

03;12

©1995 г.

## ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ УДАРНЫХ ВОЛН С ДВУХФАЗНЫМИ СРЕДАМИ ПЕНИСТОЙ СТРУКТУРЫ

*А.Б.Британ, И.Н.Зиновик, В.А.Левин, С.Ю.Митичкин,  
В.Г.Тестов, Ху Хайбо*

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова  
Институт механики,  
119899, Москва, Россия  
(Поступило в Редакцию 11 июля 1994 г.  
В окончательной редакции 30 января 1995 г.)

Приведены результаты исследований взаимодействия падающей ударной волны в воздухе с газожидкостной пеной. Изучены особенности поведения давления в первичной волне, отраженной от границы раздела воздух-пена, проходящей волне и волне, отраженной от торцевой стенки канала. Рассмотрено влияние плотности пены, скорости падающей ударной волны на изменение давления в упомянутых компрессионных волнах. Проводится сравнение с результатами исследований, выполненных с пористыми упругими и слабосжимаемыми материалами.

### Введение

Экспериментальные исследования взаимодействия ударных волн с двухфазными средами пенистой структуры типа газожидкостных пен, упругих (пенополиуретан) и слабосжимаемых (пенопласт) пористых материалов указывают на ряд особенностей ударно-волновых процессов, присущих названным средам [1-3]. Исследования проводились как с горизонтальным [4-6], так и вертикальным [5,7] расположением ударной трубы при изменении плотности сред  $\rho$  в пределах от 2 до 50 кг/м<sup>3</sup> и скоростях распространения ударной волны в исследуемой среде меньше 1 км/с. Заполнение канала ударной трубы пеной проводилось полностью или частично. В последнем случае пена располагалась непосредственно или с воздушным промежутком у торца. При описании экспериментов в газожидкостных пенах редко приводятся сведения о пенообразующих растворах и структурных характеристиках пены. Это вызывает затруднения при сопоставлении результатов, полученных в различных экспериментальных группах. Изменение свойств пены, обусловленное перераспределением и вытеканием

жидкости (процесс синерезиса), как правило, не учитывается. Так, в работе [8] по измерениям давления на торце горизонтальной ударной трубы (УТ) выявлены существенное изменение профиля давления по высоте пенного столба и искажение фронта ударной волны (УВ). В верхней части столба пены время опережения прихода фронта УВ по сравнению с основанием составило порядка 90 мкс, что указывает на наклон фронта. Таким образом, наличие градиента плотности в плоскости, перпендикулярной направлению распространения УВ, может влиять на ее форму и свойства. Однако детальные исследования в такой конфигурации УТ затруднены из-за необходимости размещения значительного количества датчиков давления как вдоль канала, так и в поперечных сечениях. При исследованиях на вертикальной УТ градиент плотности пены изменяется в направлении распространения УВ.

Представляет интерес выявить общие и отличительные особенности процессов распространения УВ, присущие, с одной стороны, газожидкостным пенам, а с другой стороны, средам из упругих и слабосжимаемых пористых материалов. Чаще в экспериментах моделируют условия, возникающие за взрывными волнами, когда профиль давления близок к треугольному. Ударные волны с продолжительной фазой сжатия имеют свои особенности взаимодействия с пеной. В данной работе внимание уделялось изучению особенностей газодинамических процессов, возникающих при падении ударной волны с продолжительной фазой сжатия, сформированной в воздухе, на вертикальный столб газожидкостной пены. Полученные результаты сравниваются с экспериментальными данными в газожидкостных пенах и в пористых материалах. Расчет параметров за ударными волнами проводился в приближении, когда двухфазная среда рассматривалась как псевдогаз [9,10] с эффективным показателем ударной адиабаты.

### Измерительный стенд и методика эксперимента

Исследования проводились на вертикальной ударной трубе с внутренним диаметром 50 мм. Канал длиной  $L = 144$  см, изготовленный из полированного плексигласа, наполнялся пеной низкой, средней и высокой ( $4, 32$  и  $50 \text{ кг/м}^3$ ) плотностями  $\rho$  при объемном газосодержании  $\alpha$  0.997, 0.967 и 0.96 соответственно. Для указанных пен высота столба пены  $h$  составляла 400, 190 и 310 мм (рис. 1,а). Камера высокого давления длиной  $l = 80$  см того же диаметра размещалась над каналом и была выполнена из нержавеющей стали. Пена приготавливалась методом барботажа воздуха с избыточным давлением  $3-4 \cdot 10^4$  Па, устанавливаемым ступенчато. Воздух продувался через пористый фильтр, размещенный в 3%-м водном растворе поверхностно-активного вещества. Заполнение трубы пеной осуществлялось через отверстие диаметром 5 мм, расположенное на расстоянии 30 мм от торцевой стенки канала. Скорость наполнения составляла 10–15 мл/с. Промежуток времени между окончанием напуска пены и разрывом диафрагмы составлял  $\approx 2$  мин. Начальное давление воздуха в канале  $p_1 = 1$  атм. Для изучения волновых возмущений, возникающих при взаимодействии ударной волны с пеной, и измерения скоростей их распространения использовались малогабаритные пьезокерамические датчики давления Сунцова, установленные на боковой и торцевой стенках канала ударной

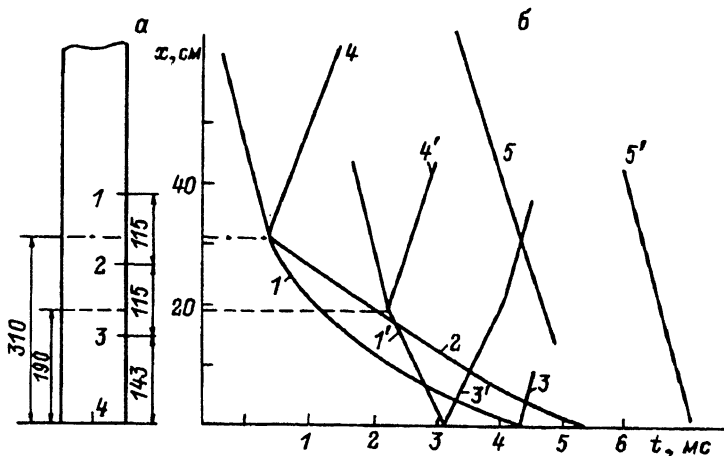


Рис. 1. Расположение датчиков в ударной трубе (а) и волновые диаграммы течения (б).

а: 1-4 — датчики давления; б: 1, 1' — траектория движения лидирующего скачка; 2 — траектория движения точки, соответствующей концу релаксационной зоны; 3, 3', 4, 4' — траектории волн, отраженных от торцевой стенки канала и границы раздела воздух-пена соответственно; 5, 5' — траектория головы волны разрежения, отраженной от торца камеры; штрихпунктир и штриховая линия — граница пены для  $\rho = 50$  и  $32 \text{ кг/м}^3$  соответственно; 1', 3'-5' —  $\rho = 50$ , 1'-5' —  $32 \text{ кг/м}^3$ .

трубы. На рис. 1, а представлены размещение датчиков и положение границы раздела воздух-пена. Сигналы с датчиков через истоковые повторители подавались на вход запоминающих цифровых осциллографов С9-8, выходы которых через интерфейс были связаны с персональным компьютером IBM PC/AT/286. Диафрагмой, разделяющей камеру и канал, служила лавсановая пленка толщиной 20 мкм. Регулировка давления осуществлялась установкой сэндвича из двух и трех пленок, что позволило перекрыть диапазон чисел Маха падающей волны  $M_i = 1.07-1.45$ . Измерения давления проводились в УВ, падающей в воздухе, в отраженной от границы воздух-пена, в проходящей в пену и отраженной от торцевой стенки канала. Проходящая волна имела двухфронтную конфигурацию профиля давления, так как скорость ее распространения  $V_i < a_1$  ( $a_1$  — скорость звука в газе, заполняющем ячейки пены).

## Результаты исследований

а) Течение вверх по потоку от границы в воздух-пена. Вследствие разрыва параметров на границе раздела воздух-пена за счет изменения скорости звука и плотности при достижении падающей ударной волной с давлением за фронтом  $P_2$  границы, на которой для акустического сопротивления  $\rho a$  ( $a$  — скорость звука) выполняется условие  $(\rho_{g1} a_{g1}) < (\rho_{f1} a_{f1})$ , от границы раздела в воздух с начальным акустическим сопротивлением  $\rho_{g1} a_{g1}$  отразится ударная волна с давлением  $P_3$  [11], которую в дальнейшем будем называть первичной отраженной волной. В пену с акустическим сопротивлением  $\rho_{f1} a_{f1}$  пройдет проходящая волна. Регистрация первичной

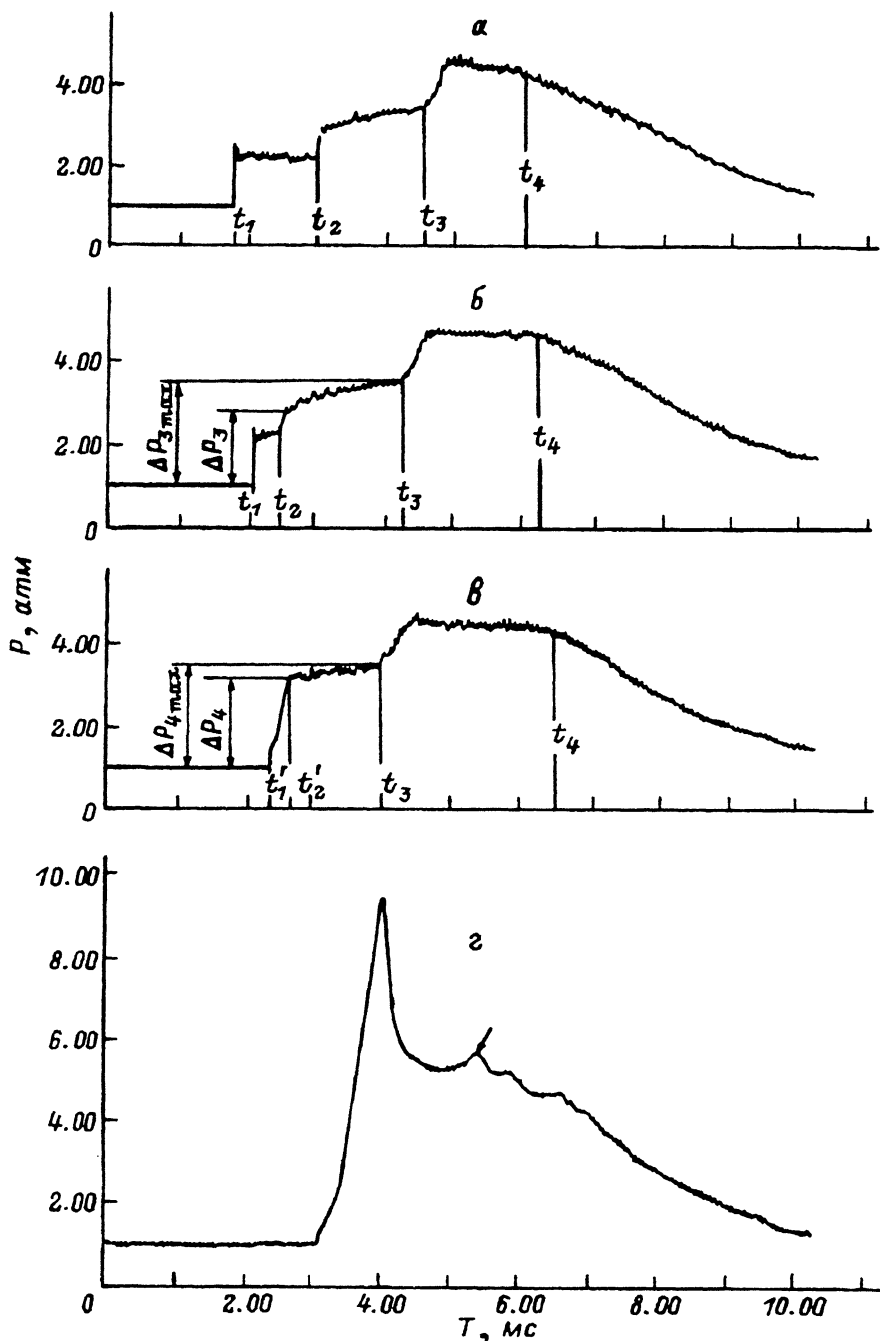


Рис. 2. Осциллограммы давления.

a-г — для датчиков 1-4,  $t_1$  и  $t_2$  — времена прихода падающей, первичной отраженной волн к датчикам 1 и 2;  $t'_1$  и  $t'_2$  — времена прихода лидирующего скачка и окончания релаксационной зоны, измеренные датчиком 3;  $t_3$  и  $t_4$  — времена прихода отраженных волн сжатия от торца канала и головы волны разрежения от торца камеры к датчикам 1-3.

отраженной волны проводилась датчиками, вмонтированными в боковую стенку на расстояниях 258 и 373 мм от торца канала при высоте столба пены средней плотности 190 мм. На рис. 2 представлены записи давлений. Как видно, крутизна фронта отраженной волны возрастала с удалением от границы, а длительность фронта изменялась от 150 до 50 мкс. Для пены с высокой плотностью высота столба пены составляла 310 мм, эта волна регистрировалась только одним датчиком 1, размещенным на расстоянии 373 мм от торца канала. Фронт скачка был практически вертикальным. В случае же пены низкой плотности ( $\rho = 2 \text{ кг/м}^3$ ) [8] фронт был пологий и длительность его составляла  $\approx 500$  мкс, что указывает на компрессионный характер волны.

Повышение крутизны фронта по мере распространения первичной отраженной волны вверх по потоку наблюдалось также в экспериментах с упругими пористыми материалами (полиэтер, полиэстер) [2]. Конечная длительность скачка обусловлена возникновением веера волн сжатия за счет смещения границы раздела и проникновения в исследуемую среду толкающего газа. Здесь толкающим является газ за фронтом первичной отраженной волны.

Повышение крутизны фронта в направлении вверх по потоку связано с общими свойствами римановской волны сжатия. За фронтом волны наблюдается более медленное плавное нарастание давления, обусловленной взаимодействием проходящей ударной волны, распространяющейся вниз по потоку, со средой с нарастающей плотностью, а следовательно, и с увеличивающимся акустическим сопротивлением. Это приводит к возникновению непрерывного отражения веера волн сжатия. Изменения давления на фронте  $\Delta P_3$  и максимального значения  $\Delta P_{3 \max}$  (рис. 2, б) в первичной отраженной волне в зависимости от скорости падающей ударной волны представлены на рис. 3. Следует отметить, что с увеличением числа Маха  $M_i$  возрастает как величина давления  $\Delta P_3$  и  $\Delta P_{3 \max}$ , так и приращение давления за фронтом  $\Delta P_{3 \max} - \Delta P_3$ . С повышением плотности пены до  $50 \text{ кг/м}^3$  названные параметры возрастали. В экспериментах с пеной низкой плотности на

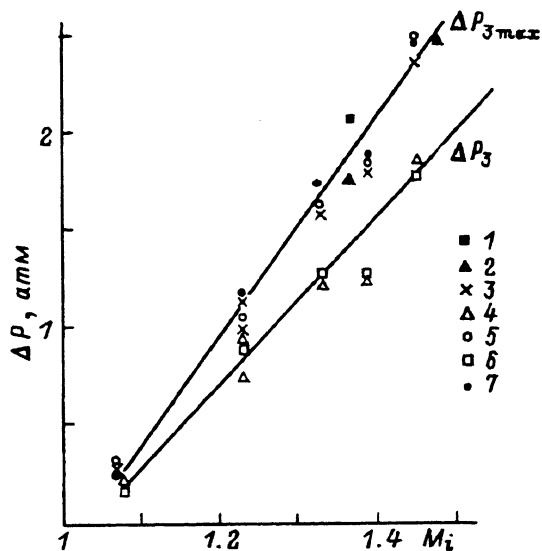


Рис. 3. Приращение давления в первичной отраженной и проходящей волнах.

1-4 — датчик 1; 5, 6 — датчик 2;  
7 — датчик 3; 1, 2 —  $\rho = 50$ ,  
3-7 —  $32 \text{ кг/м}^3$ ; 2, 4, 6 —  $\Delta P_3$ ;  
1, 3, 5 —  $\Delta P_{3 \max}$ ; 7 —  $\Delta P_{4 \max}$ .

горизонтальной ударной трубе [8], как и в случае пористых упругих материалов [2], повышение давления за фронтом первичной отраженной волны не наблюдалось.

Измерение скорости распространения первичной отраженной волны показало ее уменьшение с увеличением интенсивности падающей волны. В случае пены низкой плотности [8] скорость падала с 90 до 40 м/с, а для исследуемой нами пены уменьшение составляло от 300 до 200 м/с (рис. 4, а). Это уменьшение, по-видимому, связано с возрастанием сноса пены с увеличением числа Маха  $M_i$ . При этом с возрастанием плотности скорость первичной отраженной волны  $V_{r1}$  возрастает. Для обоих датчиков, размещенных вне пены, сохраняется постоянство времени прихода первичной отраженной волны, отсчитанного от времени прихода падающей (рис. 4, б), что обусловлено уменьшением скорости  $V_{r1}$  при возрастании  $V_i$  (рис. 4, а). Для пористых упругих материалов в диапазоне чисел Маха  $M_i = 1.2-1.35$  отмечалось постоянство времени  $t_{r1} + t_i$  [2], где  $t_i$  — время распространения падающей волны от датчика до границы раздела,  $t_{r1}$  — время распространения отраженной волны от границы раздела до датчика. Отметим, что в отличие от измерений в пористых упругих материалах [2] давление в первичной отраженной волне было несколько ниже, чем в проходящей, что обусловлено конечным временем распространения компрессионных волн, возникающих при взаимодействии проходящей волны со средой, имеющей нарастающее акустическое сопротивление в направлении распространения. При этом часть возмущений, которые возникают ниже датчика, размещенного в пене, не достигает датчиков 1 и 2, так как вторичная отраженная волна распространяется с большей скоростью, обгоняя их. На рис. 1, б для  $M_i = 1.39$  представлены волновые диаграммы течения в ударной трубе для пен с плотностью 50 ( $M_i = 1.3$ ) и 32 кг/м<sup>3</sup> ( $M_i = 1.39$ ) ( $x$  — координата вдоль оси ударной трубы;  $t$  — время, отсчитанное от запускающего датчика). Временное смещение диаграмм связано с запуском регистрирующей аппаратуры от различных датчиков.

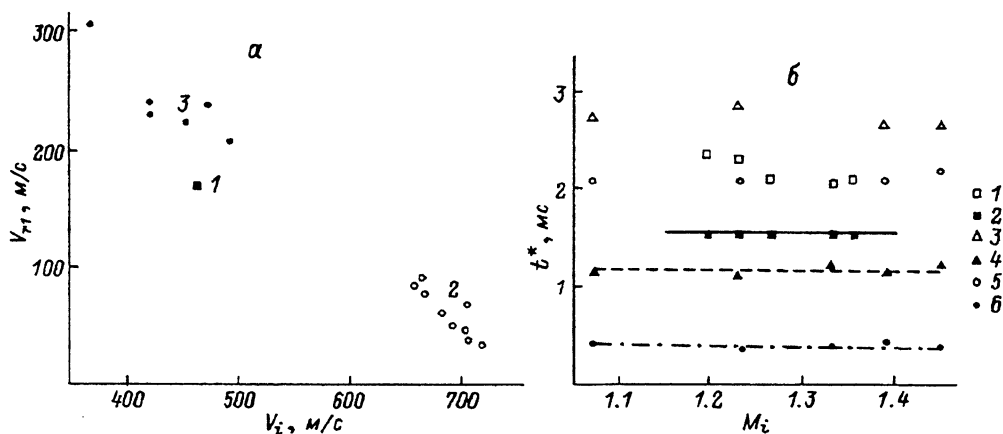


Рис. 4. Зависимость скорости первичной отраженной волны  $V_{r1}$  от скорости падающей ударной волны  $V_i$  (1, 2 — данные настоящей работы) (а) и время  $t^*$  прихода отраженной волны к датчикам, отсчитанного относительно прихода падающей волны: 1, 2 — [2]; 3, 4 — датчик 1; 5, 6 — датчик 2; 1, 3, 6 — вторичная отраженная волна; 2, 4, 6 — первичная отраженная волна (б).

б) Распространение проходящей волны в пене. Изучение особенностей распространения волны, проходящей в пену, проводилось по регистрации давления датчиками, расположенными в пене. Во всем диапазоне чисел Маха вначале регистрировался лидирующий скачок, амплитуда которого уменьшалась с ростом плотности. Если в случае пены низкой плотности ( $4 \text{ кг/м}^3$ ) амплитуда лидирующего скачка составляла 0.7 от стационарного значения, то при повышении плотности с 32 до  $50 \text{ кг/м}^3$  амплитуда снижалась с 0.4 до 0.15 по отношению к давлению непосредственно за зоной релаксации. Оценка скорости распространения лидирующего скачка  $V_{l_1}$  показала, что скорость его падает с увеличением плотности пены (рис. 1,б). В экспериментах с пенами средней плотности при  $M_i > 1.2$  за лидирующим скачком отмечается релаксационная зона (рис. 2,в), в которой при увеличении интенсивности падающей волны ( $M_i > 1.39$ ) прослеживаются характерные области. В первой, непосредственно за лидирующим скачком, скорость нарастания давления ниже, чем во второй. Общая протяженность релаксационной зоны составила  $\approx 300 \text{ мкс}$  ( $M_i = 1.39$ ). В плотной пене при тех же интенсивностях падающей ударной волны также наблюдаются две области в зоне релаксации. Однако примерно на равном расстоянии от границы воздух-пена в случае плотной пены скорость нарастания давления меньше, а длительность релаксационной зоны почти в два раза больше. При этом наличие двух областей в релаксационной зоне прослеживается при более низких интенсивностях падающей ударной волны. В пене низкой плотности ( $2 \text{ кг/м}^3$ ) время релаксации составляет  $\approx 100 \text{ мкс}$  [8].

Эксперименты показали, что время релаксации возрастает как с плотностью, так и с удалением вниз по потоку от границы воздух-пена. За релаксационной зоной продолжается плавное нарастание давления вплоть до прихода отраженной от торца канала волны, обусловленное распространением вверх по потоку волн сжатия, которые непрерывно рождаются за счет нарастания плотности вниз по потоку к торцу. Скорость распространения волны в области непосредственно за релаксационной зоной (момент времени  $t'_2$  на рис. 2,в) с возрастанием числа Маха  $M_i$  от 1.23 до 1.45 увеличивалась с 80 до  $110 \text{ м/с}$ .

На рис. 5 представлены приращения давления в проходящей волне  $\Delta P_{4 \max} = P_{4 \max} - P_1$ . Отметим, что в пенах средней и высокой плотности в проходящей волне имеет место увеличение давления. Величина приращения давления в наших измерениях  $\Delta P_{4 \max} < 3 \text{ атм}$  отвечала условиям отсутствия расщепления фронта волны [12], подтверждавшегося осциллограммами давления (рис. 2,в). Представляет интерес сопоставить результаты исследований в газожидкостных пенах с данными, полученными в пористых упругих материалах [2]. В [2] в образцах равной протяженности (190 мм) и в два раза меньшей плотности датчик, расположенный на расстоянии 70 мм от границы раздела, фиксировал отсутствие лидирующего скачка. Отмечалось медленное возрастание давления, обусловленное пакетом волн сжатия. Спустя 1 мс оно достигало стационарного значения  $P_4$ , равного давлению за первичной отраженной волной  $P_3$ , что соответствовало моменту времени прохождения датчика границей раздела. Скорость движения границы воздух-пористый упругий материал ( $V_f = 70 \text{ м/с}$ ) для того же  $M_i$  была ниже, чем в случае газожидкостной пены, что связано с большей сжимаемостью последних.

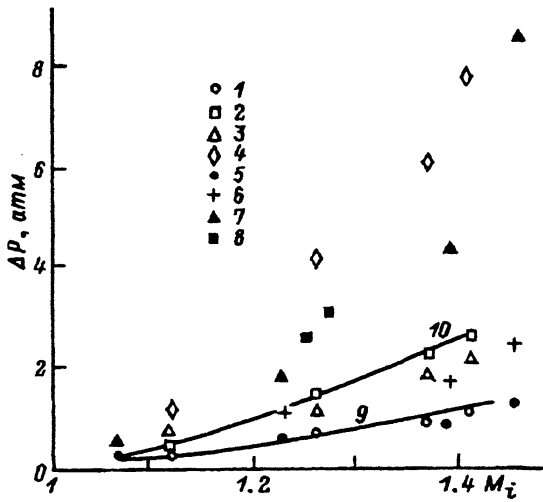


Рис. 5. Давления  $\Delta P$  в падающей  $\Delta P_2$ , проходящей  $\Delta P_{4\max}$  и отраженной от торца канала  $\Delta P_{5\max}$  волнах.  
 1, 2 —  $\rho = 4$ ; 3, 4 — 50; 6, 7 — 32 кг/м<sup>3</sup>;  
 1, 5 — падающая ударная волна; 3, 6 — проходящая волна, 2, 4 и 7 — отраженная волна; 8 —  $\Delta P_{5\max}$  [2], 9 и 10 — расчетные давления за падающей и отраженной волнами в воздухе;  $h = 400$  (1, 2), 310 (3, 4), 190 мм (5-7).

в) Распространение вторичной отраженной волны. В газожидкостной пене датчик, размещенный на торце канала (рис. 2,з), вначале фиксирует поведение давления, аналогичное изменению давления в проходящей волне (рис. 2,в). Характерные особенности поведения давления на торце в газожидкостной пене в случае пористых упругих материалов наблюдаются в образцах существенно меньшей длины. При уменьшении длины образца  $h$  до 120 и 50 мм [2] торцевой датчик регистрировал лидирующий скачок, амплитуда которого возрастала для заданной плотности с уменьшением протяженности образца. Как и в случае газожидкостной пены, повышение плотности сопровождалось уменьшением амплитуды лидирующего скачка и его исчезновением при  $\rho > 30$  кг/м<sup>3</sup>. Для случая практически одинаковых плотностей и интенсивностей падающей ударной волны амплитуда лидирующего скачка в газожидкостной пене, несмотря на большее значение  $h$ , существенно выше. Влияние роста плотности аналогично влиянию увеличения длины образца. В обоих типах сред скорость распространения лидирующего скачка и поверхности раздела была меньше скорости звука в газе пузырьков пены, а скорость лидирующего скачка уменьшалась с ростом  $M_i$ . Регистрация лидирующего скачка позволила оценить среднюю скорость его распространения вниз по потоку в области между датчиком 3 и торцом. Скорость нарастания давления на торце сохраняется постоянной в течение достаточно продолжительного времени. Время нарастания давления до максимального значения примерно в три раза превышает длительность релаксационной зоны проходящей волны. Длительность переднего фронта возрастала с уменьшением  $M_i$ , при этом возрастала и протяженность области максимального давления. Давление в максимуме существенно превышает значение, соответствующее случаю отражения в воздухе, что является характерным для описанных типов пористых сред. На рис. 5 показано приращение давления во вторичной отраженной волне  $\Delta P_5 = P_5 - P_1$ .

Представляет интерес сопоставить максимальное значение давления на торцевой стенке канала в газожидкостной пене с соответствующими значениями для упругого пористого материала [2], полученными в близких условиях. В [3] отмечалось, что максимальное да-



вление при отражении протяженной ударной волны от торцевой стенки канала, покрытого упругим пористым материалом, обнаруживает рост с увеличением длины образца  $h$ . При достижении  $h$  некоторого критического значения  $h_{кр}$  максимальное значение стабилизируется на постоянном уровне. Значение  $h_{кр}$  определяется скоростью волны сжатия, реализованной в данном эксперименте. При этом чем выше скорость волны сжатия, тем выше  $h_{кр}$  [13]. Данные [2] для экспериментов с пористыми упругими материалами позволяют предположить, что при  $\rho = 35-38 \text{ кг/м}^3$ ,  $M_i = 1.25-1.27$ ,  $h = 50 \text{ мм} > h_{кр}$ , так как  $h_{кр}$  ( $\rho = 14.8 \text{ кг/м}^3$ )  $< 50 \text{ мм}$  и скорость головы волны сжатия для пены с  $\rho = 14.8 \text{ кг/м}^3$  больше, чем для пены с плотностью  $35-38 \text{ кг/м}^3$ . Поэтому максимальные давления на торце канала при  $h = 50$  и  $190 \text{ мм}$  будут одинаковы. Указанные величины максимальных давлений (рис. 5) несколько выше соответствующих значений для газожидкостной пены в близких условиях ( $\rho = 32 \text{ кг/м}^3$ ). При этом время нарастания давления до максимального значения в газожидкостной пене больше по сравнению с пористым упругим материалом. Подобное различие особенностей поведения давления на торце канала, покрытого пористыми упругими материалами с открытой и закрытой структурами, отмечено в [14]. Так как в газожидкостной пене при действии ударной волны пленки достаточно быстро разрушаются, то структура образующейся среды близка к структуре пористого упругого материала с открытыми порами.

При достижении отраженной от торца канала волной сжатия границы раздела пена-воздух, так как акустическое сопротивление воздуха за падающей УВ  $\rho_{g2}a_{g2}$  меньше акустического сопротивления  $\rho_{g5}a_{g5}$  среды за волной, отраженной в пену от торца канала, в среду с акустическим сопротивлением  $\rho_{g2}a_{g2}$  пройдет ударная волна, а в среду с сопротивлением  $\rho_{f5}a_{f5}$  отразится волна разрежения. После достижения максимума давления на торце в волне разрежения происходит спад давления до значения, несколько превышающего значение  $P_{5в}$ , соответствующее отражению в воздухе от жесткой стенки (при отсутствии исследуемой среды). Волна разрежения, отразившись от торца канала и преломляясь далее на границе раздела пена-воздух, приводит к образованию слабой волны сжатия, движущейся в сторону торца (отмечена стрелкой на рис. 2, г).

В случае жестких пенообразных материалов (пенопласт) из-за многократных переотражений на границах раздела пена-воздух и жесткая стенка канала регистрируется осциллирующее поведение давления торцевым датчиком [3]. В наших экспериментах после слабой волны сжатия следует спад, связанный с приходом волны разрежения от торца камеры (рис. 2). Интенсивность вторичной ударной волны в области размещения датчиков 1-3 меньше, чем на торцевой стенке, и равна  $P_{5в}$ , пик давления практически отсутствует (рис. 2, а-в).

## Заключение

1. Крутизна фронта первичной отраженной волны возрастает как с увеличением плотности двухфазной среды, так и с удалением от границы раздела вверх по потоку. При увеличении скорости падающей ударной волны и уменьшении плотности пены скорость первичной отраженной волны падает.

2. Амплитуда лидирующего скачка уменьшается с ростом плотности среды. При одинаковой плотности газожидкостной пены и пористого упругого материала амплитуда лидирующего скачка в последнем меньше. Непосредственно за лидирующим скачком располагается релаксационная зона, длительность которой возрастает вниз по потоку, а также с увеличением плотности.

3. За фронтом первичной отраженной волны и за релаксационной зоной в проходящей волне для газожидкостной пены имеет место плавное нарастание давления вплоть до прихода вторичной отраженной от торца канала волны, обусловленной распространением вверх по потоку волн сжатия, которые возникают вследствие движения проходящей волны по среде с нарастающей в направлении распространения волны плотностью.

4. Давление на торце канала носило экстремальный характер, амплитуда которого существенно превышает значение давления, соответствующее отражению от торца в воздухе  $P_{5в}$  в отсутствие исследуемой среды при той же интенсивности падающей волны. Если в случае газожидкостных пен давление со временем падает до давления несколько превышающего  $P_{5в}$ , то в случае пористых сред давление носит осциллирующий характер. Амплитуда и частота осцилляций растет с уменьшением упругости пористой среды. Осцилляции связаны с многократными отражениями на границах образец-воздух и образец-жесткая стенка. Максимальные значения давления на торце канала для газожидкостных пен и упругих пористых материалов в близких условиях также близки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 93-01-17646).

#### Список литературы

- [1] Гельфанд В.Е., Губанов А.В., Тимофеев Е.И. // ФГВ. 1981. Т. 17. № 4. С. 129–136.
- [2] Skews B.W. // Shock Waves. 1991. Vol. 1. P. 205–211.
- [3] Геоздева Л.Г., Фаресов Ю.М. // Письма в ЖТФ. Т. 10. Вып. 19. С. 1153–1156.
- [4] Кудинов В.М., Гельфанд В.Е., Губанов А.В., Паламарчук Б.И. // Прикладная математика. 1977. Т. 13. № 3. С. 92–97.
- [5] Borisov A.A., Gelfand B.E., Kudinov V.M. et al. // Acta Astronautica. 1978. Vol. 5. P. 1027–1033.
- [6] Patz G., Smeets G. // Proc. 15<sup>th</sup> Intern. Symp. on Shock Tubes and Waves. Berkeley, 1985. P. 729–736.
- [7] Британ А.Б., Зиновик И.Н., Левин В.А. // ПМТФ. 1992. № 2. С. 27–32.
- [8] Weaver P.M., Pratt N.H. // Proc. 16<sup>th</sup> Intern. Symp. on Shock Tubes and Waves. Aachen, 1987. P. 363–369.
- [9] Сидоркина С.И. // ДАН СССР. 1957. Т. 112. № 3. С. 398–399.
- [10] Рудингер Г. // РТК. 1965. Т. 3. № 7. С. 3–10.
- [11] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. // Механика сплошных сред. М.: Гостехиздат, 1954.
- [12] Weaver P.M., Pratt N.H. // Proc. 17<sup>th</sup> Intern. Symp. on Shock Waves and Shock Tubes. New York, 1990. P. 819–824.
- [13] Ben-Dor G., Mazar G., Cederbaum G. et al. // Proc. 18<sup>th</sup> Intern. Symp. on Shock Waves. Sendai: Springer Verlag, 1991. P. 279–282.
- [14] Гельфанд В.Е., Губин С.А. // ПМТФ. 1975. № 6. С. 74–77.