

4. Соколов Ю. Д. Метод осреднения функциональных поправок. Киев, «Наукова думка», 1967.
5. Гаммерман М. Я., Хайтин Б. А. К вопросу об однозначности показаний магнито-электрических преобразователей расхода. — В кн.: Материалы к VI Таллинскому совещанию по электромагнитным расходомерам и электротехнике жидких проводников. Расходомеры жидких металлов. Таллин, 1973.

УДК 533.9.07; 539.3

ПРОЦЕСС РАСКРЫТИЯ НЕУПРУГОЙ ДИАФРАГМЫ В УДАРНОЙ ТРУБЕ

В. А. Волков, В. Н. Пармон, Б. К. Ткаченко

(Долгопрудный)

Вопросы, связанные с механизмом раскрытия диафрагм в ударных трубах, обсуждаются в работах [1—3], где рассматривается «шарнирная» модель. Обычно предполагается, что после разрыва по насечкам лепестки диафрагмы не подвергаются деформации и совершают лишь вращательное движение вокруг места закрепления в трубе, сопротивление диафрагмы в местах закрепления не учитывается. Для расчета процесса раскрытия диафрагмы нами использована модель так называемой свободно-сочлененной цепи, при этом предполагается, что силы давления на диафрагму много больше упругих сил материала и упругими силами можно пренебречь. Такая ситуация может возникнуть во взрывных и электроразрядных ударных трубах, ударных аэродинамических трубах и т. п.

В данной работе проводилось фотографирование процесса раскрытия медной диафрагмы толщиной 1,5 мм и диаметром 50 мм с торца электроразрядной ударной трубы [4]. Использовалась камера СФР в режиме покадровой съемки с частотой $5 \cdot 10^5$ кадр/с. Подобного типа диафрагмы с крестообразной насечкой глубиной 1 мм выдерживали давление до 90 атм. Перед разрядом камера объемом 200 см³ наполнялась гелием до 10 атм и в ней происходил разряд батареи конденсаторов при напряжении 5,5 кВ с общей энергией 30 кДж. По оценкам [4] давление в камере повышалось до ~ 400 атм.

На фиг. 1 показаны последовательно фотографии процесса раскрытия через 8 мкс (время экспозиции 2,5 мкс). Примечательно, что проходное сечение практически с момента разрыва по насечкам имеет строго крестообразную форму и сохраняет ее вплоть до полного раскрытия. Экспериментально установлено также, что лепестки удлиняются примерно в 1,5 раза вследствие удлинения их в процессе движения.

Рассматривается движение цепи, состоящей из N звеньев, каждое массой m_i и длиной l_i , масса звена считается сосредоточенной в его конце. При $i \rightarrow \infty$ такая цепь есть модель неупругой диафрагмы с заданным распределением массы.



Ф и г. 1

Кинетическая энергия такой системы выражается в виде

$$T = \sum_{i=1}^N \frac{m_i}{2} \left\{ \left[\sum_{j=1}^i l_j \cos \varphi_j \cdot \dot{\varphi}_j \right]^2 + \left[\sum_{j=1}^i l_j \sin \varphi_j \cdot \dot{\varphi}_j \right]^2 \right\},$$

где φ_i — углы между направлением силы тяжести и осью звена i . Тогда с учетом того, что потенциальная энергия U цепи не зависит от скорости ее движения, можно записать уравнение движения [5]

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_k} - \frac{\partial T}{\partial \varphi_k} - \frac{\partial U}{\partial \varphi_k}$$

или

$$(1) \quad \sum_{i=1}^N m_i \left\{ \left[\sum_{j=1}^i l_j (\cos \varphi_j \cdot \ddot{\varphi}_j - \sin \varphi_j \cdot \dot{\varphi}_j^2) \right] l_k \cos \varphi_k \cdot \theta_{ki} + \right. \\ \left. + \left[\sum_{j=1}^i l_j (\sin \varphi_j \cdot \ddot{\varphi}_j + \cos \varphi_j \cdot \dot{\varphi}_j^2) \right] l_k \sin \varphi_k \cdot \theta_{ki} \right\} - \frac{\partial U}{\partial \varphi_k},$$

где

$$\theta_{ki} = \begin{cases} 1 & \text{при } k \leq i, \\ 0 & \text{при } k > i, \end{cases} \quad k = 1, 2, \dots, N.$$

Уравнения (1), записанные в конечных разностях для звеньев одинаковой длины l , имеют вид

$$\sum_{i=k}^N m_i \sum_{j=1}^i \varphi_j(z+1) \cos [\varphi_j(z) - \varphi_k(z)] = \sum_{i=k}^N m_i \sum_{j=1}^i \{ [2\varphi_j(z) - \\ - \varphi_j(z-1)] \cos [\varphi_j(z) - \varphi_k(z)] + [\varphi_j(z) - \varphi_j(z-1)]^2 \times \\ \times \sin [\varphi_j(z) - \varphi_k(z)] \} - \frac{(\Delta t)^2}{l^2} \frac{\partial U}{\partial \varphi_k}, \\ k = 1, 2, \dots, N,$$

где $\varphi_j(z)$ — значение величины φ_j в момент времени $z\Delta t$ ($z=1, 2, 3, \dots$). Параметром подобия для такого рода движений удобно выбрать комбинацию $(2L\rho\delta/pt^2)$ и время выражать в единицах $(2L\rho\delta/p)^{1/2}$.

Расчет движения цепи проведен для нескольких частных случаев.

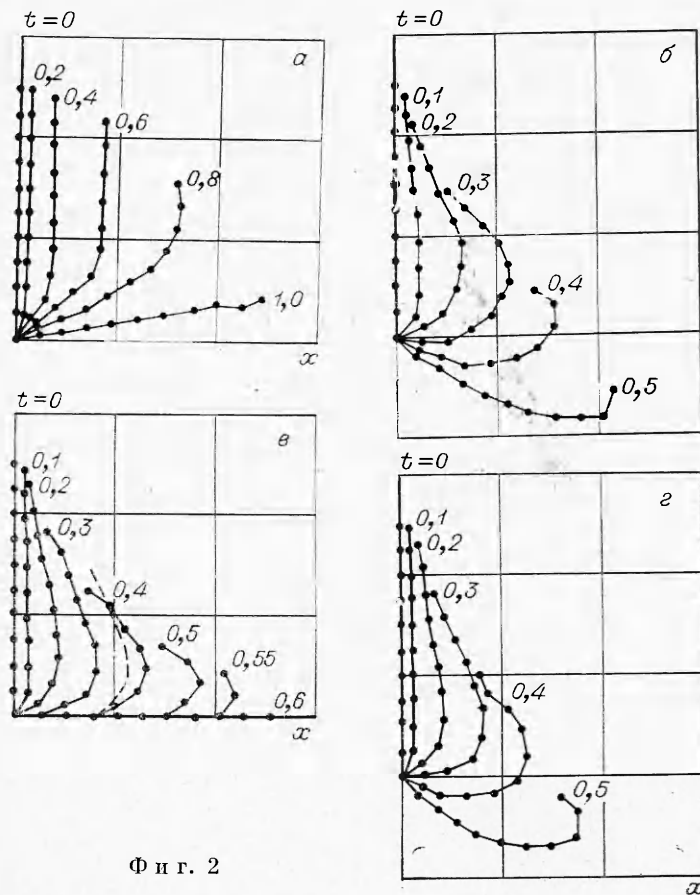
1. Падение цепи, состоящей из звеньев одинаковой массы, закрепленной в одном конце, под действием силы тяжести из горизонтального положения. Этот случай соответствует раскрытию прямоугольного лепестка под действием силы, действующей вдоль оси трубы

$$\frac{\partial U}{\partial \varphi_k} = gl \sin \varphi_k \sum_{i=k}^N m_i,$$

где g — ускорение силы тяжести.

На фиг. 2, а показаны последовательные положения цепи через времена $\Delta t = 0,2$, полученные в результате расчета для случая $i = 10$. Начальные условия здесь и далее $\varphi_i = \pi/2$; $\dot{\varphi}_i = 0$ для $i = 1, \dots, 10$.

2. Рассмотрено движение цепи с $i = 10$, закрепленной на одном конце, под действием сил P_i на точечные массы m_i нормально к направлению



Ф и г. 2

звена l_i , что соответствует движению лепестка в трубе под действием сил давления:

$$\frac{\partial U}{\partial \varphi_k} = \sum_{j=k}^N P_j l \left\{ \cos \varphi_j \sum_{l=k}^j \cos \varphi_l + \sin \varphi_j \sum_{l=k}^j \sin \varphi_l \right\}.$$

Результаты расчета показаны на фиг. 2, б. Начальные условия те же, что и для случая 1.

3. Рассчитано движение цепи, масса звеньев которой растет пропорционально расстоянию звена от незакрепленного конца цепи. Этому случаю соответствует движение треугольного лепестка. Результаты расчета приведены на фиг. 2, в, г для случая, когда нет ограничивающей стенки и при наличии ее. На фиг. 2, в приведен профиль (штриховая линия) лепестка из алюминиевой фольги, раскрывающегося под действием отраженной от него ударной волны в пневматической ударной трубе (эксперименты).

Проведенные расчеты показали, что время полного раскрытия в зависимости от давления и свойств диафрагмы выражается формулой

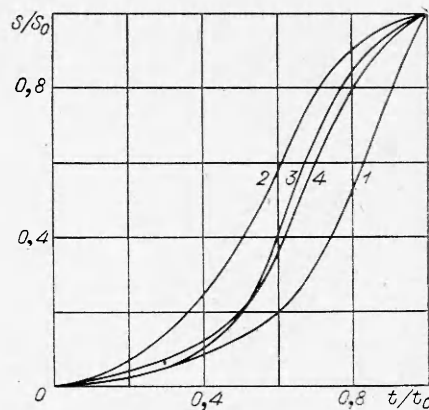
$$t_0 = 0,6 \left(\frac{2L\rho\delta}{p} \right)^{1/2}.$$

Время полного раскрытия для «шарнирной» модели в предположении постоянно действующего давления можно записать в виде

$$t_0 = \left(\frac{\pi}{4}\right)^{1/2} \left(\frac{2L\rho\delta}{p}\right)^{1/2}.$$

С учетом реально действующего на диафрагму давления в работах [1, 2] получены в аналогичных выражениях численные коэффициенты 0,91 и 0,95 соответственно. Модель свободно-сочлененной цепи дает для времени полного раскрытия значение в $\sim 1,5$ раза меньше, чем «шарнирная» модель.

На фиг. 3 показана относительная величина проходного сечения на различных стадиях процесса раскрытия диафрагмы, рассчитанная для «шарнирной» модели и свободно-сочлененной цепи (1 — модель «шарнирного» раскрытия, 2 — неупругое раскрытие, 3 — экспериментальная зависимость для толстой диафрагмы из меди, 4 — эксперимент [3]).



Фиг. 3

Поступила 31 XII 1975

ЛИТЕРАТУРА

1. Simpson C. I. M., Chandler T. R. D., Bridgman K. B. Effect on shock trajectory of the opening time of diaphragms in a shock tube.— «Phys. Fluids», 1967, vol. 10, N 8.
2. Дунцова Ж. С., Ершов И. В., Киреев В. Т., Рузовин Е. И. Расчет движения ударной волны и параметров потока при мгновенном открытии диафрагмы в ударной трубе.— «Изв. АН СССР. МЖГ», 1966, № 4.
3. Rothkopf, Low W. Diaphragm opening process in shock tubes.— «Phys. Fluids», 1974, vol. 17, N 6.
4. Вакатов В. П., Карасев А. Б., Малявин В. П., Ткаченко Б. К. Исследования на электроразрядной ударной трубе.— «Журн. приклад. спектроскопии», 1971, т. 15, № 6.
5. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Механика. М., «Наука», 1973.

УДК 532.529.6.

НЕСТАЦИОНАРНЫЙ ТЕПЛОМАССОБМЕН ОКОЛО СФЕРИЧЕСКОЙ ЧАСТИЦЫ

Р. И. Нигматулин, И. Х. Рахматулина

(Москва)

1. Постановка задачи и основные уравнения. Рассматривается сферически-симметричная задача, когда фазовые переходы происходят только по поверхности частицы, а возникающие при этом массовые скорости в газе во много раз меньше скорости звука. В этом случае имеет смысл использовать условие однородности давления по пространству (соответствующее обоснование имеется в [1]). Газ, окружающий каплю или частицу, однокомпонентный и является паром вещества капли или частицы (в системе нет диффузии). Пусть частица не сжимаема, в ней отсутствует движение,