не превышала 10 %.

Волны давления ступенчатой формы образовывались в воздухе при разрыве диафрагмы, разделяющей камеру высокого давления и рабочий участок, и далее распространя-

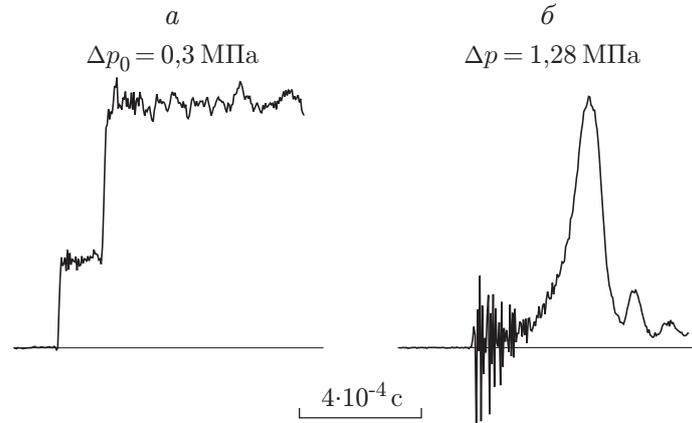


Рис. 2. Профиль воздушной ударной волны, входящей в жидкость (а), и профиль уединенной волны давления в жидкости (б)

лись в жидкость. Профили волн давления регистрировались пьезоэлектрическими датчиками давления, расположенными на боковой поверхности (Д1–Д5) и на дне рабочего участка (Д6). Сигналы с датчиков подавались на аналого-цифровой преобразователь и обрабатывались на компьютере.

На рис. 2,а приведены профили воздушной ударной волны, входящей в жидкость (Δp_0), на рис. 2,б — волны давления в жидкости (Δp). Видно, что газожидкостный кластер, сжимаясь под действием входящей в жидкость волны давления ступенчатой формы, формирует солитоноподобный профиль давления в жидкости. Амплитуда волны давления в жидкости значительно превышает амплитуду входящей в среду волны. Формирование уединенного профиля связано с поглощением кластером преломленной ударной волны и последующим переизлучением [9]. Высокочастотные осцилляции на переднем фронте волны (рис. 2,б) связаны с прохождением по жидкости высокочастотных пульсаций ударной волны и их отражением от дна и свободной поверхности жидкости, а также с колебаниями пузырьков в кластере.

На рис. 3 приведена зависимость амплитуды волны давления в жидкости Δp (точки 1) от амплитуды входящей в жидкость ударной волны Δp_0 для геометрии расположения кластера, представленной на рис. 1 (p_0 — статическое давление в жидкости перед волной). Видно, что амплитуда переизлученной кластером волны давления значительно превышает амплитуду входящей в среду ударной волны и растет с увеличением $\Delta p_0/p_0$. Существенный разброс значений $\Delta p/\Delta p_0$ при больших значениях $\Delta p_0/p_0$ связан с уменьшением начального объемного газосодержания в кластере φ в процессе проведения эксперимента вследствие выхода части пузырьков из кластера после прохождения по среде волны давления большой амплитуды. После уменьшения φ более чем на 20 % заданного начального значения эксперимент прекращался и готовился новый кластер с заданными параметрами. Точками 2 на рис. 3 представлены опытные данные для полуширины уединенной волны в жидкости, которая измерялась так же, как в случае классического солитона Кортевега — де Вриза или Буссинеска [13] (Δt — длительность волны от значения $0,42\Delta p$ до максимального значения давления в волне Δp). Полученные длительности волн для соответствующих амплитуд значительно больше длительности солитонов, рассчитанных по размеру пузырьков в кластере [13, 14], и значительно меньше длительности волны, генерируемой колебаниями газового пузырька размером с кластер. При малых амплитудах падающей ударной волны наблюдается сильная зависимость длительности уединенной волны от амплитуды. С увеличением значений $\Delta p_0/p_0$ длительность уединенной волны изменяется значительно меньше.