

**РАСЧЕТ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ВОЛН ДАВЛЕНИЯ С ПРЕГРАДОЙ
В ПРИСУТСТВИИ ВБЛИЗИ НЕЕ ПЕНООБРАЗНОГО ЭКРАНА**

УДК 532.529.5

В. С. Суров

Челябинский государственный университет, 454136 Челябинск

В рамках дискретной модели пены с учетом пульсаций пузырей исследуется задача взаимодействия волн давления с неоднородным газожидкостным экраном пенной структуры, расположенным вблизи твердой стенки. Результаты расчетов сопоставляются с имеющимися экспериментальными данными.

Задача взаимодействия ударных волн (УВ) с экраном из пены ранее исследовалась в основном экспериментальными методами [1–6]. Отметим, что физический эксперимент зачастую недостаточно информативен. В частности, в экспериментах фиксировались значения давления в отдельных точках ударной трубы, положение контактной границы и ее скорость, но неопределенными оставались другие важные параметры, так что в ряде случаев по ограниченным данным экспериментов не удается восстановить полную картину взаимодействия. От такого недостатка свободен численный эксперимент. В этом случае приходится использовать упрощенные модели, которые, однако, позволяют глубже понять физику протекающих процессов.

При исследовании распространения волн давления в пенах достаточно широко используется равновесная модель двухфазной среды Рудингера [7], в соответствии с которой пена заменялась псевдогазом с эффективным показателем адиабаты. При этом значения давления в отраженной от жесткой преграды УВ оказывались существенно выше экспериментальных [8]. Кроме того, у модели Рудингера имеются и другие недостатки, отмеченные в [9].

Если принять закон независимой сжимаемости компонентов среды, дополнительно пренебрегая тепло- и массообменными процессами, получим замкнутую модель двухфазной среды Рахматулина [10], которая использовалась в [9, 11]. Результаты расчетов по этой модели достаточно хорошо коррелируют с имеющимися экспериментальными данными, включая задачи с УВ, отраженными от жестких стенок. Однако ее применение для расчета взаимодействия нестационарных волн давления с неоднородными пенами затруднительно, так как для указанной модели отсутствует полное решение задачи распада произвольного разрыва. Последняя используется или непосредственно в численных схемах типа метода Годунова, или при постановке граничных условий — в других. Заметим также, что значения давления, рассчитанные по этой модели пены, несколько завышены, так как пульсации пузырей, возбуждаемые проходящими УВ, не учитываются [11].

В [9, 11, 12] для исследования распространения волн в пене использовались различные модификации дискретной модели, в которых сложная структура пены заменялась упрощенной. При этом, однако, учитывался пульсационный характер взаимодействия.

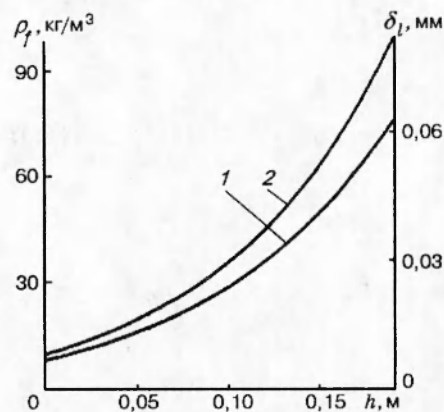


Рис. 1. Распределения эффективных толщин пленок жидкости (1) и плотности пены (2) поперек слоя

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим процесс взаимодействия УВ со слоем неоднородной пены толщиной h , расположенным у нижнего торца вертикальной ударной трубы. Исходные данные для расчетов соответствуют условиям экспериментов [6]: $h = 19$ см, длина основного канала трубы 1,44 м, длина камеры высокого давления 0,8 м. Датчики давления расположены на расстоянии 1,87, 1,98, 2,10 и 2,24 м от начала координат — верхнего торца камеры высокого давления. Давление воздуха в основном канале 1 атм, в камере высокого давления — 4,8 атм ($\gamma = 1,4$). В этих условиях при разрыве диафрагмы формируется падающая на пену УВ с параметрами, соответствующими эксперименту работы [6]. В частности, число Маха в падающей УВ равно 1,39.

Расчеты проводились в рамках «послойной» схемы, при этом двухфазная среда заменялась дискретной системой чередующихся слоев жидкости и газа. Используемая модель пены является простым, но достаточно эффективным инструментом исследования течений газожидкостных сред в одномерной постановке и, в частности, в ударных трубах [9].

Известно, что пена, находящаяся в поле силы тяжести, вследствие синерезиса неоднородна по высоте [2]. Неоднородность пены в исходном состоянии моделировалась изменением толщины пленок жидкости δ_i^j , составляющих пену (i — порядковый номер пленки). Размер газовой прослойки δ_g до взаимодействия считался постоянным.

На рис. 1 приведена зависимость локальной плотности пены ρ_f от толщины слоя h (кривая 2), рассчитанная по соотношению

$$\rho_f(h) = a + b \exp(dh),$$

где $a = -4$; $b = 11,9$; $d = 0,01$; h выражено в метрах; значения коэффициентов подобраны таким образом, чтобы средняя плотность пены, как и в [6], составляла 32 кг/м^3 .

Зависимость эффективных толщин пленок жидкости δ_i^j (кривая 1) от продольной координаты h , соответствующая кривой 2, определялась из выражения [9] $\delta_i^j = \rho_f^j \delta_g / (\delta_g \rho_l + \rho_l - \rho_f^j)$, где ρ_l — физическая плотность жидкости (для водной пены $\rho_l = 1000 \text{ кг/м}^3$); $\delta_g = 1 \text{ мм}$.

В рамках использованного подхода течение газа вне слоя пены рассчитывалось в подвижных сетках методом Годунова [13], а движение пленок жидкости, перемещающихся

под действием перепада давлений в смежных слоях пены, — численным интегрированием системы N обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\rho_l \delta_l^i \frac{du_l^i}{dt} = p^i - p^{i-1},$$

где u_l^i — скорость движения i -й пленки жидкости; p^i, p^{i-1} — давления по разные стороны i -й пленки; N — общее число пленок жидкости, составляющих пену. В приведенных уравнениях не учитывалась инерция газа, находящегося в ячейках, а также фазовые превращения. Процессы в газовых слоях считались адиабатическими. Следовательно, текущие значения давления p^i и плотности газа ρ_g^i в i -м слое газа связаны с начальными p_0 и ρ_0 соотношением $p^i = p_0(\rho_g^i/\rho_0)^\gamma$.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим начальную стадию взаимодействия. Прежде исследуем особенности движения газа в области перед пеной. На рис. 2 приведены соответствующие распределения давления, скорости и плотности вдоль оси $0x$, полученные в расчетах. Заметим, что изменения параметров в газе носят сравнительно монотонный характер.

После разрыва диафрагмы (в момент времени $t = 0$), отделяющей камеру высокого давления от основного участка ударной трубы, формируются две волны: ударная, перемещающаяся по направлению к экрану, и волна разрежения, движущаяся к верхнему торцу камеры (кривые 1 на рис. 2). Отметим присутствие контактного разрыва, перемещающегося вслед за УВ (вторая «ступенька» на графике распределения плотности). По достижению УВ слоя пены образуются две УВ: первая движется вверх по направлению к контактному разрыву (кривые 2 на рис. 2), а вторая, так называемая осцилляционная ударная волна [14], характеризуемая сильными пульсациями давления и скоростей за ее фронтом, перемещается в пене. После взаимодействия отраженной от пены УВ с контактным разрывом появляются еще две УВ, формирующие «пробку» сжатого газа с повышенной плотностью, расположенную в непосредственной близости от пенного экрана (кривая 3 на рис. 2, в). К этому моменту осцилляционная УВ отразилась от нижнего торца ударной трубы и вышла на свободную поверхность пены, сформировав вторичную отраженную УВ («ступенька» на кривой давления со стороны пены). Вглубь пены распространяется волна разрежения. В дальнейшем вторичная отраженная УВ взаимодействует с «пробкой» уплотненного газа, формируя область повышенного давления между «пробкой» и пеной (кривые 4 на рис. 2). К рассматриваемому моменту времени образовалось значительное количество скачков уплотнения, за каждым из которых в рамках используемого метода проследить не удастся (расчетные кривые сглажены, но в целом отражают суть протекающих процессов). Наличие области повышенного давления между «пробкой» и пеной приводит, во-первых, к появлению вторичной осцилляционной УВ, распространяющейся в пене, и, во-вторых, к смещению «пробки» сжатого газа вверх от пены (кривые 5 на рис. 2). Заметим, что с момента времени $t = 5$ мс на процессы вблизи поверхности пены также оказывает влияние волна разрежения, отраженная от торца камеры высокого давления.

На рис. 3 представлены расчетные зависимости координаты межфазной границы газ — пена и скорости движения этой границы от времени. Данные рисунка дополняют описанную картину взаимодействия. В частности, появление первого локального макси-

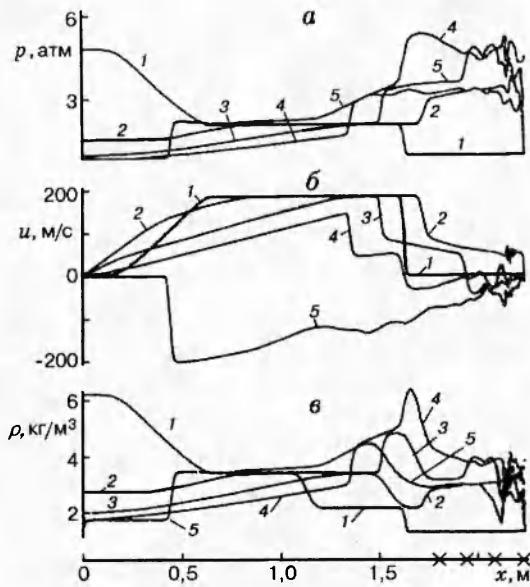


Рис. 2

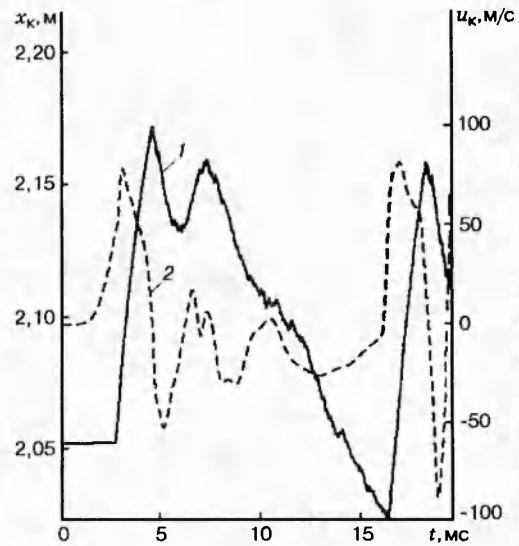


Рис. 3

Рис. 2. Распределения давления (а), скорости (б) и плотности (в) вдоль продольной оси ударной трубы:

t , мс: 1 — 1,8, 2 — 4,1, 3 — 5,2, 4 — 6,0, 5 — 9,1; крестики — положения датчиков давления

Рис. 3. Зависимости координаты межфазной границы (1) и скорости ее перемещения (2) от времени

мума и следом за ним локального минимума на кривой смещения границы раздела сред связано с выходом из трубы осцилляционной УВ, отраженной от ее нижнего торца, и с приходом УВ, отраженной от газовой «пробки». Наличие второго локального максимума на кривой смещения ($t = 8$ мс) обусловлено действием вторичной осцилляционной УВ, отраженной от нижнего торца ударной трубы. К моменту времени $t = 15$ мс от верхнего торца камеры высокого давления к межфазной границе приходит отраженная УВ. Поэтому экран вновь сжимается, а после выхода отраженной осцилляционной УВ на поверхность пены снова расширяется (участок кривой при $t \geq 18$ мс).

На рис. 4 приведены зависимости $p(t)$ (кривыми 2 отмечены расчетные зависимости без пены у торца ударной трубы). Как правило, в экспериментах отсчет времени ведется не с момента разрыва диафрагмы, как в представленных расчетах, а с более позднего момента. Обычно регистрирующие датчики запускаются с помощью дополнительного датчика, расположенного за диафрагмой. Поэтому для согласования данных экспериментальные осциллограммы смещены на 0,6 мс. Кроме того, ввиду особенностей используемой модели пены, которая фактически заменялась системой взаимосвязанных осцилляторов, проводилось осреднение расчетных данных. Заметим, что и экспериментальные осциллограммы соответствуют импульсам давления, осредненным по поверхности чувствительного элемента датчика. Также отметим сглаживающее влияние защитного экрана [3], отделяющего датчик от пены. Нельзя исключить возможность попадания влаги на чувствительный элемент датчика, что приводит к изменению его частотных и амплитудных характеристик, а значит, и к дополнительному сглаживанию сигнала.

Из рис. 4 видно, что на начальном отрезке времени расчетные зависимости давле-

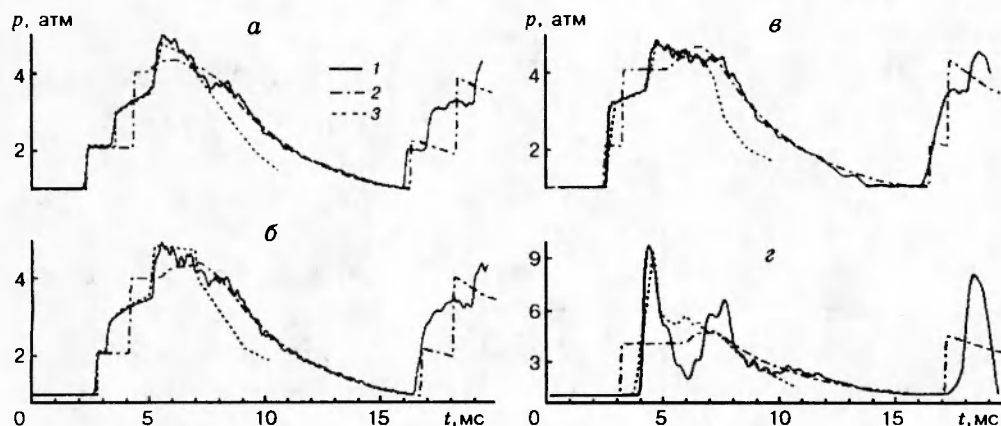


Рис. 4. Расчетные (1, 2) и экспериментальная (3) зависимости $p(t)$:
 x , м: а — 1,87, б — 1,98, в — 2,10, г — 2,24

ния близки к экспериментальным, однако в дальнейшем последние располагаются ниже расчетных. Указанное расхождение, наблюдаемое с момента расширения слоя пены (см. рис. 3), по-видимому, связано с разрушением приповерхностной пенной структуры, обусловленное действием волны разрежения. Известно, что пена слабо «держит» волны разгрузки, в отличие от УВ [4].

Максимальные давления у нижнего торца ударной трубы существенно превосходят соответствующие значения без экрана (см. рис. 4, г). Кинетическая энергия, которую приобрели слои жидкости при воздействии на нее падающей УВ, при отражении от преграды преобразуется в потенциальную. Процесс сопровождается сильным сжатием пузырей пены вблизи торца ударной трубы. Отметим, что с момента времени $t = 5$ мс имеются различия в расчетных данных и экспериментальных показаниях датчика давления, расположенного у нижнего торца ударной трубы (см. рис. 4, г), которые, возможно, связаны с условиями проведения опытов. Известно, что вид осциллограмм существенно зависит от ориентации датчика давления, а также от того, покрыт ли датчик слоем жидкости или она стекает через сливное отверстие [4]. В [6] информация об этом отсутствует, поэтому однозначно ответить на вопрос об имеющемся расхождении не представляется возможным.

Таким образом, в работе, во-первых, продемонстрирована эффективность используемой «послойной» модели пены при моделировании достаточно сложных задач и, во-вторых, показана необходимость учета влияния «пробки» уплотненного газа, расположенной вблизи поверхности пены, на структуру волн, распространяющихся в пене. При проведении дальнейших экспериментальных исследований по взаимодействию волн давления со средами пенной структуры целесообразно исключить влияние газовой «пробки», для чего необходимо увеличить базу ударной трубы. Из приведенных данных также следует необходимость уточнения используемой в работе модели пены в случае расчетов взаимодействия с сильными волнами разрежения, когда наблюдается интенсивное разрушение пенной структуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Borisov A. A., Gelfand B. E., et al. Shock waves in water foams // Acta Astronaut.

1978. V. 5, N 4. P. 1027.
2. Британ А. Б., Зиновик И. Н., Левин В. А. Распространение ударных волн по вертикальному столбу пены с градиентом плотности // ПМТФ. 1992. № 2. С. 27.
 3. Британ А. Б., Зиновик И. Н., Левин В. А. Разрушение пены ударными волнами // Физика горения и взрыва. 1992. Т. 28, № 5. С. 108–116.
 4. Британ А. Б. Прохождение ударной волны по защитному экрану из пены // Теплофизика высоких температур. 1993. Т. 31, № 3. С. 439.
 5. Британ А. Б., Зиновик И. Н. Взаимодействие волн давления с влажной пеной // ПМТФ. 1994. № 5. С. 78.
 6. Британ А. Б., Зиновик И. Н., Левин В. А. и др. Особенности распространения газодинамических возмущений при взаимодействии ударных волн с двухфазными средами пенистой структуры // Журн. техн. физики. 1995. Т. 65, вып. 7. С. 19–28.
 7. Rudinger G. Some effects of finite particle volume on the dynamics of gas-particle mixtures // AIAA J. 1965. V. 3, N 7.
 8. Малахов А. Т., Паламарчук Б. И. Отражение ударных волн в газожидкостных пенах // ПМТФ. 1985. № 1. С. 106.
 9. Суоров В. С. О распространении волн в пенах // Теплофизика высоких температур. 1996. Т. 34, № 2. С. 285.
 10. Рахматулин Х. А. Газовая и волновая динамика. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1983.
 11. Суоров В. С. Сравнительный анализ двух моделей пены // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31, № 3. С. 22–28.
 12. Суоров В. С. О воздействии плоских воздушных ударных волн на пенообразные среды // Теплофизика и аэромеханика. 1994. Т. 1, № 4. С. 285.
 13. Численное решение многомерных задач газовой динамики / С. К. Годунов, А. В. Забродин, М. Я. Иванов и др. М.: Наука, 1976.
 14. Накоряков В. Е., Покусаев Б. Г., Шрейбер И. Р. Волновая динамика газо- и парожидкостных сред. М.: Энергоатомиздат, 1990.

Поступила в редакцию 5/X 1995 г.
