

17. Гольдштик М. А. Процессы переноса в зернистом слое.— Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1984.  
18. Buyevich Yu. A. Statistical hydromechanics of disperse systems. Pt I // J. Fluid Mech.— 1971.— V. 49, pt 3.

г. Свердловск

Поступила 31/I 1989 г.,  
в окончательном варианте — 10/IV 1990 г.

УДК 532.529

В. Е. Донцов, П. Г. Марков

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОЛН ДАВЛЕНИЯ УМЕРЕННОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ В ЖИДКОСТИ С ПУЗЫРЬКАМИ ГАЗА

В последнее время активно изучается распространение и взаимодействие нелинейных волн-солитонов в различных средах, обладающих дисперсионными свойствами [1, 2]. Одна из таких сред с ярко выраженными свойствами нелинейности и дисперсии — жидкость с пузырьками газа [3, 4]. В [5] экспериментально исследовано взаимодействие двух солитонов малой амплитуды  $\Delta p/p_0 < 1$  в газожидкостной среде, когда один солитон догоняет другой и когда они взаимодействуют при встрече.

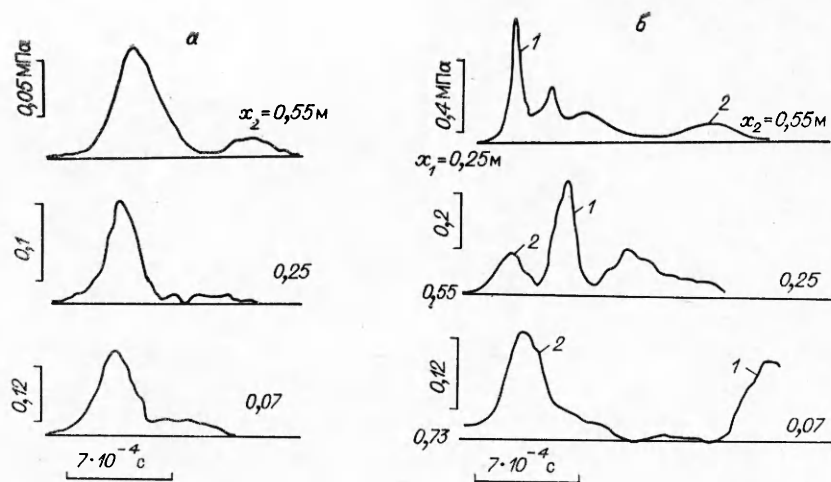
Цель данной работы — экспериментальное изучение эволюции уединенных волн давления умеренной интенсивности при встречном взаимодействии друг с другом или при взаимодействии с сильной волной колоколообразной формы в жидкости с пузырьками газа.

Эксперименты проводились на установке типа «ударная труба», описанной в [6]. Рабочий участок заполнялся водоглицериновым раствором и насыщался пузырьками воздуха (газосодержание во всех опытах  $\Phi_0 = 3 \cdot 10^{-3}$ ). Начальные импульсы давления формировались на обоих концах рабочего участка и далее распространялись навстречу друг другу. Они имели колоколообразную форму и создавались различными способами. С одной стороны рабочего участка импульс давления создавался механическим ударом поршня о жидкость [6], с другой — с необходимой задержкой электромагнитным способом. Формирование сигнала происходит при отталкивании от электромагнитной катушки тонкой медной пластинки, находящейся на границе газожидкостной смеси. Параметры начальной волны давления изменялись при варьировании амплитуды и длительности импульса тока, проходящего через электромагнитную катушку.

Профили волн давления регистрировались пьезоэлектрическими датчиками давления, расположенными по длине рабочего участка. Электрические сигналы с датчиков через высокоомные усилители подавались на аналого-цифровые преобразователи АЦП-10/1, которые были установлены в стандарте КАМАК на базе ЭВМ «Электроника-60». Далее сигналы выводились на дисплей, графопостроитель и обрабатывались.

На рис. 1, а представлена эволюция волны давления в жидкости с пузырьками газа радиусом  $R_0 = 1,5$  мм по длине рабочего участка. Видно, что из начального сигнала колоколообразной формы выделяется уединенная волна, амплитуда которой значительно превосходит величину следующих за ней осцилляций. Из-за диссипативных потерь происходит уменьшение ее амплитуды, значит, и увеличение длительности. На рис. 1, б приведены профили уединенных волн давления разной начальной интенсивности при встречном взаимодействии друг с другом на различных расстояниях  $x_i$  от входа волн в газожидкостную среду ( $x_1$  для волны 1,  $x_2$  для волны 2). Из сравнения осциллограмм видно, что структура и затухание уединенной волны 2 на рис. 1, б после взаимодействия со встречной волной соответствуют эволюции и структуре уединенной волны примерно такой же интенсивности на рис. 1, а.

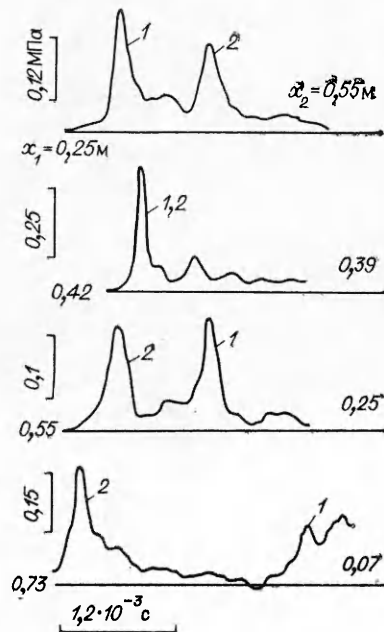
Таким образом, при встречном взаимодействии уединенных волн умеренной интенсивности не происходит перекачки энергии от одной



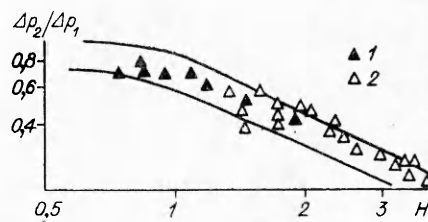
Р и с. 1

волны к другой и после взаимодействия каждая волна остается со своими параметрами до взаимодействия.

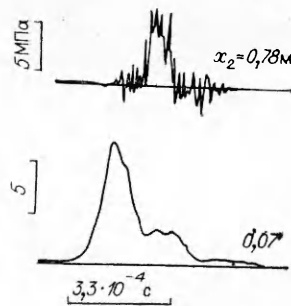
На рис. 2 представлена эволюция волн давления при встречном взаимодействии в жидкости с пузырьками газа. Момент наложения волн зафиксирован датчиком на расстоянии  $x_2 = 390$  мм. В отличие от взаимодействия уединенных волн малой интенсивности ( $\Delta p/p_0 < 1$ ) [5] амплитуда волны, получившейся от слияния уединенных волн, значительно превосходит сумму уединенных волн перед взаимодействием ( $\Delta p_c = \Delta p_1 + \Delta p_2$ ). Это объясняется, по-видимому, тем, что пузырьки в процессе наложения волн успевают сформировать из наложившихся волн новую уединенную волну с амплитудой, в 1,5–2 раза превышающей  $\Delta p_c$ . В численных расчетах [4] также наблюдалось нелинейное взаимодействие уединенных волн в момент столкновения, однако форма новой волны значительно отличается от формы солитона той же интенсивности. Отметим, что из начального сигнала выделяется не только основная уединенная волна, но и следующие за ней несколько волн малой амплитуды.



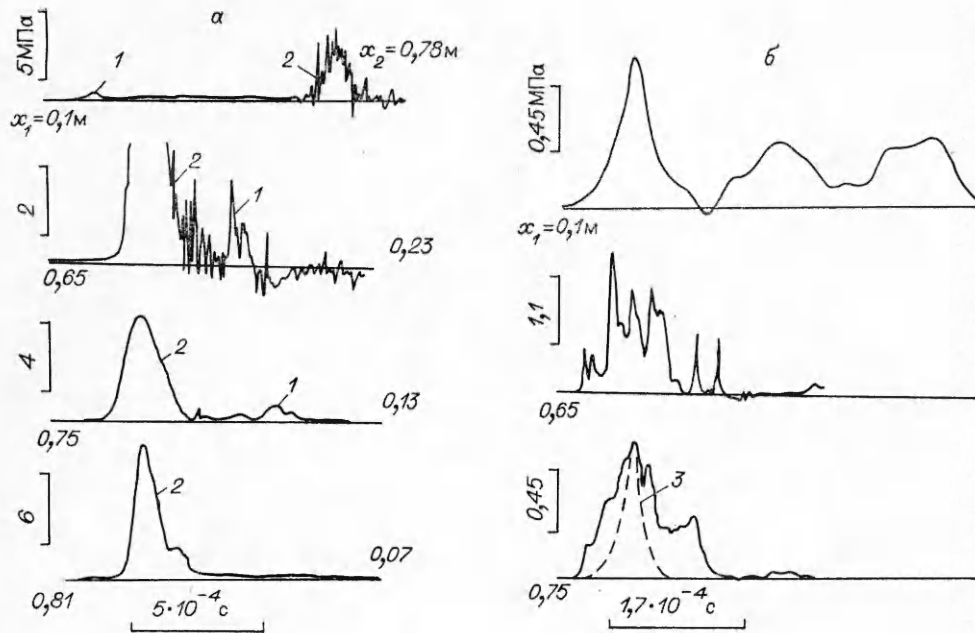
Р и с. 2



Р и с. 3



Р и с. 4



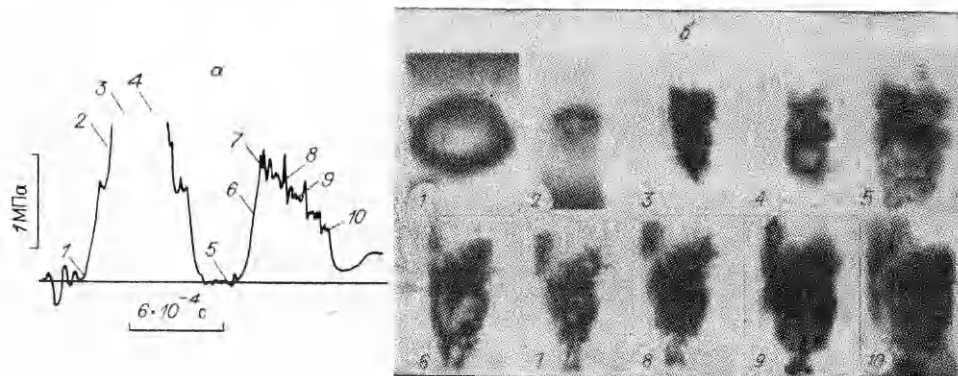
Р и с. 5

Они накладываются на встречную уединенную волну и вносят дополнительную погрешность в измерение ее амплитуды.

В [6] показано, что затухание уединенных волн умеренной интенсивности обобщается при помощи экспериментально найденного параметра  $H = (\Delta p/p_0)^{0.67} (\Delta x/R_0) (\varphi_0 a_0/\omega_R R_0^2)^{0.5}$  ( $\varphi$  — объемное газосодержание,  $a$  — коэффициент теплопроводности газа,  $\omega_R$  — резонансная частота колебаний пузырька). На рис. 3 приведен график затухания уединенных волн при встречном взаимодействии в жидкости с пузырьками газа, где точки 1 — данные для слабых волн давления ( $\Delta p = 0,1 \div 0,2$  МПа), 2 — для более сильных волн ( $0,2 \div 1$  МПа), линиями обведена зона экспериментальных результатов по затуханию уединенных волн [6]. Видно, что затухание уединенных волн при взаимодействии и без него одинаково во всем исследуемом диапазоне амплитуд  $1 < \Delta p/p_0 < 10$ . Большой разброс экспериментальных данных обусловлен дополнительной погрешностью из-за наложения основной уединенной волны на волны, выделяющиеся из начального сигнала вслед за уединенной волной. Таким образом, уединенные волны умеренной интенсивности в жидкости с пузырьками газа при взаимодействии ведут себя как солитоны.

Перейдем к рассмотрению встречного взаимодействия уединенной волны-солитона с волной давления колоколообразной формы большой интенсивности. На рис. 4 представлена эволюция волны давления колоколообразной формы большой интенсивности в газожидкостной среде с малым газосодержанием ( $\varphi_0 = 0,3\%$ ) и  $p_0 = 0,1$  МПа,  $R_0 = 1,5$  мм. Видно, что из начального сигнала при прохождении через весь рабочий участок формирования солитонов не происходит из-за малости  $\varphi_0$ . Сигнал покрывается высокочастотными пульсациями давления раздробившихся в волне пузырьков и слабо затухает, практически не меняя своей формы.

На рис. 5, а приведены характерные осциллограммы эволюции уединенной волны 1 при встречном взаимодействии с колоколообразным импульсом давления большой амплитуды 2. Параметры среды те же, что и на рис. 4. Из сравнения рис. 4 и 5 видно, что при всех прочих подобных условиях амплитуда колоколообразного сигнала на расстоянии  $x_2 = 0,780$  м на рис. 5 существенно меньше, чем на рис. 4. Таким образом, взаимодействие уединенной волны-солитона с волной произвольного профиля приводит к обмену энергией между ними. В данном случае происхо-



Р и с. 6

дит перекачка энергии от более интенсивной волны колоколообразной формы к уединенной волне с меньшей амплитудой. На рис. 5, б показана в увеличенном масштабе эволюция уединенной волны с рис. 5, а. Особенностью для уединенной волны-солитона является то, что после взаимодействия ( $x_1 = 650$  мм) происходит не только увеличение ее амплитуды, но и изменение формы. Ширина волны определяется длительностью колоколообразного сигнала, а высокочастотные пульсации давления обусловлены колебаниями мелких газовых включений, образовавшихся после дробления пузырьков в волне давления колоколообразной формы. При распространении такой волны происходит ее затухание и сглаживание высокочастотных осцилляций ( $x_1 = 750$  мм). Отметим, что затухание волны в среде с раздробленными пузырьками происходит более интенсивно, чем колоколообразного импульса той же длительности в среде с неразрушенными пузырьками. Это связано, по-видимому, с тем, что с уменьшением размеров газовых включений при постоянном газосодержании увеличивается теплоотдача от пузырьков газа в жидкость. Линией 3 нанесена форма солитона для данной интенсивности волны и параметров среды. Видно, что форма волны значительно отличается от формы солитона, т. е. вследствие слабой дисперсии и возросшей диссипации в среде с раздробленными пузырьками формирования солитонов не происходит.

В процессе опытов менялись амплитуда и длительность солитонов в широких пределах, однако амплитуды волн после столкновения всегда были практически одинаковы. Это означает, что величина приращения энергии слабо зависит от амплитуды уединенной волны, а определяется в основном амплитудой и длительностью более интенсивной волны колоколообразного профиля.

В [7] показано, что при прохождении по газожидкостной среде волны большой амплитуды пузырьки дробятся на облака мельчайших газовых включений-кластеров. Дробление обусловлено относительным движением пузырьков газа в волне давления. В рамках данной работы проведено исследование поведения таких кластеров при распространении волн. Разрушение пузырьков производилось импульсом давления колоколообразной формы и большой амплитуды, а затем с необходимой задержкой в среду пускалась вторая волна. Поведение пузырьков регистрировалось в специальной оптической вставке рабочего участка высокоскоростной кинокамерой ВСК-5 со скоростью 40 000 кадр/с в проходящем свете лампы-вспышки.

Кинограмма поведения газового пузырька в обеих волнах давления приведена на рис. 6, б в моменты времени, обозначенные цифрами на профиле волны (рис. 6, а). Видно, что при прохождении сильного импульса пузырек разваливается на облако мельчайших пузырьков, которое незначительно расплывается в дальнейшем. Под воздействием второй волны давления кластер сжимается и его поведение соответствует изменению давления в волне. После прохождения волны кластер принимает

свой первоначальный размер и более осциллиций не совершает, что говорит о полном отсутствии упругости и резонансных свойств кластера как единого целого.

Таким образом, среда с раздробленными пузырьками-кластерами теряет свои прежние дисперсионные свойства. Основными параметрами, определяющими структуру волны в таких средах, остаются диссипация и нелинейность.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Zabusky N. J., Kruskal M. D. Interaction of «solutions» in a collisionless plasma and the recurrence of initial states // Phys. Rev. Lett.— 1965.— V. 15.— P. 240.
2. Додд Р., Эйблек Дж., Гиббон Дж., Моррис Х. Солитоны и нелинейные волновые уравнения.— М.: Мир, 1988.
3. Накоряков В. Е., Покусаев Б. Г., Шрейбер И. Р. Распространение волн в газо- и парожидкостных средах.— Новосибирск: ИТ СО АН СССР, 1983.
4. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред.— М.: Наука, 1987.— Ч. 1, 2.
5. Кузнецов В. В., Накоряков В. Е., Покусаев Б. Г. Взаимодействие солитонов в жидкости с пузырьками газа // Письма в ЖЭТФ.— 1978.— Т. 28, вып. 8.
6. Донцов В. Е., Кузнецов В. В., Марков П. Г., Накоряков В. Е. Эволюция волн давления умеренной амплитуды в жидкости с пузырьками газа // Акуст. журн.— 1987.— Т. 33, № 6.
7. Донцов В. Е., Марков П. Г. Исследование дробления пузырьков газа и его влияния на структуру уединенных волн давления умеренной интенсивности в жидкости с пузырьками газа // ПМТФ.— 1991.— № 1.

г. Новосибирск

Поступила 19/II 1990 г.,  
в окончательном варианте — 3/V 1990 г.

УДК 532.529

В. В. Дубровский, А. М. Подвысоцкий, А. А. Шрайбер

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДРОБЛЕНИЯ КАПЕЛЬ АЭРОДИНАМИЧЕСКИМИ СИЛАМИ

Рассматриваются закономерности деформации и разрушения «чистых» капель, а также двухкомпонентных частиц (капель, содержащих твердые включения) аэродинамическими силами. Описаны экспериментальная установка и методика измерений. Исследовано дробление капель при критических и закритических значениях числа Вебера  $We$ . Изучены временные характеристики процесса деформации и разрушения капель. Обнаружено существенное влияние скорости нарастания внешнего воздействия на критическое значение числа Вебера  $We_*$ . Для оценки характера изменения аэродинамических сил предложено новое для рассматриваемого круга задач число подобия  $G$ . Получены обобщенные эмпирические формулы для  $We_*$ , времени индукции и параметров распределения осколков по размерам.

**1. Постановка задачи. Описание экспериментальной установки.** Двухфазные потоки, состоящие из несущего газа и взвешенных в нем капель жидкости, широко распространены в природе и технике. Во многих случаях на закономерности поведения капель существенное влияние оказывают процессы деформации и дробления их аэродинамическими силами. Несмотря на значительное количество публикаций по данному вопросу, он изучен и обобщен недостаточно.

Установлено, что важнейшими параметрами, определяющими устойчивость и разрушение капель, являются  $We = (u_T - u)^2 \delta \rho_r / \sigma$  и (в случае достаточно вязких жидкостей) число Лапласа  $Lp = \delta \rho \sigma / \eta^2$  ( $u$  — скорость,  $\delta$  — диаметр капли в недеформированном состоянии,  $\rho$  — плотность,  $\sigma$ ,  $\eta$  — коэффициенты поверхностного натяжения и динамической вязкости, величины с индексом  $r$  относятся к газу, без индекса — к капле). Сведения о влиянии других параметров (чисел Рейнольдса, Маха, Бонда и др.) отрывочны или вообще отсутствуют. В [1–6] приводятся классификация режимов разрушения в зависимости от интенсивности воздействия аэродинамических сил и данные для определения граници