

УДК 532.593:532.529

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВОЗДУШНЫХ УДАРНЫХ ВОЛН С ПОРИСТЫМ ЭКРАНОМ

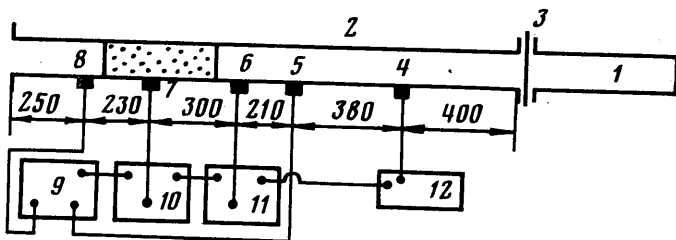
ГЕЛЬФАНД Б. Е., ГУБАНОВ А. В., ТИМОФЕЕВ Е. И.

Исследования распространения нестационарных ударных волн в пористых средах показали их применимость для защиты окружающей среды от воздействия ударных нагрузок [1, 2]. В [1, 2] измерены параметры взрывных ударных волн в водно-механических пенах плотностью 5–15 кг/м<sup>3</sup> и отмечено более резкое затухание волн давления по сравнению с воздухом. Источник возмущений при опытах в [1, 2] размещался непосредственно в пористой среде (пене). Возможен случай внешнего по отношению к пористой среде расположения источника возмущений. При внешнем положении источника на параметры прошедшей за пористый экран ударной волны влияет не только двухфазная среда, но и граница раздела газ – пена, пена – газ. Ввиду различия акустического сопротивления пены [1, 2] и окружающего воздуха изменение параметров волн на границах раздела будет значительным.

Пока имеются лишь косвенные данные по влиянию границ раздела пена – газ [2] и газ – пена [3] на параметры ударной волны, а теоретически этот случай анализировался в [4]. Ниже приведены опытные данные, где параметры преломленных на границах раздела газ – пена и пена – газ ударных волн измеряли на примере взаимодействия длинных (1,5 м) ударных волн при малом затухании возмущений в пористом образце. В качестве пористой среды выбраны два образца пенополиуретана с плотностью 20 и 35 кг/м<sup>3</sup> и размером ячеек 2–6 и 1 мм соответственно. Уменьшение размеров ячеек приводит к увеличению примерно в 3–4 раза числа продольных и поперечных скелетных элементов пенополиуретана в фиксированном объеме. Такое изменение структуры оказывает влияние на поведение ударных волн в длинных образцах и обсуждается при анализе экспериментальных результатов. Пенополиуретан по своим свойствам близок к водно-механическим пенам и прост в обращении.

**1. Экспериментальная установка. Результаты экспериментов.** Исследования по взаимодействию ударных волн с пористым экраном проводились на экспериментальной установке, схематично представленной на фиг. 1. Ударная труба, состоящая из камер высокого 1 и низкого давления 2 длиной 0,5 и 1,8 м соответственно, имела прямоугольное сечение 30×45 мм. Камеры разделены мембраной 3. На боковой стенке расположено пять пьезодатчиков давления с собственной частотой не ниже 30 кГц (4–8). Пьезодатчик 4 управлял срабатыванием генератора Г 5-54 (12), подающего сигнал на осциллографы С1-17 (9) и С8-13 (10, 11). Пьезодатчики давления 5–8 измеряли параметры ударных волн в воздухе и пенополиуретане. В экспериментах использовались блоки длиной 0,3 и 0,8 м и сечением 29×44 и 31×46 мм. Начальное давление в экспериментах  $p_0=0,1$  МПа, а интенсивность падающей на образец воздушной ударной волны  $\delta_1=p_1p_0^{-1}$  варьировалась в пределах  $\delta_1=1,3-9$ .

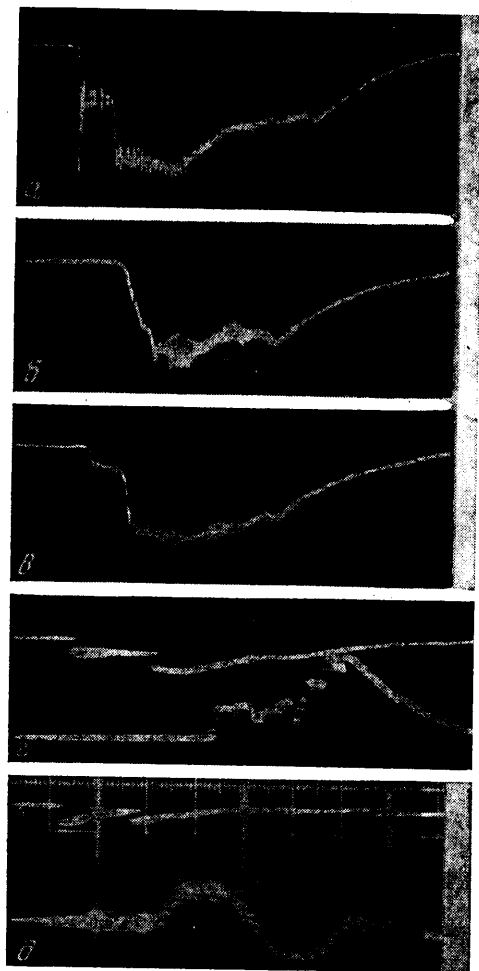
На фиг. 2, а представлена осциллограмма взаимодействия воздушной ударной волны при  $\delta_1=3,3$  с границей раздела газ – пенополиуретан, осциллограмма соответствует показаниям датчика 6. Все приведенные осциллограммы относятся к образцу с плотностью 20 кг/м<sup>3</sup>. Масштаб развертки времени для всех осциллограмм на фиг. 2 равен 1 мс на деление горизонтальной шкалы. Через интервал времени 0,8 мс за фронтом падающей волны датчик регистрирует отраженную от границы раздела ударную волну  $\delta_2=p_2p_0^{-1}=5,2$ . Профиль ударной волны в пенополиуретане приведен на осциллограмме фиг. 2, б и записан датчиком 7. Измеренное давление  $\delta_2 \approx 5,2$ , а время нарастания давления от  $p_0$  до  $p_2$  близко к 1 мс. В качестве наносимой на график величины  $\delta_2$  выбиралась средняя величина давления, измеренная в прошедшей и отраженной от образца волне в одном эксперименте. Для приведенных осциллограмм блок пенополиуретана длиной



Фиг. 1

0,3 м имел сечение  $31 \times 46$  мм, так что воздушный зазор между стенками ударной трубы и образцом отсутствовал.

Иной профиль волны давления регистрируется в образце, если между ним и стенками трубы имеется очень малый воздушный зазор. На фиг. 2, в представлена осциллограмма давления для ударной волны в пенополиуретане



Фиг. 2

к зазору слой пенополиуретана. Затухание первого возмущения вызвано отсутствием подпора со стороны двигающейся с меньшей скоростью основной ударной волны.

Полная картина изменения давления при взаимодействиях ударной волны с пористым экраном длиной 0,3 м (вставленным в трубу без зазора)

длина 0,3 м и сечением  $29 \times 44$  мм по показаниям датчика 7. Первоначально датчик давления регистрирует слабое возмущение с перепадом на фронте  $\Delta p = p_2 - p_0 = 0,1$  МПа. Спустя около 1 мс регистрируется вторая волна с  $\delta_2 = 5$ . Сравнение осциллограммы с  $\delta_2 = 5$  показывает образование в образце двухволновой структуры. Если второе повышение давления вызвано преломлением исходной воздушной ударной волны на границе раздела, то первое связано с проскоком возмущения давления по воздушному зазору между стенкой трубы и пенополиуретаном. Схожее явление проскока обнаружено в [5] для воды, граничащей с газовой прослойкой. В процессе эволюции двухволновой структуры на длине до 0,8 м скорость и давление первого возмущения убывают. Давление  $\Delta p$  менялось с 0,15 до 0,06 МПа на длине 0,53 м, а средняя скорость падала с 290 до 210 м/с. Приведенные значения скорости предвестника меньше скорости звука в воздухе, но больше скорости ударной волны в образце при  $\delta_2 = 5$ , которая составляет 160 м/с. Из сравнения величины скоростей можно предположить, что при проскоке волны в зазор в движение вовлекается не только газ, находящийся в зазоре, но и некоторый прилегающий

представлена на фиг. 2, г. На верхнем луче по показаниям датчика 5 зарегистрированы падающая с  $\delta_1=3,5$  и отраженная в воздух  $\delta_2=6$  ударные волны. На нижнем луче по показаниям датчика 8 регистрируется давление за блоком. Интенсивность этой волны  $\delta_3=p_3 p_0^{-1}=1,9$ , что меньше интенсивности исходной ударной волны  $\delta_1$ . Через промежуток времени 1,8 мс датчик регистрирует повышение давления до  $\delta_0=3,4$ , близкое по величине к исходному возмущению  $\delta_1$ . Приводимые осциллограммы требуют пояснения в связи с вовлечением пористого образца в движение. Изменение давления перед образцом, записанное датчиком 5, характеризует следующие моменты. Первое повышение давления вызвано падающей волной, а второе — отраженной от блока волной. Спад давления за отраженной волной до значения, близкого к давлению за проходящей волной, вызван движением образца по каналу трубы. Завершающий спад давления происходит после выхода образца из канала трубы и вызван истечением газа в атмосферу.

Изменения давления, записанные датчиком, стоящим за образцом, вызывается следующими причинами. Сначала фиксируется давление в волне, излучаемой из пенополиуретана при достижении передним фронтом бегущей по образцу волны границы раздела пенополиуретан — газ. Последующее повышение давления вызывается волнами, последовательно излучаемыми из образца во время его вовлечения в движение воздушной волной. Давление может достигать и значения, развивающегося в самом образце, при условии накрытия датчика движущимся образцом.

Иная картина взаимодействия наблюдается в случае падения на блок ударной волны с треугольным профилем изменения давления (фиг. 2, д). На верхнем луче ударная волна с  $\delta_1=4,1$  длительностью 1 мс (длина волны 0,5 м) ослабляется пористым экраном длиной 0,3 м до величины  $\delta_3=1,5$  (нижний луч). Из сравнения осциллограмм на фиг. 2, г, д, видно, что при длине пористого экрана, сравнимого с длиной волны, экран становится эффективным демпфером ударных волн.

Таким образом, проведенные опыты показали, что на границе раздела газ — пенополиуретан ударные волны отражаются с повышением давления, а на границе раздела пенополиуретан — газ ослабляются до величины меньшей, чем у исходного возмущения. Если длина экрана в несколько раз меньше длины волны, то практически все исходное давление передается за пористый образец. Из трех характерных размеров — размер ячейки, длина экрана и длина волны — целесообразно при оценке эффективности демпфирующего действия пористого образца сравнивать последние.

Аналогичные результаты по взаимодействию длинных ударных волн с границей раздела газ — пенополиуретан наблюдаются и для образца плотностью  $35 \text{ кг/м}^3$ . Однако в этом случае появляется фактор длины образца, который для образца плотностью  $20 \text{ кг/м}^3$  не имел заметного значения. Если в пенополиуретане ( $20 \text{ кг/м}^3$ ) длинные ударные волны распространяются практически без затухания на длине 0,8 м, то во втором случае на этой же длине обнаружено почти двукратное уменьшение перепада давления. Это уменьшение интенсивности волны не зависело от поперечного размера образца и может быть объяснено увеличением энергии, расходуемой на деформацию скелетных элементов, число которых значительно возросло.

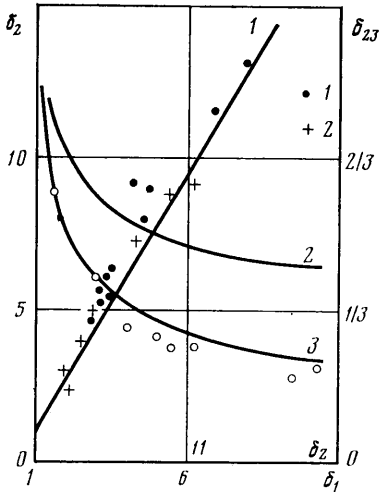
Затухание ударных волн в длинных образцах с повышенной плотностью влияет на картину взаимодействия ударных волн с экраном из пенополиуретана и открывает дополнительные возможности для гашения ударных волн, чего в случае для экранов, например, из водно-механических пен не наблюдается.

**2. Результаты расчетов.** Для описания наблюдаемых явлений на границах раздела воспользуемся моделью Рудингера [6], в которой двухфазная среда рассматривается как псевдогаз с показателем адиабаты  $\Gamma$  и ско-

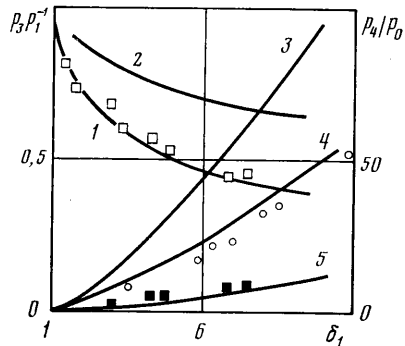
ростью звука  $a$ , соответственно равными

$$\Gamma = \frac{\gamma(1+\eta\delta)}{1+\gamma\eta\delta}, \quad a^2 = \frac{1'a_1^2}{\gamma(1+\eta)(1-\varepsilon_0)^2} \quad (2.1)$$

Здесь  $\delta = c c_1^{-1}$  — отношение теплоемкостей полиуретана ( $c=1200$  Дж/кг·Г) и газа  $c_1$ ,  $\eta = \sigma \sigma_1^{-1}$  — отношение массы пенополиуретана и газа в объеме;  $\gamma$ ,  $\varepsilon_0$ ,  $a_1$  — показатель адиабаты, объемная доля пенополиуретана в



Фиг. 3



Фиг. 4

пористом образце и скорость звука в газе. Связь между давлением и числом Маха на ударной волне  $M = Da^{-1}$ , где  $D$  — скорость ударной волны в двухфазной среде, имеет вид [6]

$$\delta_1 = \frac{2\Gamma M^2 - (\Gamma - 1)}{\Gamma + 1} = p_1 p_0^{-1} \quad (2.2)$$

Из соотношений (2.1), (2.2) находится скорость ударной волны в пенополиуретане.

Рассмотрим взаимодействие ударной волны с давлением на фронте  $p_1$  и скоростью  $D_0$  с первой границей раздела. Используя равенство давлений и скоростей на контактном разрыве, для падающей отраженной и прошедшей в образец ударных волн, выпишем соотношения

$$\begin{aligned} p_1 - p_0 &= \rho_0 D_0 u_0, & p_2 - p_1 &= \rho_1 (D_2 + u_0) (u_2 - u_0) \\ \delta_2 &= p_2 p_0^{-1}, & p_2 - p_0 &= m_0 D u_2 \end{aligned} \quad (2.3)$$

Здесь  $u_0$ ,  $u_2$  — скорости среды в воздухе и пенополиуретане;  $\rho_0$ ,  $\rho_1$  — плотности газа перед и за падающей ударной волной;  $D_2$  — скорость отраженной волны,  $m_0$  — плотность образца. Величины  $D_0$ ,  $\rho_1$ ,  $D_2$ ,  $u_0$  находятся по известным газодинамическим соотношениям на фронте волны. Из приведенных соотношений несложно рассчитать зависимость  $\delta_2$  от  $\delta_1$ . Эта зависимость на фиг. 3 представлена линией 1 при  $m_0 = 20$  кг/м<sup>3</sup> и  $\Gamma = \gamma = 1,4$  (между фазами нет теплообмена). Точки 1 относятся к  $m_0 = 20$  кг/м<sup>3</sup>, а точки 2 — к  $m_0 = 35$  кг/м<sup>3</sup>. Увеличение плотности от 20 до 35 кг/м<sup>3</sup> не привело к заметному изменению давления в преломленной волне.

В работе [3] отмечено несколько большее давление за отраженной волной на передней границе, что связано с подпрессовкой образца при установке в трубу. Впоследствии были приняты меры для устранения этого эффекта.

Если на границе раздела газ — пенополиуретан наблюдается рост давления от  $p_1$  до  $p_2$ , то на границе раздела пенополиуретан — газ волна ослаб-

ляется от  $p_2$  до  $p_3$ , причем  $p_3 < p_1$ . Здесь использование модели [6] оправдано тем, что в образце с плотностью  $20 \text{ кг/м}^3$  и меньше проходящие длинные ударные волны не затухают. В пористый образец идет волна разрежения с давлением  $p_3$  и скоростью  $u_3$ , находимыми из выражения

$$p_3 = p_2 [1 - 0,5(u_3 - u_2) a^{-1} (1 - \epsilon_0)^{-1}] \quad (2.4)$$

Для расчета давления  $p_3$  в волне за экраном к (2.4) и (2.3) необходимо добавить выражение

$$p_3 - p_0 = \rho_0 D_3 u_3$$

Здесь  $D_3$  — скорость прошедшей за экран волны.

Связь интенсивности падающей на границу образец — газ волны  $\delta_2$  и отношения  $\delta_{23} = p_3 p_2^{-1}$  представлена на фиг. 3. Кривые 2, 3 построены для  $m_0 = 5$  и  $20 \text{ кг/м}^3$  соответственно. С уменьшением  $m_0$  (кривая 2) давление в волне за экраном возрастает из-за сближения акустических сопротивлений пенополиуретана и газа. Сравнение экспериментальных результатов с расчетными кривыми показывает их хорошее соответствие и констатирует применимость модели [6] для описания параметров ударных волн в пенополиуретане. Однако приведенные на фиг. 3 расчетные кривые не дают полного ответа о степени демпфирования волн пористым экраном.

На фиг. 4 представлены расчетные кривые 1, 2, отражающие влияние  $m_0$ ,  $\delta_1$  на коэффициент ослабления  $p_3 p_1^{-1}$ . Кривые 1, 2 построены для  $m_0 = 20$  и  $5 \text{ кг/м}^3$  соответственно. С уменьшением  $m_0$  и интенсивности падающей волны коэффициент ослабления возрастает. В предельном случае при  $\delta_1 = 1$  пористый экран практически не оказывает никакого воздействия на ударную волну. При возрастании  $\delta_1$  коэффициент ослабления первоначально резко убывает, но начиная с  $\delta_1 = 8$  практически не зависит от интенсивности падающей волны.

Рассмотренное влияние пористого экрана на параметры ударных волн не отвечает на вопрос об оптимальном расположении экрана относительно жесткой стенки. На фиг. 4 представлены расчеты давления отражения на жесткой стенке  $p_4 p_0^{-1}$  от интенсивности падающей ударной волны  $\delta_1$ . Кривая 3 дает значение  $p_4$  для случая прилегания пористого образца ( $m_0 = 20 \text{ кг/м}^3$ ) к стенке. В этом случае воздушная волна с интенсивностью  $\delta_1$  сначала отражается на границе газ — пенополиуретан, а затем волна в блоке отражается на жесткой стенке. Кривая 4 показывает величину давления отражения на стенке, когда экрана нет. Повышение давления при отражении воздушной ударной волны с интенсивностью  $\delta_1$  совпадает с давлением при отражении волны, имеющей при движении в пористом образце интенсивность  $\delta_1$ , на преграде в случае прилегания пористого образца к жесткой стенке. Экспериментальные точки получены в трубе с закрытым торцом и совпадают с результатами [1]. Кривая 5 построена для случая, когда между пористым экраном ( $m_0 = 20 \text{ кг/м}^3$ ) и жесткой стенкой есть газовая прослойка (отодвинутый экран).

Расчет зависимости изображенной кривой 5 проводился следующим образом. На пористый экран падает воздушная ударная волна с интенсивностью  $\delta_1$ . За экран проходит ослабленная воздушная ударная волна с интенсивностью  $p_3 p_0^{-1}$ , соответствующей кривой 1 (фиг. 4). Давление отражения на жесткой стенке  $p_4 p_0^{-1}$  находится по известной теперь величине  $\delta_3$  и соотносится с  $\delta_1$ . Из сравнения 3—5 видно, что наименьшие значения  $p_4$  получены для пористого экрана, отодвинутого от жесткой преграды. Однако рассмотренные случаи не исчерпывают всех возможных ситуаций.

Рассмотрим влияние акустических сопротивлений пористого экрана ( $A_2$ ), жесткой стенки ( $A_3$ ) и воздушной прослойки ( $A_1$ ) и их взаимного расположения на давление отражения подробнее. Пусть  $A_2 < A_3$ , а между пористой средой и преградой воздушной прослойки нет. Тогда давление на стенке будет больше, чем в случае отсутствия пористой среды [7]. Схожая ситуация реализуется при  $A_1 < A_2 < A_3$  (кривые 3, 4 на фиг. 4), ко-

торая ранее рассмотрена в [8]. Если между пористым экраном и жесткой стенкой введена воздушная прослойка, то  $A_1 < A_2$  и  $A_1 < A_3$  и давление отражения снижается, что соответствует кривой 5 (фиг. 4).

Возможны случаи обратного соотношения между акустическими сопротивлениями сплошной и пористой среды  $A_1$  и  $A_2$ , как в [9], где  $A_1$  — акустическое сопротивление воды, а  $A_2$  — пузырьковой среды и  $A_1 > A_2$ . В [9] показано, что при  $A_1 > A_2$  и  $A_2 < A_3$  давление отражения такое же, как и в случае отсутствия пузырьковой среды. Если между пузырьковым экраном и жесткой стенкой ввести водяную прослойку, то  $A_1 > A_2$  и  $A_1 < A_3$ , и давление отражения будет выше, чем в предыдущем случае. Хотя случай присутствия водяной прослойки подробно не анализировался, но косвенное подтверждение этого вывода можно найти в [9].

Таким образом, результаты приведенных опытов и данные работ [7–9] показывают, что взаимное соотношение акустических сопротивлений пористой и сплошной сред имеет принципиальное значение для определения величины давления, возникающего при отражении волн на преграде. От соотношения акустических сопротивлений пористой прослойки газовой и сплошной среды зависит также и величина передаваемого в сплошную среду потока энергии [10].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Borisov A. A., Gelfand B. E. et al.* Shock waves in water foams. — *Acta Astronautica*, 1978, v. 5, № 11–12, p. 1027–1033.
2. *Wienfield F. H., Hill D. A.* Preliminary results on the physical properties of a gaseous foam and their attenuating characteristics. DRES, TN-389, 1977.
3. *Гельфанд Б. Е., Губин С. А., Когарко С. М., Попов О. Е.* Исследование особенностей распространения и отражения волн давления в пористой среде. — *ПМТФ*, 1975, № 6, с. 74–77.
4. *Гельфанд Б. Е., Губанов А. В., Тимофеев Е. И.* Особенности распространения ударных волн в пенах. — *Физика горения и взрыва*, 1981, т. 17, № 4, с. 129–136.
5. *Morioka S., Matsui G.* Pressure-wave propagation through a separated gas-liquid layer in a duct. — *J. Fluid Mech.*, 1975, v. 70, № 4, p. 721–731.
6. *Рудингер Г.* Влияние конечного объема, занимаемого частицами, на динамику смеси газа и частиц. — *Ракетная техника и космонавтика*, 1965, т. 3, № 7, с. 3–10.
7. *Воскобойников И. М., Гогоуля М. Ф., Воскобойникова Н. Ф., Гельфанд Б. Е.* Возможная схема описания ударно-волнового сжатия пористых образцов. — *Докл. АН СССР*, 1977, т. 236, № 1, с. 75–78.
8. *Костюков Н. А.* Критерий усиления косо́й ударной волны с помощью слоя пористого вещества. — *Физика горения и взрыва*, 1980, т. 16, № 5, с. 78–80.
9. *Гельфанд Б. Е., Губин С. А., Когарко С. М., Тимофеев Е. И.* Прохождение ударных волн через границу раздела в двухфазных газожидкостных средах. — *Изв. АН СССР. МЖГ*, 1974, № 6, с. 58–66.
10. *Воскобойников И. М., Гельфанд Б. Е., Губин С. А., Когарко С. М., Попов О. Е.* Об использовании смеси жидкости с пузырьками газа для передачи ударно-волновых возмущений. — *Инж.-физ. ж.*, 1976, т. 31, № 4, с. 674–677.

Москва

Поступила в редакцию  
8.1.1982