

12. В. А. Khasainov, А. А. Borisov, В. С. Ermolaev. Eighth Intern. Colloquium on Gasdynamics of Explosions and Reactive Systems. Minsk, 1981.
13. А. В. Аттетков, Л. Н. Власова, В. В. Селиванов и др. ПМТФ, 1984, 2, 128.
14. А. А. Сулимов, А. В. Обменин, А. И. Коротков и др.— В кн.: Горение и взрыв. М.: Наука, 1972.
15. А. А. Сулимов, Б. С. Ермолаев.— В кн.: Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация. Черногоровка, 1977.
16. А. М. Лаптев. Порошковая металлургия, 1982, 7, 12.
17. А. А. Губайдуллин, А. И. Ивандаев, Р. И. Нигматулин и др.— В кн.: Итоги науки и техники. Сер. Механика жидкости и газа. Т. 17. ВИНТИ, 1982.
18. А. Я. Беляев, В. К. Боболев, А. И. Коротков и др. Переход горения конденсированных систем во взрыв. М.: Наука, 1973.
19. В. С. Соловьев, А. В. Аттетков, В. А. Пырьев.— В кн.: Детонация. Вып. 2. Черногоровка, 1981.
20. И. Ф. Кобылкин. Иницирование химической реакции в высокоплотных зарядах ВВ слабыми ударными волнами. ВИНТИ, № 3948—80 Деп.
21. P. Howe, R. Frey, V. Taylor e. a. Sixth Symp. (Intern.) on Detonation. San-Diego, 1976.
22. V. M. Boyle, D. L. Pilarski. Seventh Symp. (Intern.) on Detonation. Annapolis, Maryland, 1981.
23. С. З. Дунин, В. В. Сурков. ПМТФ, 1982, 4, 131.
24. R. I. Walker, F. E. Wasley. Explosivstoffe, 1969, 17, 1, 19.
25. М. Я. Васильев.— В кн.: Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация. Черногоровка, 1980.
26. В. В. Сильвестров. ФГВ, 1977, 13, 3, 420.
27. R. H. Stresau, J. E. Kennedy. Sixth Symp. (Intern.) on Detonation. San-Diego, 1976.
28. А. Э. Аверсон, В. В. Барзыкин, А. Г. Мержанов. Докл. АН СССР, 1968, 178, 1, 131.
29. H. H. Ide, E. Haenseler, K.—И. Swart. Explosivstoffe, 1961, 9, 9, 195.
30. К. К. Андреев. Explosivstoffe, 1961, 9, 9, 198.
31. А. Н. Афанасенков, И. М. Воскобойников. Хим. физика, 1984, 3, 2, 272.

*Поступила в редакцию 10/Г 1986,
после доработки — 28/IV 1986*

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В ГАЗЕ И ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

*Л. Г. Гвоздева, В. Н. Ляхов, Д. К. Раевский,
Ю. М. Фаресов*

(Москва)

Динамика распространения и отражения ударных волн (УВ) в пористых пластических материалах типа пенополиуретана и пенопластов изучалась экспериментально и теоретически в [1—5]. Указанные материалы широко применяются в качестве эффективных ослабителей звуковых и УВ с падающим профилем давления. В [1, 2] впервые обнаружено, что при нормальном отражении воздушной УВ с постоянными параметрами за фронтом от стенки, покрытой слоем эластичного пенополиуретана, пиковое давление на стенке существенно (в 5—10 раз) может превышать давление нормального отражения при отсутствии покрытия. Аналитическое рассмотрение задачи о распространении и отражении УВ в пористых сильносжимаемых материалах проводилось в работах [3—5], причем во всех случаях пористый материал моделировался в виде гомогенной смеси. Такое представление дало возможность использовать методы анализа, развитые применительно к процессам распространения и отражения ударных волн в жидкостях с пузырьками газа и газозвезях твердых невзаимодействующих микрочастиц.

В настоящей работе проведено систематическое сопоставление результатов численного и физического экспериментов по исследованию динамики процесса взаимодействия воздушной УВ со стенкой, покрытой эластичным пенополиуретаном (ППУ). Численный эксперимент прово-

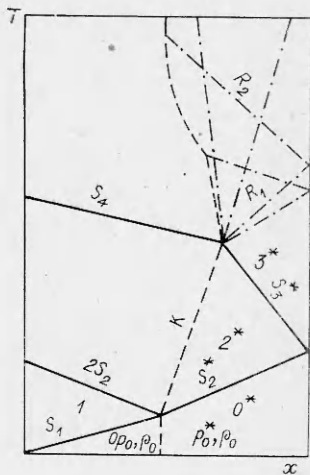


Рис. 1. x — T -диаграмма взаимодействия воздушной УВ со стенкой, покрытой пористым материалом.
 — ударные волны; — · — · — · — волны разгрузки (разрежения); — — — — — контактная поверхность, разделяющая воздух и пористую среду.

дился на основе представления пористой среды в виде односкоростного континуума или «квазигаса» [5] в условиях, идентичных физическому эксперименту. Для интегрирования системы уравнений нестационарного движения пористой среды использовался метод сквозного счета с применением конечно-разностной схемы Мак-Кормака. Численное интегрирование дает возможность получить полное пространственно-временное решение задачи в отличие от решения [5]. При этом становится возмож-

ным прямо сравнить осциллограммы пьезодатчиков с численным решением и провести сопоставление значений избыточного импульса при нагружении стенки, полученных численным и натурным моделированием.

На рис. 1 представлена x — T -диаграмма процесса одномерного взаимодействия УВ с жесткой стенкой, покрытой слоем пористого сжимаемого материала толщины d [4]. Параметры невозмущенного газа перед падающей волной обозначаются цифрой 0, за ней — 1, за отраженной от поверхности слоя волной — 2. Верхний индекс * относится к параметрам пористой среды, индексы 0*, 2*, 3* обозначают соответственно параметры невозмущенной пористой среды, за ударной волной, преломленной в материал S_2^* , и волной, отраженной от стенки S_3^* . Взаимодействие S_3^* с границей воздух—ППУ (в односкоростной постановке, трактуемой как контактный разрыв К) приводит к формированию вторичной ударной волны в воздухе S_1 и движущейся в обратную сторону волны разгрузки R , при этом направление движения К меняется на противоположное.

Используемая математическая модель аналогична описанной в [5] и рассматривает пористую фазу как односкоростной континуум с пренебрежимо малой упругостью скелета. Предполагается, что за время процесса вклад теплоемкости твердой фазы несуществен. Это позволяет в явном виде получить простое выражение для внутренней энергии модельной пористой среды [5]:

$$e = p/\rho \cdot \alpha / (\gamma - 1), \quad (1)$$

где p , ρ — давление и плотность, усредненные по элементарному объему среды; α — коэффициент пористости; $\gamma = c_p/c_v$ — отношение удельных теплоемкостей газовой фазы.

С учетом сделанных предположений решалась система уравнений сохранения массы, импульса и энергии:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) &= 0, \\ \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(p + \rho u^2) &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(e + \frac{u^2}{2} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho u \left(e + \frac{u^2}{2} \right) + p u \right] &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь t — текущее время; u — массовая скорость среды, усредненная по элементарному объему. Для замыкания этой системы помимо (1) необходимо еще уравнение, связывающее текущие значения коэффициента пористости α и плотности ρ среды.

Это замыкающее соотношение может быть получено, если пренебречь сжимаемостью скелета (изменением истинной плотности твердой

фазы) [5]:

$$\alpha = 1 - (1 - \alpha_0)\rho/\rho_0 \quad (3)$$

(α_0 и ρ_0 — начальные значения коэффициента пористости и эффективной плотности пористой среды).

Методика численного расчета

Для записи системы уравнений (2) в безразмерном виде в качестве масштабов использовались начальное давление газа в невозмущенной области p_0 , плотность образца ρ_0 и его толщина d . В этом случае масштабы для скорости и времени — $\sqrt{p_1/\rho_1}$ и $d/\sqrt{p_1/\rho_1}$. Результаты представлены в зависимости от безразмерного времени $T_s = t \cdot D_1/d$, где D_1 — скорость фронта падающей УВ. Интегрирование системы уравнений (2) проводилось с помощью схемы Мак-Кормака второго порядка аппроксимации [6]. Использовались нецентральные разности лишь одного направления [7]. Решение получалось методом сквозного счета. В этом случае УВ и контактные разрывы (КР) специально не выделяются, а размазываются на несколько интервалов счетной сетки. Для подавления осцилляций, возникающих около газодинамических разрывов, применялся оператор сглаживания одного из двух типов: первый [7, 8] добавляет к решению поправку третьего порядка малости; второй [9] — поправку нулевого порядка, но так, чтобы сохранялась консервативность расчетной схемы. С целью предотвращения сильного размазывания газодинамических разрывов использовался специальный оператор антидиффузии¹ [9] в сочетании с оператором сглаживания второго типа. Ширина переходных зон УВ и КР в этом случае составляла $(1 \div 2)\Delta x$.

Расчетный луч содержал 100 точек, 50 из которых первоначально принадлежат слою пористого материала. В начальный момент времени задавались параметры невозмущенного газа перед УВ ($p = p_0$, $\rho = \rho_0$, $u_g = 0$) и невозмущенной пористой среды ($p^* = p_0$, $\rho^* = \rho_0$, $u^* = 0$). За падающей УВ задавались соответствующие параметры $p = p_1$, $\rho = \rho_1$, $u = u_1$, причем в левой граничной точке сетки эти параметры постоянны все время счета. На правой границе задавалось условие непротекания, которое осуществлялось «зеркальным» переносом в граничную точку параметров из ближайшей внутренней, причем у скорости изменялся знак. Определяющими параметрами задачи при данной постановке являются три безразмерные величины: число Маха падающей ударной волны M_1 , плотность пористой среды ρ_0^* и параметр γ , характеризующий степень теплового взаимодействия фаз. В соответствии с оценками эффективности теплообмена в ППУ, сделанными в [5], в расчетах использована «адиабатическая» модель течения двухфазной среды с $\gamma = 1,4$.

Постановка эксперимента

Экспериментальные исследования проводили на диафрагменной ударной трубе сечением $0,1 \times 0,1$ м; длина камер: низкого давления $\sim 1,3$ м, высокого давления 8 м. В качестве толкающего газа использовали азот, рабочий газ — воздух при нормальных условиях. Конструкция ударной трубы и методика проведения экспериментов подробно описаны в [2]. Образцы эластичного пенополиуретана марки ППУ-ЭМ-1 сечения $0,1 \times 0,1$ м и толщины 50—100 мм плотно накладывали на торцевую заглушку ударной трубы, полностью перекрывая сечение канала. Профили давления на торцевой стенке трубы под образцом p^* и на боковой поверхности канала трубы перед образцом p_2 (на расстоянии 0,2 мм от торца) измеряли пьезоэлектрическими датчиками. Очевидно, что давление за отраженной от поверхности слоя ударной волной p_2 равно давлению за фронтом волны в пенополиуретане p_2^* (см. рис. 1).

¹ Модификация оператора сглаживания [9] и антидиффузии для схемы [6] проводилась при участии Н. И. Зелинского.

Анализ результатов численного и физического экспериментов

На рис. 2 представлены полученные экспериментально временные зависимости давления на торцевой стенке ударной трубы под слоем пенополиуретана (кривая 1) и на боковой стенке перед слоем на расстоянии 200 мм от торца (кривая 3), а также соответствующие расчетные кривые 2 и 4. Расчет проводился применительно к условиям эксперимента: $p_0 = 10^5$ Па, $M_1 = 1,7$; материал — эластичный пенополиуретан ППУ-ЭМ-1, $\rho_0^* = 38,6$ кг/м³, $\alpha_0 = 0,975$, $d = 80$ мм, уровень давления нормального отражения воздушной УВ от твердой стенки без покрытия $p_{20} = p_2/p_0$.

Из рис. 2 видно, что пиковое значение импульса давления на стенке $p_3^* \gg p_{20}$, что согласуется с результатами экспериментов. Сопоставление свидетельствует об удовлетворительном качественном и количественном описании процесса динамического деформирования слоя реального пористого материала с помощью описанной расчетной модели. Отметим, однако, что численные и экспериментальные профили давления на стенке под слоем материала хорошо соответствуют друг другу лишь до момента времени $T_s \approx 6$, совпадающего с началом разгрузки слоя ударно-сжатого пористого материала. Наибольшее расхождение имеет место в окрестностях минимума давления на стенке и составляет 30—50%, что свидетельствует о необходимости дальнейшего уточнения расчетной модели.

На рис. 3 представлены расчетные зависимости пикового давления на стенке под слоем пористого материала p_3^* и давления p_2^* за фронтом ударной волны S_2^* , сформировавшейся в пористой среде, от M_1 . Начальные условия: $p_0 = 10^5$ Па, $\alpha_0 = 0,975$. Результаты вычислений давления приведены в безразмерном виде (нормированы на давление нормального отражения воздушной УВ от жесткой стенки p_{20}). Линии 1—3 соответствуют $\rho_0^* = 40, 33$ и 25 кг/м³. На рис. 3 также приведены соответствующие результаты измерения p_2^*/p_{20} , полученные на образцах ППУ при $\rho_0^* = 25,0$ (▲) и $38,6$ кг/м³ (△), а также p_3^*/p_{20} при $\rho_0^* = 38,6$ кг/м³ (●).

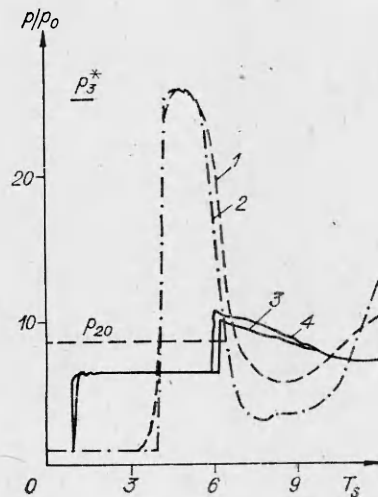


Рис. 2. Расчетный и экспериментальные профили давления на стенке.

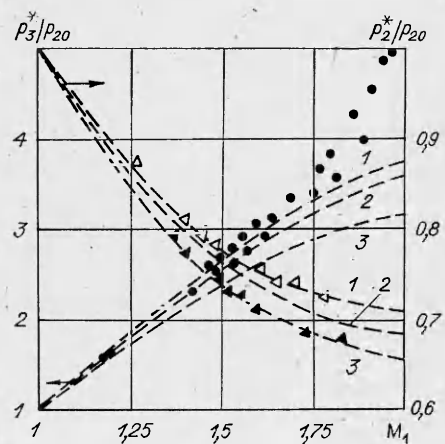


Рис. 3. Давление за прошедшей p_2^*/p_{20} и отраженной от стенки p_3^*/p_{20} ударными волнами в зависимости от M_1 .

Отметим, что расчетные зависимости p_2^*/p_{20} от M_1 удовлетворительно описывают массив соответствующих экспериментальных точек в диапазоне $1,2 \leq M_1 \leq 1,8$; в то же время соответствие между экспериментальными значениями p_3^*/p_{20} и расчетной кривой имеет место лишь в случае $M_1 \leq 1,6$. При $M_1 > 1,6$ экспериментальные значения p_3^*/p_{20} систематически превышают соответствующие расчетные, причем тем выше, чем больше M_1 .

На рис. 4 приведены расчетные значения избыточного механического импульса на стенке под слоем материала

$$I = \int_0^{\tau} (p - p_{20}) dt \quad (\tau - \text{момент}$$

времени, при котором давление на стенке после достижения абсолютного максимума p_3^* спадает до p_{20}). На рис. 4 также представлены соответствующие результаты интегрирования временных профилей давления на стенке, полученных в экспериментах с образцами ППУ различной начальной плотности 25 (+), 33 (○), 38,6 (●) кг/м³. Видно, что расчетные значения избыточного механического импульса на стенке хорошо соответствуют экспериментальным данным.

В заключение можно отметить, что описанная методика расчета динамического взаимодействия воздушной УВ со стенкой, покрытой сильносжимаемым пористым материалом типа эластичного пенополиуретана, обеспечивает в целом удовлетворительное качественное и количественное соответствие результатов с данным экспериментом (по крайней мере, при $M_1 = 1,2 \div 2,0$). Некоторые указанные выше количественные расхождения, видимо, определяются упрощениями и предположениями, сделанными при формулировке расчетной модели, в первую очередь эффектами межфазного теплообмена и взаимодвижения фаз.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. Е. Гельфанд, С. А. Губин, С. Н. Когарко и др. ПМТФ, 1975, 6, 74.
2. Л. Г. Гвоздева, Ю. М. Фаресов. ПМТФ, 1984, 3, 111.
3. Б. Е. Гельфанд, А. В. Губанов, Е. И. Тимофеев. Изв. АН СССР. МЖГ, 1983, 4, 79.
4. R. Monti. J. of AIMETA, Meccanica, 1970, 5, 4.
5. Л. Г. Гвоздева, Ю. М. Фаресов. ЖТФ, 1985, 55, 4, 773.
6. Р. Ф. Уорминг, П. Кутлер, Х. Ломакс. РТК, 1973, 11, 2, 76.
7. В. Н. Ляхов, В. Ю. Зицерман, Е. К. Костылевич.— В кн.: Методы расчета тепловых свойств/Под ред. В. Ф. Байбуза. М., 1983.
8. В. Н. Ляхов.— В кн.: Численные методы механики сплошной среды. Т. 5, № 3, Новосибирск, 1974.
9. Н. И. Зелинский, В. А. Сапожников. Там же. Т. 14, № 3, Новосибирск, 1983.

Поступила в редакцию 30/IV 1986,
после доработки — 1/VIII 1986

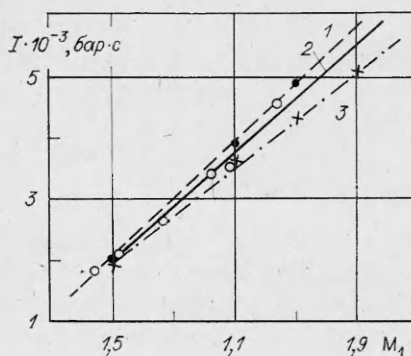


Рис. 4. Импульс первой фазы нагружения стенки под слоем пенополиуретана в зависимости от M_1 , $p_0^* = p_0 = 10^5$ Па, $\alpha_0 = 0,975$.
 ρ_0^* , кг/м³: 1 — 40, 2 — 33, 3 — 25.