

УДК 532.529

## ВОЛНЫ ДАВЛЕНИЯ В ГАЗОЖИДКОСТНОЙ СРЕДЕ С РАССЛОЕННОЙ СТРУКТУРОЙ ЖИДКОСТЬ — ПУЗЫРЬКОВАЯ СМЕСЬ

В. Е. Донцов, В. Е. Накоряков

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

Экспериментально исследованы эволюция и затухание волн давления умеренной амплитуды в вертикальной ударной трубе, заполненной газожидкостной средой, при неравномерном (ступенчатом) распределении пузырьков по сечению трубы. Газожидкостный слой в виде кольца располагался вблизи стенки трубы либо в виде газожидкостного столба — в центре трубы. Показано, что неравномерность распределения пузырьков по сечению трубы приводит к увеличению интенсивности затухания волн давления.

Ключевые слова: волна давления, жидкость, пузырьки газа, затухание.

Распространение волн давления в жидкости с пузырьками газа достаточно подробно исследовано теоретически и экспериментально [1–5]. В частности, показано, что нелинейное возмущение конечной длительности в жидкости с пузырьками газа распадается на уединенные волны — солитоны, подробно изучены эволюция и структура этих волн. Установлено, что теплообмен газа в пузырьках с окружающей жидкостью в широком диапазоне параметров среды является основным механизмом диссипации волн в пузырьковых средах. Наличие третьей фазы существенно влияет как на структуру, так и на затухание волн в трехфазных средах [6–9]. В работах [10, 11] экспериментально исследованы структура и затухание уединенных волн давления умеренной амплитуды в жидкости с пузырьками газа одного размера. Учет полидисперсности в газожидкостной среде приводит к увеличению интенсивности затухания волн давления [12, 13]. В [14] обнаружен новый тип волновых структур — мультисолитоны в жидкости с пузырьками газа двух разных размеров при различных соотношениях радиусов пузырьков. Влияние неоднородности газожидкостной смеси и сжимаемости жидкости на структуру волны давления исследовано в работах [15, 16]. В [17, 18] экспериментально изучена структура опускного и восходящего пузырьковых течений. Показано, что уже при малых объемных долях газа происходит существенное перераспределение газовой фазы по сечению трубы. Пузырьки практически полностью собираются либо в центральной части трубы (опускное течение), либо в пристенной области (восходящее течение). Показано, что структура газожидкостных пузырьковых потоков в вертикальных трубах существенно неоднородна как для ламинарных, так и для турбулентных течений.

В данной работе экспериментально изучены эволюция и затухание волн давления умеренной амплитуды в жидкости с пузырьками газа с неравномерным распределением пузырьков в сечении, перпендикулярном направлению распространения волны.

Эксперименты проводились на установке типа ударной трубы. Рабочий участок представлял собой вертикально установленную толстостенную стальную трубу длиной 1,5 м

с внутренним диаметром 53 мм. Внутри рабочего участка располагалась тонкостенная (толщина стенки 30 мкм) лавсановая трубка диаметром 37,5 мм. Диаметр лавсановой трубки подобран таким образом, чтобы площадь поперечного сечения внутри нее была равна площади кольца между лавсановой трубкой и стенкой рабочего участка. Положение лавсановой трубки жестко фиксировалось тонкими перегородками. Рабочий участок заполнялся жидкостью и насыщался пузырьками газа через генератор, расположенный в нижней части трубы. Опыты проводились для трех различных структур пузырьковой среды. Пузырьки подавались равномерно либо по сечению всего рабочего участка, либо в кольцо между лавсановой трубкой и стенкой рабочего участка (газожидкостное кольцо), либо внутрь лавсановой трубки (газожидкостный столб). Генератор пузырьков выполнен в виде 22 калиброванных стеклянных капилляров. Более точный подбор капилляров в генераторе производился с использованием видеосъемки газовых пузырьков. Это позволило получить газовые пузырьки в жидкости, размеры которых различались в пределах  $\pm 5\%$ . Средний радиус пузырьков составлял 0,53 мм. В качестве рабочей жидкости использовался 50 %-й (по массе) раствор глицерина в дистиллированной воде, в качестве газовой фазы — фреон 12 и азот, коэффициенты температуропроводности которых существенно различаются:  $3,2 \cdot 10^{-6}$  и  $2,2 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с соответственно. Пузырьки газа при всплытии в жидкости имели сферическую форму. Средняя по сечению и длине рабочего участка объемная доля газа в пузырьках определялась по увеличению уровня жидкости в рабочем участке при введении пузырьков газа и во всех опытах составляла 0,5 %. Эксперименты проводились при комнатной температуре и атмосферном статическом давлении  $P_0$  над уровнем газожидкостной среды.

Волны давления колоколообразной формы создавались электромагнитным излучателем, расположенным на дне рабочего участка, за счет отталкивания тонкой медной пластинки от электромагнитной катушки при прохождении через нее импульса тока. Профили волн давления регистрировались шестью пьезоэлектрическими датчиками давления Т-500-2, расположенными вдоль рабочего участка. Систематическая погрешность датчика не превышала 1 %. Погрешность измерения амплитуды датчиком давления составляла  $2 \div 3\%$ . Сигналы с датчиков подавались на аналого-цифровой преобразователь и обрабатывались на компьютере.

Результаты экспериментов показали, что неравномерное распределение газовой фазы по сечению трубы существенно влияет на эволюцию и затухание волн в пузырьковых средах. На рис. 1 показаны профили волн давления во времени на различных расстояниях  $X$  от места входа волны давления в жидкость с пузырьками низкотеплопроводного газа (фреона) для различных структур среды и начальных амплитуд волн  $\Delta P_0$  ( $\Delta P$  — амплитуда волны или амплитуда первой осцилляции для группы уединенных волн и осциллирующих ударных волн). Из сравнения эволюций волн на рис. 1, *a, б* следует, что смещение газовых пузырьков из центральной части трубы в пристенную область с сохранением средней по сечению объемной доли газа приводит к значительному увеличению интенсивности затухания и изменению структуры волны. Если при равномерном распределении пузырьков по сечению трубы на расстоянии  $X = 0,76$  м из начального сигнала практически выделились уединенные волны (солитоны) (кривая 3 на рис. 1, *a*), то для газожидкостного кольца вблизи стенки трубы формируется осциллирующая ударная волна (кривая 3 на рис. 1, *б*). Формирование осциллирующей ударной волны обусловлено увеличением диссипативных потерь в среде. Следует отметить, что перераспределение газовой фазы по сечению трубы не приводит к изменению частоты осцилляций в волне. Как и в случае гомогенной среды, длительность первой осцилляции соответствует резонансным колебаниям газовых пузырьков в волне.

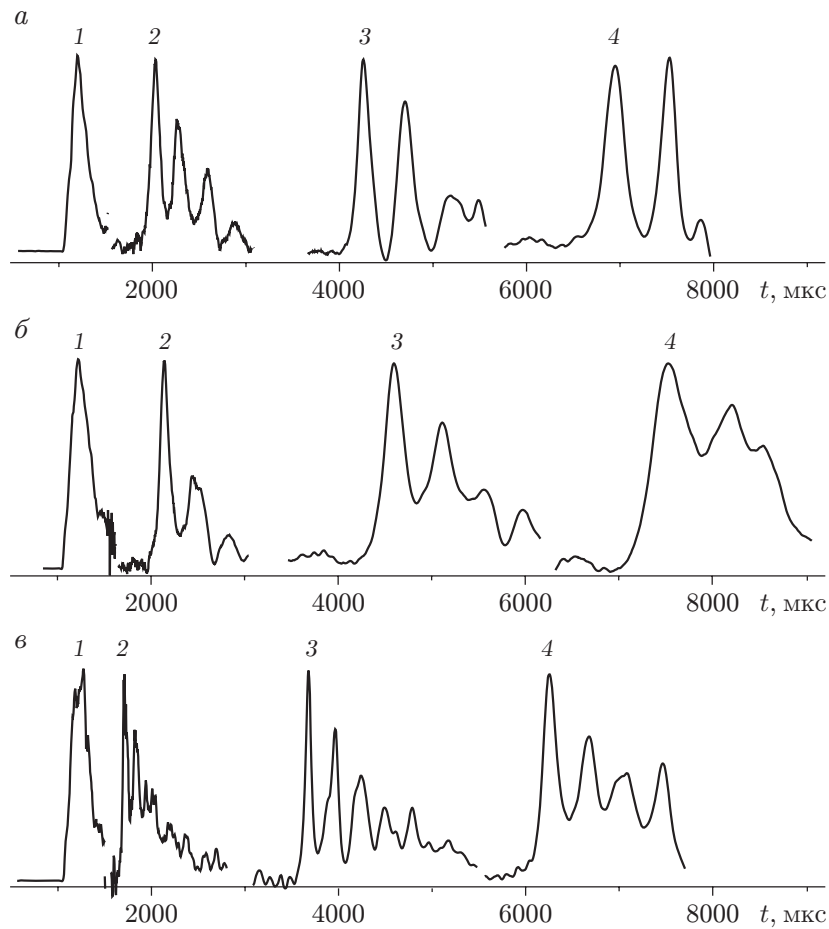


Рис. 1. Эволюция волны давления в жидкости с фреоновыми пузырьками:  
 1 —  $X = 0$ , 2 —  $X = 0,25$  м, 3 —  $X = 0,76$  м, 4 —  $X = 1,25$  м; а — однородная среда  
 (1 —  $\Delta P_0 = 0,272$  МПа, 2 —  $\Delta P = 0,172$  МПа, 3 —  $\Delta P = 0,117$  МПа, 4 —  $\Delta P = 0,068$  МПа); б — газожидкостное кольцо вблизи стенки (1 —  $\Delta P_0 = 0,219$  МПа, 2 —  
 $\Delta P = 0,195$  МПа, 3 —  $\Delta P = 0,072$  МПа, 4 —  $\Delta P = 0,031$  МПа); в — газожидкостный  
 столб в центре трубы (1 —  $\Delta P_0 = 0,93$  МПа, 2 —  $\Delta P = 0,53$  МПа, 3 —  $\Delta P = 0,28$  МПа,  
 4 —  $\Delta P = 0,108$  МПа)

С увеличением амплитуды волны интенсивность ее затухания увеличивается. Вследствие этого для всех структур газожидкостной среды из начального сигнала формируются осциллирующие ударные волны (рис. 1, в).

На рис. 2 представлены экспериментальные данные по скорости  $U$  волн давления малой амплитуды в жидкости с газожидкостным кольцом вблизи стенки и газожидкостным столбом в центре трубы. В опытах измерялась амплитуда первой осцилляции волны, скорость определялась по разности времен прихода пика первой осцилляции на два соседних датчика. В качестве амплитуды волны  $\Delta P$  бралось среднее значение амплитуды с соседних датчиков. Кривая 3 — результаты расчета скорости уединенных волн (солитонов) по уравнению Кортевега — де Фриза [3] в жидкости с равномерным распределением пузырьков ( $c$  — низкочастотная скорость звука в газожидкостной среде). Видно, что в пределах погрешности измерений (5 %) скорость волны в газожидкостной среде не зависит от распределения газовых пузырьков по сечению трубы и определяется средней по сечению объемной долей газа.

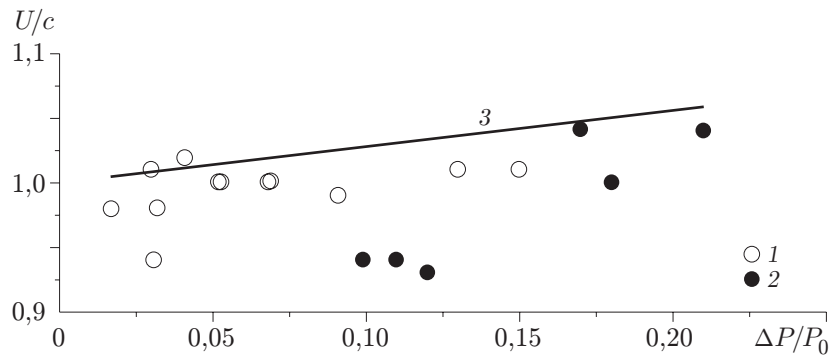


Рис. 2. Скорость малых возмущений в неоднородной газожидкостной среде: 1, 2 — эксперимент (1 — газожидкостное кольцо вблизи стенки, 2 — газожидкостный столб в центре трубы); 3 — расчет по гомогенной модели

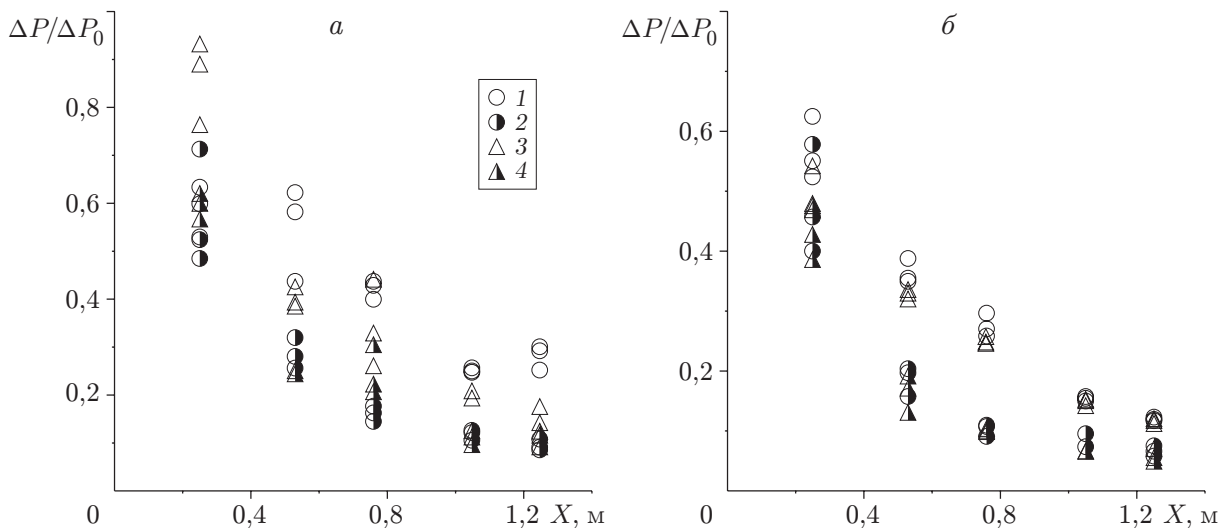


Рис. 3. Затухание волны давления по длине рабочего участка: а — фреоновые пузырьки: 1, 2 — гомогенная структура среды (1 —  $\Delta P_0/P_0 \approx 2,5$ , 2 —  $\Delta P_0/P_0 \approx 9,5$ ); 3, 4 — газожидкостное кольцо вблизи стенки (3 —  $\Delta P_0/P_0 \approx 2,1$ , 4 —  $\Delta P_0/P_0 \approx 8,5$ ); б — азотные пузырьки: 1, 2 — гомогенная структура среды (1 —  $\Delta P_0/P_0 \approx 1,9$ , 2 —  $\Delta P_0/P_0 \approx 14$ ); 3, 4 — газожидкостный столб в центре трубы (3 —  $\Delta P_0/P_0 \approx 1,8$ , 4 —  $\Delta P_0/P_0 \approx 14$ )

На рис. 3 представлены экспериментальные данные по интенсивности затухания волны давления (первой осцилляции) в жидкости с различным распределением пузырьков в среде для двух характерных амплитуд начального сигнала. При малых амплитудах волн ( $\Delta P_0/P_0 \approx 2$ ) наблюдается существенное различие интенсивностей затухания волн в жидкости с пузырьками фреона при равномерном и кольцевом распределении газовых пузырьков в среде (точки 1 и 3 на рис. 3, а). На больших расстояниях от места входа волны в среду ( $X \geq 0,5$  м) интенсивность ее затухания при неравномерном распределении пузырьков по сечению трубы больше, чем при равномерном. Однако на малых расстояниях ( $X \approx 0,25$  м) в случае кольцевого распределения пузырьков экспериментальные точки 3 лежат выше точек 1, соответствующих равномерному распределению. По-видимому, это обусловлено тем, что дисперсионные и нелинейные эффекты в случае кольцевого режима приводят к более быстрому формированию уединенной волны из начального сигнала (кривая 2 на рис. 1, б). При формировании уединенной волны (осциллирующей ударной волны) ее ам-

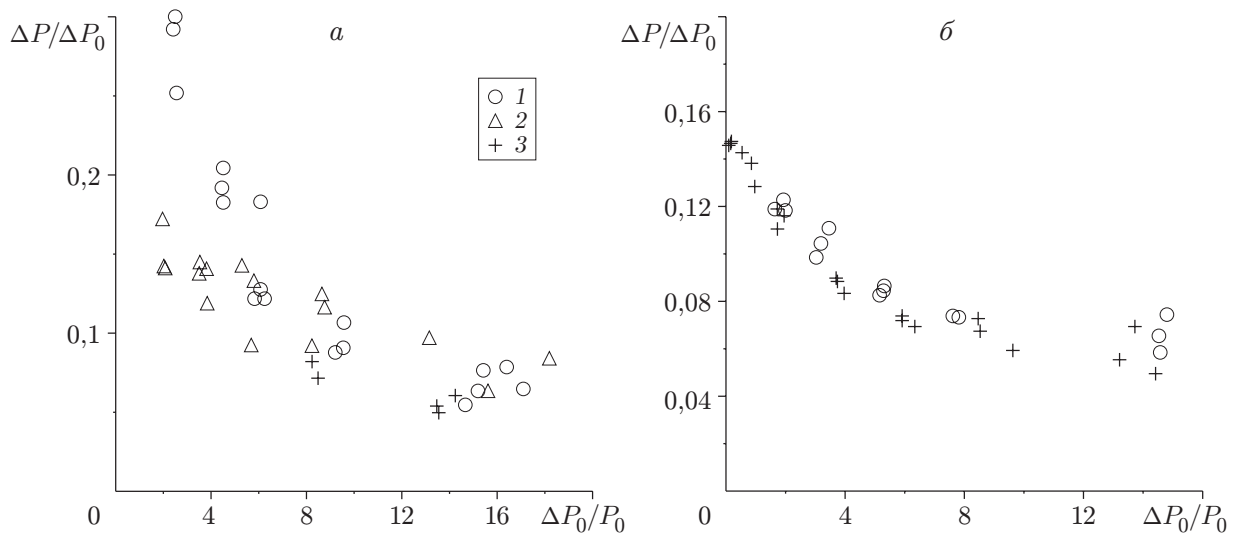


Рис. 4. Зависимость интенсивности затухания волны давления в жидкости с пузырьками газа от ее амплитуды:

*a* — фреоновые пузырьки, *б* — азотные пузырьки; 1 — однородная структура среды, 2 — газожидкостное кольцо вблизи стенки, 3 — газожидкостный столб в центре трубы

плитуда увеличивается по сравнению с амплитудой начального сигнала [3, 10, 11]. В случае равномерного распределения пузырьков уединенная волна формируется на больших расстояниях (точки 1 на рис. 3, *a*), что приводит к уменьшению интенсивности затухания волн на интервале  $X = 0,25 \div 0,50$  м. Отметим, что на расстоянии  $X \approx 1$  м при равномерном распределении пузырьков наблюдается немонотонное поведение кривой затухания (точки 1 на рис. 3, *a*), что может быть обусловлено переформированием волны в процессе эволюции. В случае больших амплитуд волн ( $\Delta P_0/P_0 \approx 10$ ) в жидкости с фреоновыми пузырьками интенсивность затухания не зависит от распределения пузырьков по сечению трубы (точки 2 и 4 на рис. 3, *a* практически совпадают).

В случае более “теплопроводных” азотных пузырьков того же размера с той же объемной долей газа при равномерном распределении пузырьков происходит существенное увеличение интенсивности затухания волн с близкими начальными амплитудами (точки 1 и 2 на рис. 3, *б*). Это связано с тем, что основным механизмом диссипации волн в однородной пузырьковой среде является теплообмен газа в пузырьках с окружающей жидкостью [3, 10]. В то же время при неравномерном распределении пузырьков для волн с амплитудой  $\Delta P_0/P_0 \approx 2$  интенсивность затухания в жидкости с фреоновыми и азотными пузырьками различается незначительно (точки 3 на рис. 3, *a, б*). Это свидетельствует об увеличении интенсивности затухания волн в жидкости при переходе к неравномерному распределению газовых пузырьков, сравнимому с тепловой диссипацией.

На рис. 4 показана зависимость интенсивности затухания волны давления (первой осцилляции) в жидкости с пузырьками газа от амплитуды волны на расстоянии  $X = 1,25$  м от места входа волны в среду. Видно, что при больших амплитудах волн интенсивность затухания не зависит от распределения пузырьков по сечению трубы. С уменьшением амплитуды волны на рис. 4, *a* наблюдается расслоение точек 1 и 2. Следовательно, для фреоновых пузырьков неравномерность распределения газовой фазы в жидкости приводит к увеличению интенсивности затухания, сравнимому с тепловой диссипацией. Для жидкости с азотными пузырьками (рис. 4, *б*) с уменьшением амплитуды расслоение точек 1 и 2 меньше вследствие преобладающей роли тепловой диссипации. Дополнительная

диссипация вследствие неоднородности пузырьковой среды может быть обусловлена относительным движением газовых пузырьков в жидкости. Впервые влияние относительного движения пузырьков в жидкости на распространение ударных волн в однородных пузырьковых средах исследовано в работе [19]. Однако в случае гомогенных пузырьковых сред тепловая диссипация почти всегда преобладает над вязкой вследствие относительного движения пузырьков [3, 4]. В случае существенно неоднородных по сечению пузырьковых сред пузырьки в волне движутся относительно жидкости не только в направлении распространения волны, но и перпендикулярно ему, в направлении увеличения сжимаемости среды. Это приводит к увеличению относительной скорости пузырьков и изменению ее направления по сравнению со случаем гомогенной среды и соответственно к увеличению интенсивности затухания. Кроме того, при движении жидкости в волне давления возможно образование вихревых структур за счет поперечной составляющей скорости жидкости и наличия твердой стенки рабочего участка. Наличие вихревых структур также вызывает увеличение интенсивности затухания волны давления.

Таким образом, показано, что неравномерное распределение газовых пузырьков в сечении, перпендикулярном направлению распространения волны, может приводить к увеличению интенсивности ее затухания. Рассмотрен механизм затухания, обусловленного относительным движением газовых пузырьков в жидкости и образованием вихревых структур в волне.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Бетчелор Г. К.** Волны сжатия в суспензии газовых пузырьков в жидкости // *Механика*. 1968. Т. 109, № 3. С. 67–84.
2. **Wijngaarden L. Van.** On the equation of motion for mixtures of liquid and gas bubbles // *J. Fluid Mech.* 1968. V. 33. P. 465–474.
3. **Накоряков В. Е., Покусаев Б. Г., Шрейбер И. Р.** Волновая динамика газо- и парожидкостных сред. М.: Энергоатомиздат, 1990.
4. **Нигматулин Р. И.** Динамика многофазных сред. М.: Наука, 1987.
5. **Watanabe M., Prosperetti A.** Shock waves in dilute bubbly liquids // *J. Fluid Mech.* 1994. V. 274. P. 349–381.
6. **Auriault J.-L., Boutin C., Royer P., Schmitt D.** Acoustics of a porous medium saturated by a bubbly fluid undergoing phase change // *Transport Porous Media*. 2002. V. 46. P. 43–47.
7. **Herskowitz M., Lewitsky S., Shreiber I.** Attenuation of ultrasound in porous media with dispersed mikrobubbles // *Ultrasonics*. 2000. V. 38. P. 767–769.
8. **Smeulders D. M., Van Dongen M. E. N.** Wave propagation in porous media containing a dilute gas-liquid mixture: theory and experiment // *J. Fluid Mech.* 1997. V. 343. P. 351–373.
9. **Nakoryakov V. E., Dontsov V. E., Pokusaev B. G.** Pressure waves in a liquid suspension with solid particles and gas bubbles // *Intern. J. Multiphase Flow*. 1996. V. 22, N 3. P. 417–429.
10. **Донцов В. Е., Кузнецов В. Е., Марков П. Г., Накоряков В. Е.** Эволюция волн давления умеренной интенсивности в жидкости с пузырьками газа // *Акуст. журн.* 1987. Т. 33, № 6. С. 1041–1044.
11. **Nakoryakov V. E., Kuznetsov V. E., Dontsov V. E., Markov P. G.** Pressure waves of moderate intensity in liquid with gas bubbles // *Intern. J. Multiphase Flow*. 1990. V. 16, N 5. P. 741–749.
12. **Кедринский В. К.** Распространение возмущений в жидкости, содержащей пузырьки газа // *ПМТФ*. 1968. № 4. С. 29–34.

13. **Шагапов В. Ш.** Структура ударных волн в полидисперсной смеси жидкость — пузырьки газа // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1976. № 6. С. 145–147.
14. **Накоряков В. Е., Донцов В. Е.** Мультисолитоны в жидкости с пузырьками газа двух разных размеров // Докл. РАН. 2001. Т. 378, № 4. С. 483–486.
15. **Beylich A. E., Gulhan A.** On the structure of nonlinear waves in liquids with gas bubbles // Phys. Fluids A. 1990. V. 2, N 8. P. 1412–1428.
16. **Kameda M., Shimaura N., Higashino F., Matsumoto Y.** Shock waves in a uniform bubbly flow // Phys. Fluids. 1998. V. 10, N 10. P. 2661–2668.
17. **Kashinsky O. N., Randin V. V.** Downward bubbly gas-liquid flow in a vertical pipe // Intern. J. Multiphase Flow. 1999. V. 25, N 1. P. 109–138.
18. **Kashinsky O. N., Timkin L. S.** Slip velocity measurements in an upward bubbly flow by combined LDA and electrochemical techniques // Experiments Fluids. 1999. V. 26, N 2. P. 305–314.
19. **Noordzij L., Wijngaarden L. Van.** Relaxation effects, caused by relative motion, on shock waves in gas-bubble/liquid mixtures // J. Fluid Mech. 1974. V. 66, N 1. P. 115–143.

*Поступила в редакцию 1/XI 2002 г.,  
в окончательном варианте — 27/I 2003 г.*

---