

ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УДАРНЫХ ВОЛН С ПУЗЫРЬКОВЫМИ ЭКРАНАМИ В ЖИДКОСТИ

В.В. Кузнецов, С.А. Сафонов

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе
630090, г. Новосибирск, Россия*

Большое разнообразие явлений, связанных с эффектами многофазности и нелинейности в двухфазных газожидкостных системах, обуславливает необходимость проведения экспериментальных и теоретических исследований, направленных на изучение природы распространения волн, что важно для развития систем безопасности энергетических комплексов, технологий подавления энергии взрывных волн и т.д. Гашение взрывной волны тонким пузырьковым слоем и расслоение волны на высокочастотный упругий предвестник и более протяженную основную волну было экспериментально обнаружено в [1,2]. С другой стороны, в [3] получено усиление взрывной волны после прохождения пузырькового экрана, что затрудняет выбор параметров экрана, необходимых для эффективного гашения энергии волны.

Известно, что скорость распространения линейных возмущений давления в пузырьковой смеси уменьшается с частотой и достигает минимума на резонансной частоте пузырьков ω_b . Для частот, больших резонансной частоты пузырьков, в «окне непрозрачности», скорость резко увеличивается и затем асимптотически приближается к скорости звука в жидкости. Эволюция длинноволновых импульсов давления с крутым фронтом ($\omega \gg \omega_b$) при малой нелинейности была рассмотрена в [4] на основе двухскоростного уравнения. Наиболее малоизученным случаем является взаимодействие ударных волн большой амплитуды, содержащей широкий спектр частот, в том числе частоты внутри окна непрозрачности, с пузырьковыми экранами, который рассмотрен в данной работе.

Эксперименты проведены в бассейне глубиной 4 м и в качестве источника ударной волны использовались микровзрывы. Плоская пузырьковая завеса отделяла место инициализации волны давления от турмалинового датчика давления, расположенного на глубине 1.7 м. Пузырьковая завеса толщиной от 0.04 до 0.5 м создавалась продувкой воздуха через микроотверстия в ряду затопленных горизонтальных труб. Объемное газосодержание в завесе изменялось от 0.03% до 1%. На рисунке 1 приведены характерные осциллограммы профилей давления за пузырьковым экраном при толщине экрана, равной 4 см, и среднем диаметре пузырьков 1.4 мм. Как видно, взаимодействие волны давления с пузырьковым экраном при ее начальной амплитуде $\Delta P_0 = 20$ МПа и характерной длительности $\theta_0 = 8.8$ μ s приводит не только к изменению амплитуды волны, но и перестройке ее структуры. При тонком экране, что соответствует 2 – 3 слоя пузырьков, наблюдается распад возмущения на две волны, что связано с несовпадением фаз давления в жидкости и в пузырьках при резком росте давления в жидкости. Вследствие инерции присоединенной массы жидкости давление в пузырьках не может измениться мгновенно, и их максимальное сжатие происходит через промежуток времени, который характеризует реакцию слоя пузырьков на волну. При сжатии пузырьков потенциальная энергия волны переходит в кинетическую энергию жидкости, окружающей пузырьки, и происходит перекачка энергии в низкочастотные возмущения со спектром частот до резонансной частоты пузырьков. Дальнейшая трансформация волны определяется известными решениями уравнения КДВ с выделением солитонов или волновых пакетов.

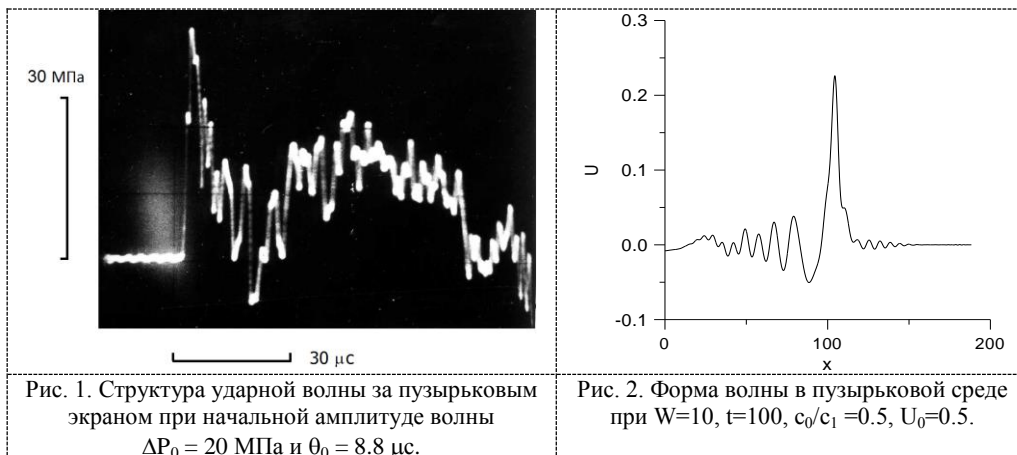


Рис. 1. Структура ударной волны за пузырьковым экраном при начальной амплитуде волны $\Delta P_0 = 20$ МПа и $\theta_0 = 8.8$ μ с.

Рис. 2. Форма волны в пузырьковой среде при $W=10$, $t=100$, $c_0/c_1=0.5$, $U_0=0.5$.

Экспериментально установлены условия, при которых тонкий пузырьковый экран эффективно поглощает энергию волны и выявлено, что поглощение энергии происходит за счет перестройки структуры волны давления, связанной с трансформацией потенциальной энергии волны в кинетическую энергию жидкости. Приведенная схема позволила построить модель взаимодействия взрывной волны большой амплитуды с тонким пузырьковым экраном. Установлено, что увеличение кинетической энергии жидкости при сжатии пузырьков в падающей волне происходит неравномерно и потенциальная энергия волны может быть преобразована в кинетическую энергию жидкости только после времени задержки τ_1 , значение которого соответствует экспериментальным данным.

Результаты расчета формы волны при ее падении на слой пузырьков для длинноволнового двухволнового уравнения [4]:

$$A \cdot \left((c_0 / c_1)^2 U_{tt} - U_{xx} \right)_{tt} + U_{tt} - U_{xx} = (U^2)_{tt} \quad (1)$$

показаны на рис. 2. Здесь $U(x,0) = (\gamma + 1) / 2\gamma \cdot (P(x,0) / P_0 - 1)$, $A = c_0^2 / W\omega_b^2$, c_0 и c_1 - низкочастотная скорость звука и скорость звука в жидкости соответственно. Уравнение (1) безразмерено по начальной ширине возмущения \sqrt{W} и c_0 , расчеты проведены для начального возмущения $P(x,0) / P_0 - 1 = \Delta P_0 \cdot \exp(-x^2 / W)$ и $A=1$. Как видно, структура предвестника в эксперименте и расчете существенно отличаются. Это показывает, что решение двухволнового уравнения не в полной мере учитывает отмеченный ранее характер взаимодействия ударной волны большой амплитуды с пузырьковым экраном, если длительность переднего фронта волны существенно меньше характерного времени сжатия пузырька.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кедринский В.К. Распространение возмущений давления в жидкости, содержащей пузырьки газа // Прикладная механика и техническая физика. - 1968. - № 4. - С. 29-34.
2. Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г., Шрейбер И.Р., Кузнецов В.В., Малых Н.В. Экспериментальное исследование ударных волн в жидкости с пузырьками газа // Волновые процессы в двухфазных системах. - Новосибирск, 1975. - С. 54-97.
3. Гельфанд Б.Е., Губин С.А., Когарко С.М., Попов О.Е., Тимофеев Е.И. Взаимодействие слабых сферических ударных волн в жидкости с пузырьковым экраном // Изв. АН СССР Механика жидкости и газа. - 1976. - № 2. - С. 85-89.
4. Гасенко В.Г., Накоряков В.Е., Шрейбер И.Р. Двухволновая модель распространения возмущений в жидкости с пузырьками газа // Прикладная механика и техническая физика. - 1979. - № 6. - С. 119-127.