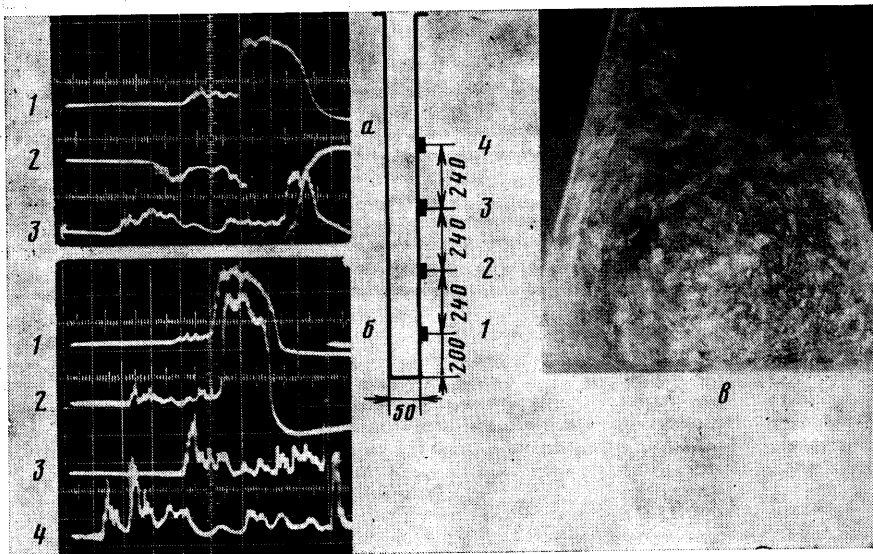


УДК 532.529:532.593

## ОБ ОТРАЖЕНИИ УДАРНЫХ ВОЛН НА ЖЕСТКОЙ СТЕНКЕ В ДВУХФАЗНЫХ СРЕДАХ С ПЕРЕМЕННОЙ МАССОВОЙ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ ГАЗА

ГЕЛЬФАНД Б. Е., ГУБАНОВ А. В., ТИМОФЕЕВ Е. И.

На основе достаточно широкого исследования можно считать твердо установленным факт возможности значительного повышения давления за фронтом отраженной волны в двухфазных средах пузырьки газа — жидкость по сравнению со случаем отражения ударных волн на границе раздела в несжимаемой жидкости. Установлена зависимость степени повышения давления в отраженной волне от интенсивности падающей волны, объемной концентрации газа в жидкости и началь-



Фиг. 1

ного давления в среде [1–4]. Однако во всех перечисленных работах исследователи имели дело с системами, где изменение массовой доли газа в жидкости было пренебрежительно мало. Изменение массового содержания газа в жидкости для двухфазной системы возможно, если используются газы с высокой степенью растворимости в жидкости или рассматриваются системы с паровыми пузырьками, способными сконденсироваться под влиянием повышения давления в волне сжатия. В связи с этим требуется проанализировать влияние уменьшения массового содержания газа в двухфазной смеси, например возможного из-за растворения или конденсации, на параметры отраженных ударных волн. В противном случае анализ нагрузок на стенки аппаратов, основанный только на экспериментах с нерастворимыми и неконденсирующимися газами, может дать неверное, заниженное значение интенсивности отраженных волн и, следовательно, приведет к неверной оценке возможных нагрузок на конструкцию при проникновении волн сжатия в объем, занятый двухфазной смесью. В выполненных исследованиях, например в [5], уже можно видеть косвенные свидетельства в пользу большей опасности двухфазных систем с конденсирующимся газом в процессе отражения ударных волн на жесткой стенке. Кроме данных из [5] можно указать и другие свидетельства зависимости параметров отраженных ударных волн от растворимости газовых пузырьков в жидкости.

Для подтверждения влияния растворимости газа на параметры отражения волн по общепринятой методике типа описанной в [1, 3, 4] выполнены опыты с системами вода — пузырьки азота и вода — пузырьки углекислого газа. Азот и углекислый газ по своей растворимости в воде резко отличаются друг от друга. Так, если при нормальных условиях в воде растворяется 1 часть азота, то при тех же условиях в том же количестве воды растворяется около 150 частей углекислого газа. Рассмотрим

фоторегистрации процесса изменения давления за волной при отражении на жесткой стенке на фиг. 1, а и б. На фиг. 1, а показан случай движения волны с интенсивностью  $\delta_1 = p_1 p_0^{-1} = 13$  в системе вода — пузырьки азота. Здесь  $p_1, p_0$  — давление за волной и в невозмущенной среде, причем  $p_0 = 1$  бар. Объемная концентрация газа в жидкости  $\beta = 3\%$ . Расположение датчиков давления ясно из пояснительного рисунка, а расстояние между соседними датчиками 240 мм. Масштаб развертки лучей осциллографа 900 мкс на деление. Для случая на фиг. 1, а давление в среде за отраженной волной до момента начала его спада из-за волны разрежения составило  $p_2 = 80$  бар, т.е.  $\delta_2 = p_2 p_0^{-1} = 80$ . На фиг. 1, б показана регистрация процесса движения волны с  $\delta_1 = 12,1$  в воде с пузырьками углекислого газа при  $\beta = 4,5\%$ . Давление за отраженной волной в этом случае оказалось  $p_2 = 145$  бар, т.е.  $\delta_2 = 145$ . Повышение давления за отраженной волной по сравнению с давлением за падающей оказалось в первом случае  $p_2 p_1^{-1} = 6,1$ , а во втором — 12. Это означает, что только замена азота на углекислый газ в пузырьках привела почти к двукратному увеличению давления за отраженной волной. Дальнейшие опыты с системой вода — углекислый газ показали, что подобное различие сохраняется для достаточно широкого диапазона интенсивности падающих волн.

В работе [2] предложена схема расчета давления в отраженной ударной волне в жидкости с пузырьками нерастворимого и неконденсирующегося газа. Как показано в [2], эта схема позволила удовлетворительно учесть влияние интенсивности проходящей волны, объемной доли газа в жидкости и начального давления. Меняя схемы расчетов в [2], предположим, что за фронтом падающей волны происходит растворение газа из пузырьков. Тогда за фронтом падающей волны массовая и объемная концентрация растворимого газа оказываются меньше, чем в случае систем с пузырьками азота, водорода, гелия и других плохо растворимых в воде газов. Задача о захлопывании коллектива пузырьков с быстро растворимым газом за фронтом ударной волны не решена. Для упрощения решения задачи будем считать, что за сколь угодно слабой ударной волной происходит интенсивное и полное исчезновение газовых включений. Этот подход, хотя и не соответствует реальности протекающего процесса, но, по-видимому, позволит объяснить получаемые в опытах результаты.

Пусть ударная волна с давлением на фронте  $p_1$  движется по пузырьковой среде с объемной концентрацией газа в жидкости  $\beta$ . Легко показать, что для несжимаемой жидкости и для сжимаемой жидкости в линейном приближении [6] скорость ударной волны равна

$$D^2 = (p_1 - p_0) [\beta(1 - \beta) \rho_f]^{-1} \quad (1)$$

$$D^2 = \frac{c_f^2 (p_1 - p_0)}{Bn(1 - \beta) [1 - (1 - \beta) / [1 + (p_1 - p_0) / Bn]]} \quad (2)$$

Здесь  $B, n$  — постоянные из уравнения состояния жидкости в форме Тэта,  $\rho_f, c_f$  — плотность и скорость звука в чистой жидкости. Для воды  $\rho_f = 1000$  кг/м<sup>3</sup>,  $c_f = 1500$  м/с.

Давление за отраженной ударной волной найдем из соотношения

$$p_2 = p_1 + \rho_1 (D_2 + u_1) u_1$$

Здесь  $\rho_1, u_1$  — плотность и скорость среды за падающей ударной волной,  $D_2$  — скорость отраженной волны.

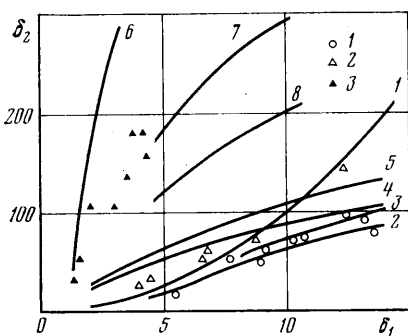
В случае полного захлопывания газовых включений за проходящей волной  $\rho_1 = \rho_f, D_2 = c_f$ . Считаем, что плотность и скорость звука жидкости не зависят от температуры, а зависимость этих параметров от давления линейная [6]. Скорость потока  $u_1$  находится по известным соотношениям на ударном разрыве с использованием соотношений [2].

Проведем анализ расчетных зависимостей. На фиг. 2 представлен график зависимости давления в отраженной волне  $p_2 p_0^{-1}$  от интенсивности падающей на преграду ударной волны  $p_1 p_0^{-1}$  для различных объемных концентраций газа в жидкости. Кривая 1 построена по соотношению [3]  $p_2 p_0^{-1} = (p_1 p_0^{-1})^2$  без учета сжимаемости жидкости. Видно, что это соотношение не учитывает объемной концентрации газа в жидкости. Кривые 2, 3 построены для  $\beta = 3$  и 5% с учетом сжимаемости воды, когда в пузырьках находится малорастворимый газ — азот. В этом случае не происходит полного захлопывания газовых включений, а расчет производится по схеме [2]. Экспериментальные данные, обозначенные цифрой 1, получены для азотных пузырьков при  $\beta = 3-5\%$ .

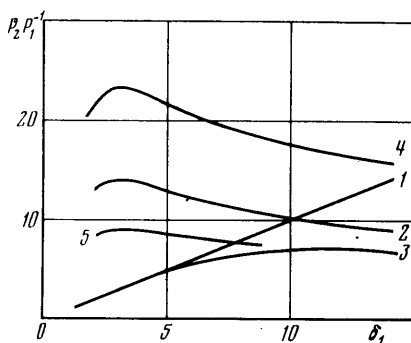
Кривые 4, 5 построены по модели полного захлопывания пузырьков углекислого газа для  $\beta = 3$  и 5% с учетом сжимаемости воды. Экспериментальные результаты, обозначенные цифрой 2, получены при  $\beta = 2-4,5\%$ . Как видно из графика, давление отражения в пузырьковых средах с малорастворимыми газами по всей анализи-

руемой области изменения давления  $p_1$  меньше давления отражения по модели [3]. Для пузырьков хорошо растворимых газов существует область изменения  $p_1$ , когда давление отражения превосходит аналогичную величину, рассчитанную по [3], что связано с увеличением сжимаемости двухфазной среды, обусловленной растворением газа.

Попытаемся с изложенных позиций объяснить результаты работы [5], где изучалось взаимодействие ударных волн с жесткой стенкой, распространяющихся по кипящему жидкому азоту. Анализ результатов [5] показывает, что в кипящем жидком азоте объемные концентрации пара в отдельных случаях могли достигать значительных величин — порядка 80–95%. Подтверждением этого предположения может служить и фоторегистрация состояния кипящего жидкого азота в коническом сосуде с плоскими прозрачными стенками, представленная на фиг. 1, в. Необходимо отметить сложную структуру кипящего жидкого азота из жидких пленок,



Фиг. 2



Фиг. 3

капель и крупных, порядка нескольких миллиметров, газовых включений. Из фоторегистрации видно, что объемная доля газа больше величины порядка 10%, когда отдельные газовые включения еще можно различить.

Кривая 6 на фиг. 2 отражает зависимость давления отражения в кипящем жидком азоте по модели полного захлопывания для  $\beta=85\%$ . Видно, что опытные данные, обозначенные цифрой 3, удовлетворительно согласуются с расчетной кривой. При расчетах принято для жидкого азота  $\rho_f=850$  кг/м<sup>3</sup>,  $c_f=960$  м/с. Давление за отраженной волной в двухфазных средах будет зависеть и от сжимаемости жидкости. Действительно, анализ кривых 7, 8, построенных при одинаковой начальной объемной концентрации 30%, показывает, что давление отражения в кипящей воде (кривая 7) в 1,5 раза превосходит давление отражения в кипящем жидком азоте как более сжимаемой среде (кривая 8).

На фиг. 3 представлены расчетные кривые, показывающие связь коэффициента отражения  $p_2 p_1^{-1}$  с интенсивностью падающей волны  $p_1 p_0^{-1}$ . Прямая 1 построена по соотношению  $p_2 p_1^{-1} = p_1 p_0^{-1}$  из [3]. Кривые 2, 3 рассчитаны для  $\beta=5\%$ , когда в воде находится хорошо растворимый газ (углекислый газ) и азот соответственно. Кривая 4 отвечает случаю, когда в кипящем жидком азоте находится  $\beta=30\%$  пара. Видно, что коэффициент отражения для всех разновидностей двухфазных сред первоначально возрастает с ростом  $\delta_1$ , а затем, пройдя через максимум, начинает убывать. Это связано с тем, что в квазиакустических волнах давления и в сильных ударных волнах  $\delta_1 > 50$  основная часть энергии ударной волны переносится жидкостью.

Высказанное ранее предположение о существенной зависимости давления за отраженной волной от растворимости газа в жидкости для двухфазной среды нашло свое подтверждение в некоторых упомянутых экспериментах и может быть с достаточной достоверностью оценено расчетным путем. Имеющее место расхождение расчетных и теоретических результатов в количественном отношении невелико и легко объясняется неполнотой растворения или конденсации газа в жидкости за фронтом проходящей ударной волны. Тем не менее анализ процесса отражения волн давления в предположении полного исчезновения газовой составляющей смеси за фронтом волны позволяет указать предельно возможные нагрузки на конструкцию. Наиболее интересным свойством двухфазных смесей является тот факт, что растворимость газа особенно сильно проявляется в волнах умеренной интенсивности, что связано с относительным сближением параметров ударной волны  $u_1$ ,  $D$ ,  $\rho_1$  к аналогичным величинам для нерастворимых газов в воде в сильных волнах. Так, для углекислого газа наибольшее отклонение давления за отраженной волной от того же параметра для сред с плохо растворимыми газами при  $\beta=3-5\%$  замечено

для волн с  $5 < \delta_1 < 20$ . В сильных волнах с  $\delta_1 > 50$ , по-видимому, не будет отличия параметров отраженных волн в воде с пузырьками углекислого газа и азота. При увеличении объемного содержания газа в жидкости указанный диапазон интенсивности волн, где параметры отраженных волн зависят от растворимости, несколько расширяется.

Для этого достаточно сравнить зависимости 2 и 4 на фиг. 3, построенные для двухфазных систем с различным объемным содержанием газа. Другой важный параметр состояния двухфазной среды — давление. Увеличение давления приводит к резкому сокращению диапазона интенсивности ударных волн, где влияние растворимости газа заметно. Для того чтобы убедиться в этом, достаточно сравнить зависимости 4 и 5 на фиг. 3, построенные при различном начальном давлении в среде 1 и 10 бар соответственно. Как видно, при  $p_0 = 10$  бар растворимость газа проявляет себя в волнах  $\delta_1 < 10$ . В связи с постановкой задачи, где предполагается полное растворение или полная конденсация газа за волной в жидкости, при расчете кривой 5 не учитывали возможное изменение степени растворимости газа с повышением начального давления.

Выполненные эксперименты вместе с данными из [5], построение расчетной модели и их анализ показали, что растворимость или конденсация газа в жидкости наиболее существенно способствуют изменению параметров отраженных волн для умеренно сильных исходных возмущений с перепадами давления на фронте  $\delta_1 < 50$ . В связи с отмеченными особенностями, когда коэффициент повышения давления за волной может достигать  $p_2 p_1^{-1} = 10 - 20$ , для системы оказываются одинаково опасными и возмущения малой интенсивности с  $\delta_1 < 5$ . Указанная особенность динамических процессов в двухфазных средах всегда должна учитываться при рассмотрении аварийных ситуаций. Основным способом снижения влияния растворимости газа может оказаться простое повышение среднего давления в установке.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гельфанд Б. Е., Губин С. А., Козарко С. М., Тимофеев Е. И. Прохождение ударных волн через границу раздела в двухфазных газожидкостных средах. — Изв. АН СССР. МЖГ, 1974, № 6, с. 58.
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. МЖГ, 1978, № 2, с. 174.
3. Campbell L. J., Pitcher A. Shock waves in al liquid containing gas bubbles. — Proc. Roy. Soc., 1958, v. A243, № 1235, p. 534.
4. Накоряков В. Е., Покусаев Б. Г., Шрейбер И. Р., Кузнецов В. В., Малых Н. В. Экспериментальное исследование ударных волн в жидкости с пузырьками газа. — В кн.: Волновые процессы в двухфазных системах. Новосибирск, 1975, с. 54.
5. Борисов А. А., Гельфанд Б. Е., Губайдуллин А. А. и др. Усиление ударных волн в жидкости с пузырьками пара. — В кн.: Нелинейные волновые процессы в двухфазных средах. Новосибирск, 1977, с. 67.
6. Гриб А. А., Рябинин А. Г., Христианович С. А. Об отражении плоской ударной волны в воде от свободной поверхности. — ПММ, 1956, т. 20, вып. 4, с. 532.

Москва

Поступила в редакцию  
7.IV.1980

УДК 532.542.4+533.697.3

#### РАСЧЕТ ПРОЦЕССА ТОРМОЖЕНИЯ ВЯЗКОГО СВЕРХЗВУКОВОГО ПОТОКА ГАЗА В КАНАЛАХ

КОЗЛОВ В. Е., САБЕЛЬНИКОВ В. А.

Исследован процесс торможения вязкого сверхзвукового неравномерного потока газа в плоских и осесимметричных каналах. Предложена модификация формулы Праудтля для турбулентной вязкости, учитывающая зависимость длины пути смешения от значения осевого числа Маха. Проведено сравнение результатов расчета с известными экспериментальными данными по торможению сверхзвукового потока в дозвуковом «псевдоскачке».

1. Рассматривается случай, когда в канале перед областью перехода от сверхзвукового режима течения к дозвуковому имеют место достаточно толстые пограничные слои (так называемый режим «псевдоскачка» [1, 2]). Повышенный уровень статического давления на выходе из канала влияет на дозвуковую часть пограничного