

Из анализа полученных уравнений следует, что вклад бетона в несущую способность определяется коэффициентом $\eta = \sqrt{1 + \mu_1/\mu_2}$, который для испытанных камер равен $\eta = 2$. Это также согласуется с экспериментом, так как бетон удвоил допустимую только для одних труб нагрузку (см. рис. 3).

Выводы

Проведено экспериментальное и численное исследование реакции трехслойных взрывных камер на внутреннее взрывное нагружение. Показано, что использование бетона в качестве промежуточного слоя может существенно повысить несущую способность камер за счет увеличения инертной массы конструкции. Отмечено своеобразие деформирования слоя бетона, заключающееся в образовании блоков с неизменной толщиной, равной начальной, движущихся относительно друг друга. Предложен метод оценки несущей способности камер, аналогичных испытанным.

Поступила в редакцию 22/VI 1981

ЛИТЕРАТУРА

1. Ф. А. Баум, Л. П. Орленко и др. Физика взрыва. М.: Наука, 1975.
2. В. А. Баталов, В. А. Свидицкий и др. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Методики и программы численного решения задач математической физики, 1978, 1, 1.
3. М. Л. Уилкинс.— В сб.: Вычислительные методы в гидродинамике. М.: Мир, 1967.
4. В. А. Быченков, В. В. Гаджиева, В. Ф. Курапатенко.— В сб.: Численные методы механики сплошной среды. Т. 3, № 2. Новосибирск, 1972.
5. В. Н. Зубарев, Г. С. Телегин, М. В. Жерноклетов. ПМТФ, 1969, 4.
6. А. Ф. Демчук. ПМТФ, 1968, 5.
7. В. В. Адищев, Л. А. Талзи.— В сб.: Тр. XII Всес. конф. по теории оболочек и пластин. Ереван, 1980.

О КРИТЕРИИ ПРИМЕНИМОСТИ ЛИНЕЙНОГО ПРИБЛИЖЕНИЯ В ЗАДАЧАХ О РАЗВИТИИ МАЛЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ГАЗОДИНАМИКЕ

Е. Е. Мешков, В. Н. Мохов
(Москва)

Задачи устойчивости и развития малых возмущений в газодинамике обычно исследуются при помощи решения (аналитического или численного) линеаризованных уравнений. Начальное возмущение в таких случаях часто задается в виде $y = a_0 \cos kx$ и решается как $y = a(t) \cos kx$, где $a(t)$ — некоторая газодинамическая величина. При этом применимость линейного приближения обычно определяется малостью возмущения и, в частности, если $a(t)$ имеет размерность длины,

$$a(t)k \ll 1. \quad (1)$$

Однако в ряде случаев линейное приближение оказывается неверным даже в случае выполнения соотношения (1). Это можно показать при помощи теоретических оценок и экспериментов.

1. Рассмотрим плоскую задачу, в которой искривленная по синусоиде характеристическая поверхность (например, фронт волны разрежения или очень слабая ударная волна) движется по веществу с постоянной скоростью. В этом случае изменение формы поверхности со временем определяется известным принципом Гюйгенса [1] и, если в начальный

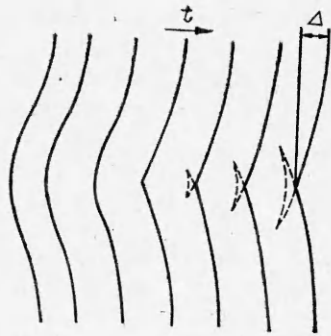


Рис. 1. Деформация волнового фронта синусоидального возмущения по уравнениям (2) и (3). Все точки фронта перемещаются с постоянной скоростью.

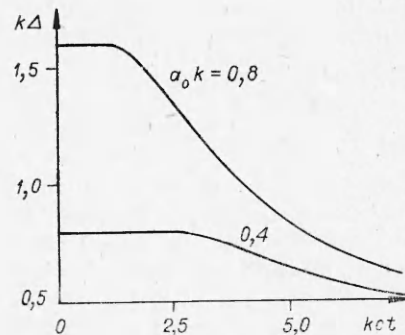


Рис. 2. Изменение амплитуды $k\Delta$ возмущения фронта в зависимости от пройденного волной пути kct .

момент времени она имела форму $y = a_0 \sin kx$, то к моменту времени t будет описываться уравнением

$$y = a_0 \sin k\xi + \frac{c_0 t}{\sqrt{1 + a_0^2 k^2 \cos^2 k\xi}}, \quad (2)$$

где c_0 — скорость звука, а ξ — параметр, связанный с x уравнением

$$\xi = x + \frac{c_0 t a_0 k \cos k\xi}{\sqrt{1 + a_0^2 k^2 \cos^2 k\xi}}. \quad (3)$$

На рис. 1 приведены результаты расчетов по формулам (2) и (3) деформации начального возмущения ($a_0 k = 0,4$) со временем. Заметим, что формулы (2) и (3), геометрическое построение в соответствии с принципом Гюйгенса и эксперимент [1] дают качественно и количественно одинаковые результаты. Со временем кривая, описывающая фронт $y = y(x)$, деформируется, образуя петлю, нижняя ветвь которой (штриховая линия) не имеет физического смысла. Изменение амплитуды возмущения со временем по (2) и (3) для двух значений $a_0 k$ показано на рис. 2. Начиная с момента образования излома на фронте, амплитуда возмущения уменьшается, асимптотически приближаясь к нулю, а в линейном приближении $a(t) = a_0 = \text{const}$. Характерно, что с уменьшением $a_0 k$ появление излома происходит позднее и соответственно увеличивается интервал времени, в течение которого применимо линейное приближение. Чтобы использовать линейное приближение для конечного начального возмущения, помимо условия малости (1) необходимо выполнить условие ограничения времени, в течение которого наблюдается возмущение. Это условие может быть получено из формул (2) и (3)

$$t \ll 1/c_0 a_0 k^2 \quad (4)$$

или

$$l \ll 1/a_0 k^2, \quad (5)$$

где t и l — характерные масштабы времен и расстояний, на которых применимо линейное приближение.

2. Рассмотрим одномерное течение идеального газа с показателем адиабаты γ , в котором в начальный момент времени имеется малое синусоидальное возмущение $v = v_0 \cdot \cos kx$. При этом выполняется условие $v \ll c_0$. Здесь v — массовая скорость, c_0 — скорость звука. В таком течении со временем будет происходить обострение профиля скорости и образование разрывов. Решение этой задачи в общем виде известно [2],

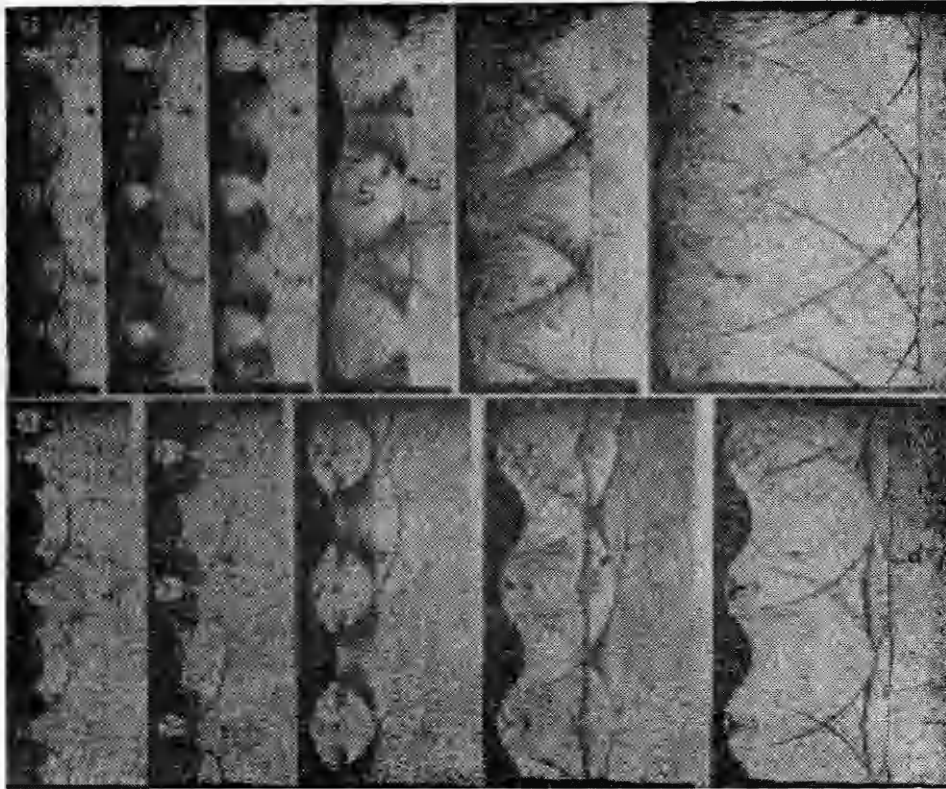


Рис. 3. Развитие возмущений на фронте ударной волны с $M = 1,3$, отраженной от волнистой стенки.

а) $a_0k = 0,4$ ($a_0 = 0,05 \lambda$); б) $a_0k = 0,8$ ($a_0 = 0,1 \lambda$).

и ниже будет получено конкретное выражение для момента времени образования разрыва в течении.

Зависимость $v(x, t)$ выражается в неявной форме

$$x = t(\pm c_0 + (\gamma + 1)/2 \cdot v) + f(v),$$

где $f(v) = 1/k \cdot \arccos(v/v_0)$. Согласно [2], момент образования разрыва определяется как $t_* = -2/(\gamma + 1) \cdot f'(0)$. Отсюда получаем выражение для условия малости времени, в течение которого применимо линейное приближение

$$t \ll t_* = 2/(\gamma + 1) v_0 k,$$

или, считая $v \sim a_0 k c_0$, вновь приходим к полученной ранее форме условий (4) и (5).

Приведенные примеры (появление изломов на характеристических поверхностях и разрывов в непрерывном течении) локально встречаются в большинстве задач по устойчивости течений в газодинамике. Поэтому полученный дополнительно критерий выполнения линейного приближения (4) можно распространить на широкий класс задач. Этот результат может быть получен и на основе оценок отбрасываемых членов при линеаризации уравнений газодинамики.

Ниже приведены некоторые результаты экспериментов, которые показывают влияние описанных выше эффектов нелинейности уравнений газодинамики. Получен ряд теневых фотографий процесса отражения ударной волны в воздухе от жесткой волнистой стенки (рис. 3). Эксперименты проводились на ударной трубе с прямоугольным сечением канала 120×40 мм. Конец канала плотно закрывался пробкой из оргстекла, торец которой имел волнистую поверхность, по форме приближа-

ющуюся к синусоидальной. Плоская ударная волна формировалась в канале ударной трубы с числом Маха $M = 1,3$. Она отражалась от волнистой поверхности пробки. Во всех экспериментах длина волны возмущения волнистой поверхности $\lambda = 2\pi/k$ была одинаковой ($\lambda = 40$ мм), амплитуда возмущения варьировалась в пределах $a_0 = (0,025 \div 0,1)\lambda$. Более подробно конструкция ударной волны и техника эксперимента описаны в [3].

Проведенные эксперименты сходны с выполненными в работе [4]. Вместе с тем более крупный масштаб изображения и однократная экспозиция на каждом кадре позволяют детальнее рассмотреть динамику развития возмущений на отраженной ударной волне и в потоке за ее фронтом.

Как видно из рис. 3, форма фронта отраженной волны со временем отклоняется от синусоидальной. Это проявляется в образовании точек излома фронта d и формировании разрывов на фронтах поперечных волн S в потоке за фронтом отраженной волны. Первоначально плотность в потоке распределяется плавно, что отражается на фотографиях размытостью фронтов поперечных волн. Со временем фронты обостряются и четкость их изображения растет. Особо отметим, что в соответствии с критерием [4], с уменьшением амплитуды начального возмущения формирование особенностей и отклонение от синусоидальной формы замедляется.

Все сказанное выше позволяет сделать вывод, что использование линеаризованного приближения при решении уравнений газодинамики возможно лишь до некоторого времени $t \ll 1/c_0 a_0 k^2$. Поэтому применение асимптотических формул, полученных на основе линейного приближения для конечной величины возмущения, требует дополнительного обоснования. Это, в частности, относится к асимптотикам, полученным в работах [5—11].

Поступила в редакцию 2/VII 1981

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. А. Клопов, Е. Е. Мешков. ФГВ, 1982, 18, 4.
2. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. Механизм сплошных сред. М.: Гостехиздат, 1953.
3. Е. Е. Мешков. Изв. АН СССР, МЖГ, 1970, 4, 33.
4. M. G. Briscoe, A. A. Kovitz. J. Fluid Mech., 1968, 31, 3, 529.
5. N. C. Freeman. Proc. Roy. Soc., 1955, A228, 341.
6. Р. М. Зайдель. ПММ, 1960, 24, 2, 219.
7. С. В. Иорданский. ПММ, 1957, 21, 4, 465.
8. Р. М. Зайдель. ПМТФ, 1967, 4, 30.
9. Ю. М. Николаев. ПММ, 1965, 29, 658.
10. Г. А. Гришина, Р. М. Зайдель, О. М. Зотова. ПММ, 1966, 30, 5, 975.
11. A. A. Kovitz, M. G. Briscoe. J. Acoust. Soc. America, 1969, 45, 5, 1157.

О ПОВЕДЕНИИ ВОЗМУЩЕННОЙ ВОЛНЫ РАЗРЕЖЕНИЯ

Б. А. Клопов, Е. Е. Мешков

(Москва)

В статье описаны результаты экспериментального исследования поведения плоской центрированной волны разрежения, которая в момент возникновения имеет возмущение формы фронта. Насколько известно авторам, этот вопрос ранее не освещался.

Эксперименты проводились на ударной трубе прямоугольного сечения 120×40 мм. Измерительная секция ударной трубы (рис. 1), выполненная из оргстекла СТ-4, состояла из отдельных стыкуемых блоков 1—3, собираемых на общем каркасе. Блоки в сборке образовывали ка-