

ВЛИЯНИЕ ПУЗЫРЬКОВОГО ЭКРАНА НА УДАРНО-ВОЛНОВОЕ ВОЗМУЩЕНИЕ В ЖИДКОСТИ

*Е. И. Тимофеев, Б. Е. Гельфанд, А. Г. Гумеров, М. М. Кофман,
А. Н. Поленов, С. В. Хомик*

(Москва)

В литературе имеется ряд примеров описания успешного использования пузырьковых экранов в жидкости для обеспечения защиты различных объектов от ударных волн при ведении подводных взрывных работ. В [1, 2] теоретически рассмотрены изменения амплитуды длинных ударных волн (УВ) после прохода через экран с плоскими границами раздела и при косом падении волны на экраны. Однако в этих расчетах не рассматривалась полная картина распространения волны давления в экране и за ним, что не позволило оценить изменение импульса, прошедшего за двухфазную среду. Расчеты [1, 2] основаны на данных опытного наблюдения преломления УВ применительно к случаю плоских длинных ударных волн [3]. Но уже в [4—8] при исследовании случаев, более близких к реальности, оказалось, что влияние экрана на параметры ударных волн не ограничивается только понижением амплитуды волны на фронте.

В [5] интенсивность волны в воде составляла 2,5—100 МПа, а размер круговой пузырьковой завесы 0,03—0,5 м при объемной концентрации газа $\beta_0 = 0,002 \div 0,2\%$. При измерениях давлений в двухфазной среде [5] обнаружено существование интенсивных пульсаций на фронте волны, чередующихся фазами понижения и повышения давления. Показано уменьшение пульсаций с ростом объемной концентрации газа и наклона переднего фронта в завесе по мере продвижения УВ в глубь двухфазной среды.

В [6] при варьировании β_0 от 0,4 до 30% отмечено увеличение длины волны за пузырьковой завесой в плоском случае по сравнению с длиной волны перед экраном, а также образование двухволновой конфигурации волны давления. Аналогичные результаты в более широком диапазоне изменений условий проведения опытов по движению УВ в пузырьковых средах представлены в [7, 8]. В [7] при барботировании в ударную трубу гелия, воздуха и азота получена аналогичная [6] конфигурация волны и исследовано ее затухание в двухфазной среде при длине завесы от $2 \cdot 10^{-2}$ до 1,5 м и объемной концентрации $\beta_0 \leq 10\%$. В [8] рассмотрены эволюция слабых и сильных ударных волн в водоглицериновом растворе в пузырьковой среде при $\beta_0 \leq 8\%$ и физические условия возникновения сложной конфигурации волны с позиций двухволнового уравнения.

Отметим, что в [4—8] УВ инициировали в воде маломощными источниками: детонация пропаноокислородной смеси [4], взрывающаяся проволока [6], детонатор [5, 7, 8]. В [9] дополнительно обращено внимание на изменение характера возмущения в воде за экраном вследствие возможного проскока волны между источником пузырьков и дном водоема.

Анализ опубликованных данных [1—8] показывает на необходимость дополнительных экспериментов с целью одновременного измерения давления в воде, в экране и за двухфазной прослойкой, а также исследования гашения ударных волн пузырьковыми экранами от мощных источников (до нескольких сотен грамм взрывчатого вещества). Наиболее достоверный путь решения поставленной задачи состоит в сопоставлении результатов лабораторных экспериментов, типа описанных в [3—8], с результатами натурных испытаний в реальных условиях, подобных [9].

На параметры ударной волны в жидкости за пузырьковым экраном в реальном случае оказывают влияние такие геометрические факторы, как протяженность заряда, расстояние от заряда до точки измерения, толщина экрана, криволинейность границ пузырькового экрана. Для расширения объема данных об изменении параметров УВ при взаимодействии с



Рис. 1.

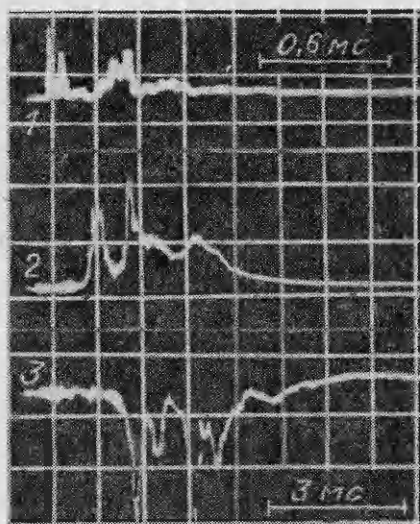


Рис. 2.

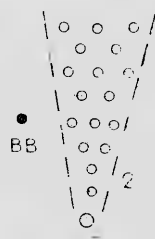


Рис. 3.

экраном проведены серии экспериментов на нескольких установках при начальном давлении $p_0 = 0,1$ МПа. На рис. 1 схематично изображена экспериментальная установка, подробно описанная в [3] (1—3 — пьезодатчики давления марки ЛХ). В отличие от [3] пузырьковая среда в виде экрана, расположенного в воде, образована закреплением на тонком металлическом каркасе воздушных пузырьков в резиновой оболочке. Диаметр пузырьков составлял 7—9 мм, а диаметр каркасных элементов, удерживающих пузырьки, 1 мм. Такая постановка эксперимента аналогична [6] и позволяет изучать воздействие на ударные волны экрана с плоскими границами. Масса заряда ВВ составляла 0,3—1,0 г, толщина пузырькового экрана — 20 см, $\beta_0 = 5,2$ и 10,4%.

На рис. 2 представлены типичные оциллограммы (осциллографы С8-13) профилей УВ в воде перед экраном (1), в экране (2) и за ним (3). При массе заряда ВВ 1 г и $\beta_0 = 5,2\%$ перепад давления в УВ составил $\Delta p_1 = p_1 - p_0 = 6,7$ МПа (перед экраном), $\Delta p_2 = p_2 - p_0 = 1,7$ МПа (в экране) и $\Delta p_3 = p_3 - p_0 = 2,6$ МПа (за экраном). Суммарный коэффициент ослабления ударной волны, включающий в себя взаимодействие волны с границами раздела и ее затухание в пузырьковой среде $\Delta p_3 / \Delta p_1 = 0,39$. В [1, 2] изменение интенсивности длинной волны при $\beta_0 = 5\%$ и $\Delta p_1 = 6,7$ МПа составило $\Delta p_3 / \Delta p_1 = 0,80$. Из сравнения приведенных коэффициентов ослабления видно, что в гашение волны существенный вклад (при разумно выбранной протяженности экрана) вносит затухание амплитуды волны в двухфазной среде.

На характер ударно-волнового возмущения в экспериментах на ударной трубе влияют боковые стенки трубы, границы раздела вода — двухфазная среда, нижний торец трубы (соответственно второе повышение давления на рис. 2).

Коэффициент ослабления УВ зависит от объемной концентрации газа в экране и массы заряда. Увеличение β_0 до 10,4% (масса заряда 1 г) приводит к уменьшению коэффициента ослабления до 0,24. При массе заряда 0,3 г коэффициенты ослабления для $\beta_0 = 5,2$ и 10,4% составили 0,2 и 0,12 соответственно. По данным [1, 2], при $\beta_0 = 10\%$ (в случае одинакового начального возмущения $\Delta p_1 = 6,7$ МПа) для длинных волн в рамках одноактного взаимодействия $\Delta p_3 / \Delta p_1 = 0,6$. Таким образом, данные [1, 2] позволяют в первом приближении оценивать максимальные значения давления волны, прошедшей за экран, для волн сжатия треугольного профиля.

Оценим изменение длины волны l при ее взаимодействии с границами раздела. Перед экраном продолжительность волны близка к 100, а за экраном — к 1000 мкс. За пузырьковым экраном $l \sim 1,5$ м при ее первоначальной длине (перед экраном) 0,15 м. Этот результат, известный ранее [6], можно объяснить низкой скоростью распространения длинноволновых слабых возмущений в двухфазной среде. К такому же

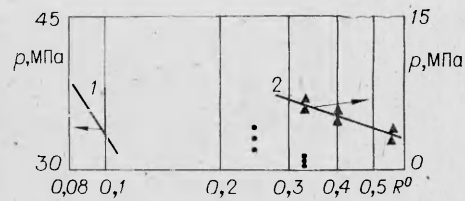
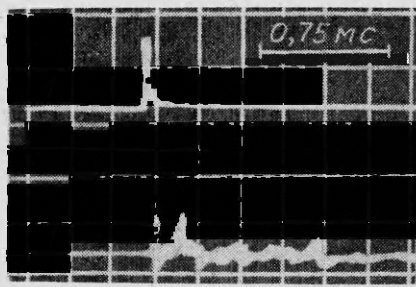


Рис. 5.

Рис. 4.

качественном отношении результату (увеличение длины волны в камере низкого давления ударной трубы) приводит в ударных трубах замена гелия на азот в камере высокого давления [10].

Аналогичное отмеченному для плоского экрана увеличение протяженности возмущения в воде за экраном, но более сложное по своей структуре, обнаруживается и для зарядов ВВ, приближающих условия проведения экспериментов к случаю цилиндрической симметрии. На рис. 3 представлена схема установки, состоящей из пьезодатчика давления пожевого типа 1 (предварительно откалиброванный на ударной трубе), пузырькового экрана 2 (шириной 0,2 м на свободной поверхности) и источника пузырьков 3 (трубка длиной 2 м с отверстиями; глубина 1,6 м). Заряд ВВ — детонирующий шнур ДШ длиной $l_3 = 1 \div 2$ м. Глубина, ширина и длина водоема 2, 4 и 30 м. Заряд ВВ и датчик давления находятся на глубине 1 м.

На рис. 4 представлены осциллограммы профилей УВ в жидкости без пузырькового экрана (верхняя осциллограмма) и с экраном. При $l_3 = 1,7$ м и расстоянии от заряда до датчика 1,4 м перепад давления в воде (экран отсутствует) составляет 6,3 МПа. Проследим за изменением давления в волне в зависимости от расстояния до заряда $R = 1,4 \div 2,3$ м. Для этого аналогично [11] введем приведенное расстояние $R^0 = R/q^{0,5}$, где q — энергия взрыва на единицу длины заряда в тех же единицах измерения, что и в [11]. Диапазон изменения R^0 в экспериментах составил $0,2 < R^0 < 0,55$.

На рис. 5 зависимость давления в волне при подрыве заряда длиной 1,7 м от R^0 представлена в виде линии 2, для которой может быть предложена эмпирическая зависимость

$$p = 1,55/(R^0)^{1,26} \quad (0,24 \leq R^0 \leq 0,55). \quad (1)$$

Линия 1 — эмпирическая зависимость из [11] для $0,07 \leq R^0 \leq 0,1$ (цилиндрический заряд), описываемая соотношением

$$p = 6,55/(R^0)^{0,71}. \quad (2)$$

В (1), (2) давление выражено в мегапаскалях. Отклонение линии 1 от 2 связано с тем, что эксперименты выполнены в области измерения, где цилиндрическая симметрия течения перестраивается в сферическую.

При наличии пузырькового экрана в 0,8 м от заряда в волне на расстоянии 1,4 м от ВВ $\Delta p = 0,35$ МПа (см. нижнюю осциллограмму на рис. 4), т. е. волна ослабла в 16 раз. Объемную концентрацию азота, равную на свободной поверхности 3%, определяли по времени вытеснения воды пузырьками из прозрачной емкости известного объема, в предположении, что установившаяся скорость всплытия пузырьков равна 0,3 м/с. Средние значения давления в волне за экраном не зависят от горизонтального или вертикального расположения заряда.

Время прохода ударной волны под источником пузырьков от заряда до точки измерения методом геометрической акустики [4] составляет 1,6 мс, что больше общего времени развития давления. Появление пиков давлений, следующих за первым, связано не с проскоком волны под источником пузырьков, а, по-видимому, с взаимодействием волны с экраном. Последнее приводит к образованию в пузырьковой среде ударных

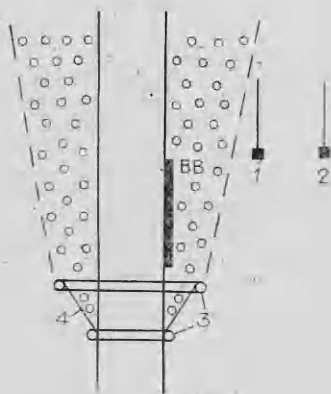


Рис. 6.

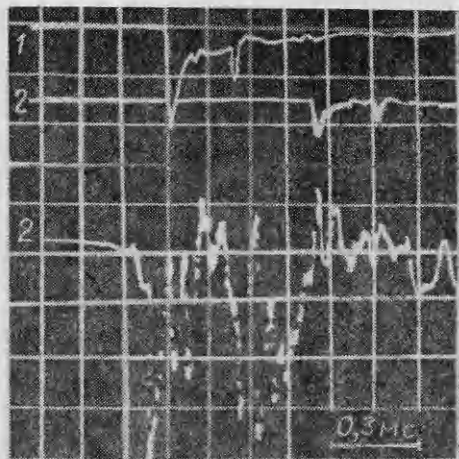


Рис. 7.

волн, падающих на границы раздела под некоторыми (в общем случае непостоянными) углами. Средняя протяженность возмущения в воде за экраном при этом возросла со 100 (когда экран отсутствует) до 1000 мкс. Для сложной геометрии течения (цилиндрическая, сферическая) увеличение длины волны в воде за пузырьковым экраном можно объяснить суммарным действием низкой скорости звука в среде и многократными пробегами волн давления в экране, как и в [4].

В экспериментах не обнаружена зависимость давления в волне за экраном от расстояния между пузырьковой средой и зарядом, варьируемого в опытах от 0,1 до 0,8 м при $R^0 = \text{const}$. Это обстоятельство можно качественно объяснить следующими соображениями. При расстояниях до экрана 0,1—0,2 м ($R^0 = 0,024 \div 0,048$) в соответствии с соотношением (1) на экран падает волна с $p = 90 \div 55$ МПа. Для таких волн изменение их интенсивности на границах экрана мало, а основное затухание происходит при движении взрывной волны в самой двухфазной среде. При расстояниях до экрана больше 0,8 м ($R^0 > 0,19$) в падающей на экран волне в соответствии с (2) $p < 10$ МПа. Для волн такой интенсивности изменение перепада давления на границах раздела становится более существенным, а непосредственное уменьшение давления из-за затухания в пузырьковой среде менее значительно, чем для случая сильных ударных волн.

На рис. 5 представлены экспериментальные данные по измерениям давления в волне за экраном для заряда длиной 1,5 м при $\beta_0 = 3\%$. Расстояние между зарядом и экраном для представленных данных составляет 0,1—0,8 м. Разброс данных по давлению (приведены максимальные значения p) при $R^0 = 0,24$ и 0,33 составляет 2,2—4,5 и 0,4—1,4 МПа соответственно.

Обнаруженное увеличение протяженности возмущения в воде за двухфазной средой (см. рис. 1—4) сохраняется и для случая пузырькового экрана, по своей форме приближающегося к цилиндрическому. Эксперименты проводили в водоеме глубиной 7 м на экспериментальной установке, изображенной на рис. 6, в условиях опытно-промышленного использования пузырьковых экранов для гашения ударных волн. Цифрами 1, 2 обозначены пьезодатчики ножевого типа, расположенные на глубине 4 м. Воздух подавали через две кольцевые трубки 3. Вертикальные заряды весом от 60 до 300 г расположены вдоль стальной трубы диаметром 38 см. Для равномерного распределения пузырьков в объеме между трубками натянута сетка 4. Диаметр пузырькового экрана на свободной поверхности составлял около 1 м.

На рис. 7 представлены типичные осциллограммы профилей ударных волн в воде. Для верхней осциллограммы (5 м детонирующего шнура, 60 г ВВ) расстояние от ВВ до датчиков 1 и 1,5 м, а измеренные давле-

ния составили 20—30 МПа (на расстоянии 1 м) и 8,6 МПа (1,5 м) соответственно. Продолжительность волны составляет 150—200 мкс. Из сравнения осциллограмм рис. 2, 4, 7 видно, что увеличение массы заряда от 1 до 60 г не приводит к сильному изменению длины возмущения в воде в отсутствие пузырькового экрана. Сравнение давлений на расстоянии 1,5 и 1,4 м (см. рис. 4) показывает, что увеличение массы заряда в 3,33 раза привело к росту давления в волне в 1,4 раза.

На нижней осциллограмме рис. 7 представлен профиль волны на расстоянии 1,8 м от заряда массой 120 г и длиной 0,6 м в медной оболочке в присутствии пузырьковой завесы, $\beta_0 = 3\%$. В этих условиях $p = 3,8$ МПа, а продолжительность основного возмущения составляет 500 мкс. Полагается, что в отсутствие двухфазной среды возмущение в воде продлится 150—200 мкс. Своеобразный характер сигнала связан со сложным взаимодействием волны давления с искривленной границей раздела двухфазная среда — вода. Напомним, что примерно в этих же условиях давление в волне от ДШ длиной 1,7 м (примерно 20 г ВВ) составило 0,35 МПа (см. рис. 4).

Волна давления существенно меняет свою длительность, и защищаемый объект испытывает действие протяженного во времени и пространстве возмущения давления. Это свойство пузырьковых экранов проявляет себя практически в любых условиях (от лабораторных [5—8] до различных природных экспериментов). Опыты показывают также, что увеличение массы заряда от 1 до 120 г не приводит к заметному росту длины волны в воде перед экраном. Для эффективного гашения ударных волн при подрыве зарядов массой 100—200 г необходимо создавать завесу толщиной ~ 1 м при $\beta_0 = 3\%$. Аппроксимационная зависимость (2) позволяет оценивать давление на фронте волны в воде в дальней области развития течения. Окончательное суждение о демпфирующем действии пузырьковых экранов может быть сделано только на основе одновременных измерений давления и импульса давления в каждом конкретном случае использования пузырьковых завес. Приведенные в [9] измерения импульса не представляются полными, так как они не учитывают возможность многократного излучения волн пузырьковым экраном, на что указано в [6] и отмечено в проделанных опытах.

Поступила в редакцию 20/III 1984

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. Е. Гельфанд, А. В. Губанов, Е. И. Тимофеев. ПМТФ, 1982, 1, 118.
2. Б. Е. Гельфанд, А. В. Губанов, Е. И. Тимофеев. МЖГ, 1981, 2, 173.
3. Б. Е. Гельфанд, С. А. Губин и др. МЖГ, 1974, 6, 58.
4. В. Е. Гельфанд, С. А. Губин и др. МЖГ, 1976, 2, 85.
5. В. Е. Накоряков, Б. Г. Покусаев и др.— В кн.: Волновые процессы в двухфазных системах. Новосибирск, 1975.
6. В. К. Кедринский. ФГВ, 1980, 16, 5, 14.
7. Н. В. Малых, И. А. Огородников.— В кн.: Переход ламинарного пограничного слоя в турбулентный. Двухфазные потоки. Новосибирск, 1978.
8. В. В. Кузнецов, Б. Г. Покусаев. Там же.
9. Я. И. Цейтлин, Р. А. Гильманов, В. Г. Нилов.— В кн.: Взрывное дело, № 82/39. М.: Недра, 1980.
10. А. Гейдон, И. Герл. Ударная труба в химической физике высоких температур. М.: Мир, 1966.
11. Б. Д. Христофоров, Э. А. Широкова. ПМТФ, 1962, 5, 147.