

5. Когарко С. М., Адушкин В. В., Лямин А. Г. Исследование сферической детонации газовых смесей. — НТПГВ, 1965, № 2.
6. Balcerzak M. J., Johnson M. R. Use of detonable gas explosions for blast and shock studies. The shock and vibration bulletin. Bulletin 37, pt. 4, Jan. 1968.
7. Рихтмайер Р., Мортон К. Разностные методы решения краевых задач. М., «Мир», 1972.
8. Станюкович К. П. Неустановившиеся движения сплошной среды. М., «Наука», 1971.

УДК 532.593

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И ОТРАЖЕНИЯ ВОЛН ДАВЛЕНИЯ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

Б. Е. Гельфанд, С. А. Губин, С. М. Когарко,
О. Е. Попов
(Москва)

В связи с широким использованием пористых материалов в технике возникает необходимость в исследовании динамических процессов, протекающих в них. Основное отличие пористого вещества от сплошного конденсированного состоит в том, что конденсированная фаза занимает лишь часть объема пористой среды, что приводит к пониженной объемной плотности и большой степени сжимаемости. Особый интерес представляют пористые полимерные среды с малой плотностью порядка 20 кг/м^3 , в которых до 98% объема занимает газовая фаза. Такая плотность реализуется, если среда имеет ячеистую структуру пены, например, в полиуретановых пенопластах.

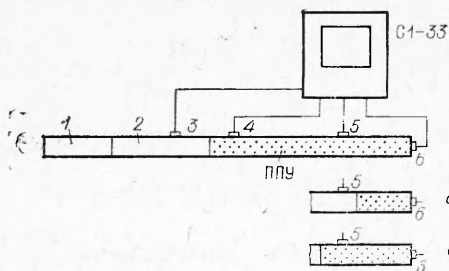
К настоящему времени известны лишь упругие свойства полиуретановых пенопластов при действии периодических [1] и ударных [2, 3] нагрузок. Вопросы образования волн давления в такой среде при преломлении в ней ударной волны из газа, структура распространяющейся по пенопласту волны, а также особенности ее отражения от границы раздела остаются невыясненными.

В описанных ниже экспериментах исследована структура волн давления с интенсивностями до 20 бар в эластичных пенополиуретанах (ППУ) с пористостью 0,98, а также определены особенности отражения таких волн от жесткой стенки.

1. Экспериментальная установка. Опыты по изучению структуры волн давления в пористой среде проводились на ударной трубе прямоугольного сечения $45 \times 30 \text{ мм}$, изображенной на фиг. 1. Камеры высокого давления (КВД) и низкого (КНД), обозначенные цифрами 1, 2, имеют длину соответственно 0,4 и 1,5 метра. Установка снабжена пьезоэлектрическими датчиками давления 3—6 с собственными частотами около 30 кГц.

Датчик 3 запускает развертку осциллографа, датчики 4, 5 фиксируют давление в проходящей волне, а датчик 6 — в отраженной волне. Показания датчиков регистрируются на пятилучевом осциллографе С1-33, причем сигналы датчиков 4, 5 подаются на каналы 1 и 2 (отсчет лучей снизу вверх), а 6 — одновременно на каналы 3—5 с различной чувствительностью.

В опытах изучалось движение волн в блоках ППУ длиной от 0,15 до



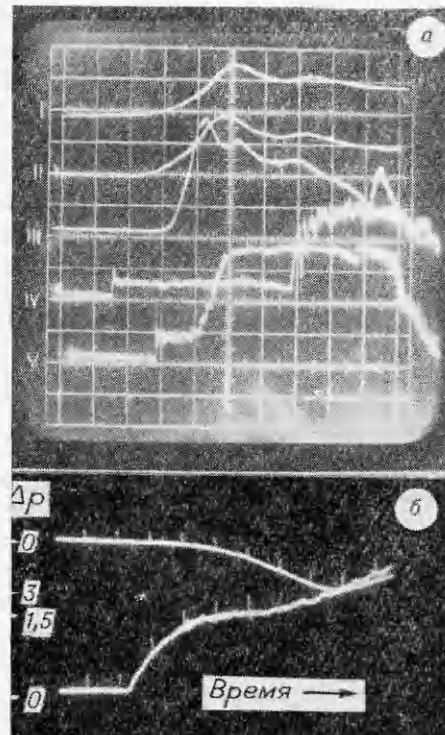
Ф и г. 1

0,6 м, вставленных в КНД ударной трубы. Волна давления в блоке ППУ генерировалась при отражении воздушной ударной волны на границе раздела пенопласт — воздух. Давление в волне задается давлением падающей ударной волны Δp_1 . Исследовалось движение волн с интенсивностью $\Delta p_2 = 1,5 - 20$ бар при начальном давлении газа $p_0 = 1$ бар. Основными измеряемыми параметрами волн были скорость распространения, давление в проходящих волнах, давление отражения волн на жесткой стенке и степень затухания волн в ППУ. В том же материале определялась и скорость звука. Для этого КНД полностью заполнялась исследуемым материалом, а затем разгружалась в вакуумированную КВД. Скорость звука определялась по движению головы волны разрежения в блоке ППУ и измерялась резонансным методом для колебаний с частотами до 1 кГц. При измерениях скорости звука, а также скорости распространения волн с амплитудами от 1,5 до 3 бар и отражения их от жесткой стенки использовался двухлучевой осциллограф ОК-24. Резонансные частоты определялись с помощью электронного частотомера ЧЗ-33.

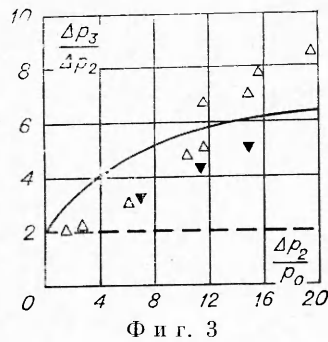
2. Результаты экспериментов. На фиг 2,а представлена осциллограмма показаний датчиков давления при отражении воздушной ударной волны с $M=2,0$ и амплитудой 19,6 бар от поверхности блока ППУ длиной 0,15 м. Масштаб времени на каналах 1, 2—300 мкс/деление, а масштабы давления — 7,5 и 11 бар/деление соответственно. За счет значительной разницы в акустических сопротивлениях воздуха $\rho_1 c_1 = 4,2 \cdot 10^2$ и пористой среды $\rho_2 c_2 = 4 \cdot 10^3$ кг/м²с при отражении возникает ударная волна, которая видна на осциллограмме как вторичная ступенька давления. Волна, преломившаяся в ППУ, затем отражается от закрытого торца трубы, что фиксирует датчик 6 на каналах 3—5. При масштабе давления 34,6 бар/деление масштабы времени на каналах 1—3 совпадают. На каналах 4, 5 тот же сигнал представлен с разверткой 100 мкс/деление и чувствительностью 60 и 80 бар/деление соответственно.

Эксперименты показали, что давление в волне в пористых средах в отличие от газообразных сред нарастает постепенно за времена порядка нескольких сотен микросекунд. Время нарастания оказывается тем больше, чем слабее волна давления. Эта особенность сохраняется и при отражении от стенки. На фиг. 2,б представлена осциллограмма отражения волны с амплитудой 1,5 бара от жесткой стенки. На нижнем луче зафиксирована падающая волна с начальной фазой отражения, измеренная датчиком, стоящим на расстоянии 0,1 м от стенки. На верхнем луче — давление, регистрируемое торцевым датчиком. Метки времени следуют через 300 мкс.

Измерение скорости волны в блоках материала длиной 0,6 м обнаруживает затухание волны, степень которого зависит от амплитуды. В частности, на длине 340 мм



Ф и г. 2



Ф и г. 3

скорость волны падает с 320 до 200 м/с при перепаде давления на фронте в 4 бара и с 380 до 280 м/с — в 12 бар. Подобное падение скорости намного превышает ошибку ее измерения, составляющую 4—5%.

Вместе со скоростью также уменьшается и давление за фронтом волны при ее движении по материалу. Степень затухания волн снижается при уменьшении их интенсивности. В частности, волна с $\Delta p_2/p_0=14$ затухает со скоростью 6, а с $\Delta p_2/p_0=7$ — 3 бар/м. Затухание волн слабее, чем $\Delta p_2/p_0=5$, находится в пределах ошибки измерения и не превышает 10% на длине 0,34 м.

Наибольший интерес представляют результаты измерения параметров отраженных волн. На фиг. 3 представлен график зависимости отношения давлений в отраженной волне Δp_3 к давлению в падающей Δp_2 от величины $\Delta p_2/p_0$. Установленная в опытах зависимость представлена светлыми треугольниками, сплошной линией показана степень повышения давления на стенке при нормальном отражении ударной волны в воздухе, рассчитанная по известной формуле Измайлова [4]. Та же зависимость для малосжимаемой среды типа воды показана штриховой линией.

Анализируя экспериментальные данные, можно сделать вывод о том, что сжимаемость исследованного эластичного пенополиуретана невелика лишь в области перепадов давлений до 2—3 бар: такие волны для этого материала будут слабыми. Скорость их мало отличается от скорости распространения звуковых колебаний, т. е. от величины $(2,0 \pm 0,1) \cdot 10^2$ м/с, а степень повышения давления при отражении (коэффициент отражения) ~ 2 . С ростом интенсивности падающей волны коэффициент отражения растет и, начиная с давлений ~ 12 бар, превышает его значение в газе.

Давление отражения для эластичного пенополиуретана заметно снижается в том случае, когда он имеет скелетную структуру, т. е. пленки-перегородки в ячейках материала удалены. Результаты измерений показаны темными треугольниками на фиг. 3.

Абсолютные значения давлений, выраженные в барах, достигаемые при нормальном отражении ударной волны от жесткой стенки, приведены в таблице для воздуха, воды и пенополиуретана, отличающихся плотностью и сжимаемостью; Δp_1 относится к ударной волне, распространяющейся по газовой среде и преломляющейся затем в более плотную среду; Δp_2 возникает при распаде разрыва и фактически равно давлению отражения волны в газе от жесткой стенки; Δp_2 в третьем столбце показывает, что в воде отражение от стенки происходит по акустическому закону. В последнем столбце приведены результаты измерений давления при отражении волн с давлением Δp_2 в ППУ.

Из таблицы видно, что замена сплошной среды на пористую приводит к значительному повышению давления отражения.

Возможность достижения высоких давлений при отражении ударной волны, распространяющейся по пористой пластмассе, от жесткой стенки, по-видимому, объясняется вовлечением твердой фазы пористой среды в движение за волной.

Δp_1	Δp_2	Δp_2 (вода)	Δp_2 (ППУ)
0,6	1,48	2,96	3,0
1,0	2,75	5,0	6,0
1,9	6,23	12,4	19
2,8	10,4	20,8	50
4,5	19,6	39,2	120

Это вовлечение минимально для слабых волн, а потому приводит к акустическому результату при отражении от жесткой стенки. Для сильных волн движение твердой фазы, в которой сосредоточена основная масса пористой среды, способствует повышению давления в отраженной волне по сравнению со случаем чистого газа. Факторы, обуславливающие снижение переносной скорости вещества, вызывают также и снижение давления за отраженной волной. Именно по этой причине снижается давление отражения при ликвидации пленок-перегородок в ячейках материала. Скелетная структура материала, уменьшая в значительной степени сопротивление газовому потоку, приводит к снижению переносной скорости в направлении движения волны и в конечном итоге к снижению давления отражения.

Поступила 20 IX 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. Мальцев К. И. Упругие свойства полужесткого полиуретанового пенопласта при малых деформациях.—«Акуст. журн.», 1967, т. 13, вып. 3.
2. Крячко В. М., Остроумов Г. А. Волны сжатия в порошкеласте.—«Акуст. журн.», 1967, т. 13, вып. 3.
3. Linde R., Seaman L., Schmidt D. Shock response of porous copper, iron, tungsten and polyurethane.—«J. Appl. Phys.», 1972, vol. 43, N 8.
4. Яковлев Ю. С. Гидродинамика взрыва. Л., Судпромгиз, 1964.

УДК 539.3

РАСЧЕТ ВЗРЫВА НА ВЫБРОС В ЛУЧЕВОМ ПРИБЛИЖЕНИИ

Н. А. Гужов, П. Ф. Коротков

(Москва) ~

Выведены уравнения, описывающие движение среды при взрыве на выброс в предположении, что среда является несжимаемой и движется в радиальном направлении от центра взрыва. При этом учтены касательные напряжения между движущимися слоями среды. Сравнение расчетов скоростей движения купола и размеров образовавшихся воронок показало удовлетворительное согласие как с модельными опытами по выбросу песка, так и с крупными взрывами на выброс.

1. Введение. Развитие взрыва на выброс в грунте и горной породе во времени можно представить в виде трех основных стадий [1,2]. Камуфлетная стадия продолжается от момента детонации заряда до выхода волны на дневную поверхность. Здесь движение среды близко к сферической симметрии. На второй стадии, начинающейся после отражения волны от свободной поверхности, происходит развитие купола. Эта стадия продолжается до момента прорыва газов из полости в атмосферу. После этого купол быстро разрушается, и в следующие моменты времени на третьей стадии происходит баллистический разлет мало связанных между собой частиц грунта.