

ную УВ. В [11] измерена скорость фронта пламени при истечении в отводящую магистраль горячей газовой взвеси металлических частиц. Полученные результаты свидетельствуют о резком ускорении пламени после раскрытия мембраны. На расстоянии 20 см от мембраны зафиксирована скорость ~ 500 м/с.

Таким образом, в работе исследованы параметры волн давления, формирующихся в ударной трубе при разлете сгорающей в КВД пылевзвеси. Показано, что в ряде опытов измеренная интенсивность УВ выше рассчитанной по теории ударной трубы с учетом реального температурного профиля в КВД в момент разрыва мембраны. В отдельных экспериментах зафиксирована многофронтная структура УВ. Для верхней оценки параметров УВ можно принять, что давление в ударной волне близко к давлению разрыва мембраны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Годжелло М. Г. Взрывы промышленных пылей и их предупреждение.— М., 1952.
2. Предупреждение внезапных взрывов газодисперсных систем.— Киев: Наук. думка, 1971.
3. Таубкин С. И., Таубкин И. С. Пожаро- и взрывоопасность пылевидных материалов и технологических процессов их переработки.— М.: Химия, 1976.
4. Корольченко А. Я. Пожаровзрывоопасность промышленной пыли.— М.: Химия, 1986.
5. Взрывные явления. Оценка и последствия/У. Бейкер и др.— М.: Мир, 1986.— Кн. 1.
6. Ishihama W., Enomoto H. // 15th Symp. (Intern.) on Comb.— Pittsburgh, 1974.
7. Гейдон А., Герл И. Ударная труба в химической физике высоких температур.— М.: Мир, 1966.
8. Гельфанд Б. Е., Губанов А. В., Медведев С. П. и др. Докл. АН СССР, 1985, 281, 5, 1113.
9. Зельдович Я. Б., Баренблатт Г. И., Либрович В. Б., и др. Математическая теория горения и взрыва.— М.: Наука, 1980.
10. Hertsberg A., Smith W. J. Appl. Phys., 1954, 25, 1, 130.
11. Бринза В. Н., Бабайцев И. В., Папаев С. Т. ФГВ, 1980, 16, 1, 136.

г. Москва

Поступила в редакцию 16/VIII 1988

УДК 534.222.2

Б. Е. Гельфанд, С. М. Фролов, С. П. Медведев

ИЗМЕРЕНИЯ И РАСЧЕТ ЗАТУХАНИЯ УВ В ШЕРОХОВАТОЙ ТРУБЕ

При рассмотрении механизма неидеальной детонации в шероховатых трубах в модельные уравнения вводятся коэффициенты потерь на трение и теплообмен в нестационарном газовом потоке с ударными волнами (УВ) [1—3]. Пока эти величины задаются априорно. Однако в связи с появлением разноплановых экспериментальных данных стал реально ощущаться дефицит в достоверных сведениях об уровне потерь в зоне реакции.

В работе предложен приближенный метод расчета и проведены систематические экспериментальные исследования затухания воздушных УВ в шероховатых трубах, что позволило определить потери импульса в УВ путем сопоставления расчетных и опытных данных. Полученные зависимости коэффициента потерь от размеров регулярной шероховатости использованы для расчета скорости газовой детонации в шероховатых трубах.

© 1990 Гельфанд Б. Е., Фролов С. М., Медведев С. П.

Математическое моделирование затухания ударной волны в шероховатой трубе

Рассмотрим распространение УВ в трубах с равномерной по периметру и длине шероховатостью. Выступы шероховатости, взаимодействуя с потоком за УВ, оказывают на него динамическое воздействие и искажают его структуру. Теневые фотографии и измерения распределения плотности показывают [4], что за УВ возникает симметричная волновая структура, фронт имеет слабо выраженные изломы, а плотность распределена почти равномерно по сечению трубы (за исключением узкого пристеночного слоя, в котором существенно сжатие вещества отраженной волной). Отмеченные особенности позволяют предположить, что для описания динамики затухания УВ применим одномерный подход.

Взаимодействие потока с выступами шероховатости приводит к потерям импульса газа и перераспределению энергии в связи с формированием вторичных скачков и турбулизацией течения. В этих условиях теплообмен со стенками и преградами мал и им можно пренебречь в общем балансе энергии [1]. Экспериментальные исследования установившихся течений в шероховатых трубах указывают на существование квадратичного закона сопротивления при высоких числах Рейнольдса Re [5]. В дальнейшем полагаем, что и при неустановившемся течении газа за УВ коэффициент сопротивления определяется только геометрическими характеристиками шероховатости и не зависит от чисел Рейнольдса и Маха.

Основные уравнения

Рассмотрим эволюцию УВ ступенчатого профиля после входа в шероховатый участок $0 < x < \infty$ трубы радиусом r . Предположим, что первоначально УВ двигалась с постоянной скоростью на участке $-\infty < x \leq 0$ с гидравлически гладкой поверхностью. При принятых допущениях основные уравнения течения совершенного газа в трубе имеют вид

$$\begin{aligned} \rho_t + u\rho_x + \rho u_x &= 0, \\ \rho u_t + \rho u u_x + p_x &= -F, \\ p_t + u p_x - a^2(\rho_t + u\rho_x) &= (\gamma - 1)Fu, \\ p &= \rho RT, \end{aligned} \quad (1)$$

где ρ — плотность; u — скорость; p — давление; a — скорость звука; T — температура; R — газовая постоянная; γ — отношение теплоемкостей; индексы t и x означают дифференцирование по времени и координате. На гладком участке $F = 0$, на шероховатом $F = (c_f/r)\rho u|u|$ (c_f — местный коэффициент сопротивления, называемый далее коэффициентом потерь, чтобы отличить его от коэффициента сопротивления c_f' в установившемся потоке).

Начальные условия при входе УВ в шероховатый участок:

$$\begin{aligned} t = 0, \quad -\infty < x \leq 0, \quad M &= M_0, \\ \rho &= \rho_0 \frac{(\gamma + 1) M^2}{(\gamma - 1) M^2 + 2}, \quad u = \frac{2a_0}{\gamma + 1} \left(M - \frac{1}{M} \right), \end{aligned} \quad (2)$$

$$p = p_0 \left[\frac{2\gamma}{\gamma + 1} M^2 - \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \right]$$

и

$$\begin{aligned} t = 0, \quad 0 < x < \infty, \\ \rho = \rho_0, \quad u = 0, \quad p = p_0, \end{aligned} \quad (3)$$

где M_0 — начальное число Маха УВ; индекс нуль относится к параметрам невозмущенной среды. В произвольный момент времени условия (2) выполняются для $x \rightarrow -\infty$, (3) — для $x \rightarrow \infty$.

Результаты анализа

Несмотря на ряд упрощений, точное решение уравнений (1) получить не удается. Большинство задач нелинейного взаимодействия УВ с ограничивающими поверхностями поддаются лишь приближенному решению. В этой связи весьма успешным оказался феноменологический подход, основанный на простом допущении, которое пока не имеет фундаментального обоснования [6]. Согласно [6], предположим, что возмущенное состояние за фронтом УВ не оказывает влияния на ее движение, т. е. все изменения в скорости УВ обусловлены взаимодействием фронта с препятствиями. Метод [6] заключается в подстановке условий (2) в уравнение для C_+ -характеристики, получаемое из (1). Решение итогового дифференциального уравнения имеет вид

$$G(M_0) - G(M) = c_f x/r, \quad (4)$$

причем при $\gamma = 1,4$

$$G(M) \approx 4 \frac{0,4M - 1}{M^2 - 1} + 4 \ln(M^2 - 1) + 0,8 \ln \frac{M + 1}{M - 1}. \quad (5)$$

Соотношение (5) представляет собой аппроксимацию точной функции $G(M)$, дающую в диапазоне $1,01 < M < 4$ отклонение меньше 3%. В линейном приближении выражение (4) записывается следующим образом:

$$\frac{\gamma + 1}{2} \left(\frac{1}{M - 1} - \frac{1}{M_0 - 1} \right) = c_f x/r.$$

Для определения области применимости приближенного решения (4) проведено численное интегрирование системы (1) методом сквозного счета с введением искусственной вязкости. На рис. 1 приведены результаты расчетов затухания избыточного давления Δp_f на фронте воздушной УВ с $M_0 = 1,877$ (1) и 1,497 (2). Сплошная кривая — численное решение задачи, штрихпунктирная и штриховая линии — соответственно линейное приближение по (4) и решение по (4), (5).

Расчеты показали, что при $M_0 < 1,5$ имеется удовлетворительное (<10%) согласие линейного приближения и решения (4), (5) с результатами численного анализа. С ростом M_0 прогноз, даваемый линейной теорией, ухудшается, однако точность приближенного решения (4), (5) остается весьма удовлетворительной в широких пределах изменения комплекса $c_f x/r$. Это позволяет предположить, что соотношения (4), (5) применимы для приближенного расчета избыточного давления на фронте УВ первоначального ступенчатого профиля, затухающей в шероховатой трубе. В итоговую формулу (4) входит коэффициент потерь c_f , величина которого неизвестна. Чтобы определить этот параметр и найти его зависимость от размеров шероховатости, проведены эксперименты по гашению УВ в шероховатой трубе.

Экспериментальные исследования

В экспериментах использовали вертикальную ударную трубу ($r = 25$ мм), состоящую из камеры высокого давления длиной 0,5 м и камеры низкого давления (КНД) длиной 1,5 м. Шероховатый участок трубы создавали с помощью сборных вставных каскадов из алюминиевых колец, помещаемых в КНД. Давление в воздушных УВ и их скорость измеряли шестью предварительно откалиброванными пьезоэлектрическими датчиками давления. В опытах варьировали M_0 , шаг установки колец $s = 8, 13, 28, 53, 78, 103$ и 128 мм и их высоту $k = 5$ и 10 мм. Для определения c_f , соответствующего заданной шероховатости, сравнивали экспериментальные кривые затухания с приближенным решением (4), (5). Сначала методом наименьших квадратов находили оптимальное значение c_f для каждого опыта, затем для каждой конфигурации шероховатости рассчитывали среднее значение $c_f(k, s)$ по всем $1,1 \leq M_0 \leq 2$.

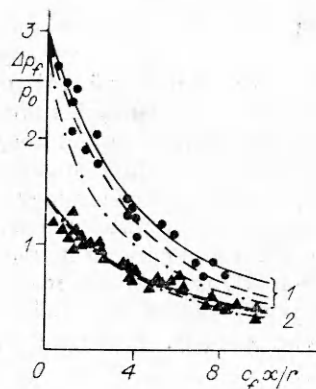


Рис. 1.

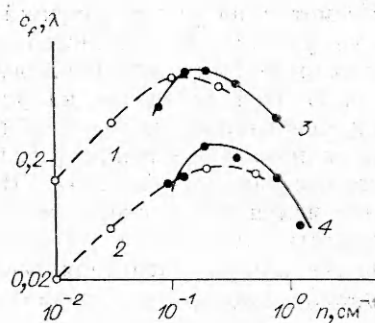


Рис. 2.

Экспериментальные точки для $M_0 = 1,877$ и $1,497$ приведены на рис. 1. Ординаты точек соответствуют измерениям Δp_f . Абсцисса каждой точки рассчитана по среднему значению $c_f(k, s)$ и расстоянию x от начала шероховатого участка до датчика давления. Из рис. 1 следует, что предположение об отсутствии зависимости c_f от M_0 и Re удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными, так как разброс точек меняется незначительно при изменении Δp_f и конфигурации шероховатости. Экспериментальные точки, соответствующие разным уровням потерь, плотно группируются возле расчетной штриховой кривой. Это свидетельствует о том, что параметры M_0 и $c_f x/r$ действительно определяют затухание избыточного давления в УВ.

На рис. 2 приведены зависимости $c_f(k)$ ($k = 10$ (3) и 5 мм (4)) и $c_f(s)$ ($n = s^{-1}$). При $s/k = 5 \div 10$ величина c_f максимальна, т. е. достигается наибольшее затухание УВ. Для сопоставления полученных значений c_f и коэффициента гидравлического сопротивления λ в условиях установившегося течения использовались данные [5], где проведены измерения сопротивления трубы с кольцевыми вставками ($r = 25$ мм) аналогичной конструкции (см. рис. 2, 1, 2). Из сопоставления сплошных и штриховых кривых следует, что коэффициент потерь в нестационарном потоке за УВ достаточно хорошо коррелирует с коэффициентом гидравлического сопротивления трубы в условиях полного проявления шероховатости. Для установившихся течений $c_f' = \lambda/4$. Следовательно, коэффициент c_f в потоке с УВ приблизительно в 4 раза превышает величину c_f' .

Детонация в шероховатых трубах

Найденные зависимости $c_f(k, s)$ позволяют построить замкнутую модель газовой детонации в шероховатой трубе, а также указать пути целенаправленного изменения скорости взрывного превращения и подавления детонации. Применение моделей [2, 3] с учетом полученных результатов помогает объяснить некоторые экспериментальные факты.

На рис. 3 приведены примеры расчетных зависимостей скорости детонации D от плотности установки колец n , построенные по результатам [2, 3] и по рис. 2 (D_0 — скорость идеальной детонации). Кривая 1 соответствует режиму с объемным¹ горением [3] в трубе, $r = 25$ мм,

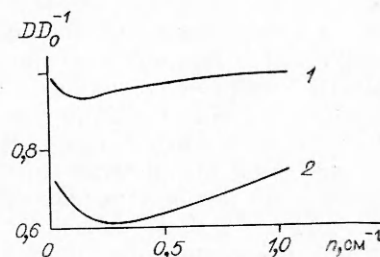


Рис. 3.

¹ Возможность реализации режима объемного горения в трубах с крупными шероховатостями обсуждалась в [7].

$k = 10$ мм, 2 — режим пристеночного горения [2], $r = 25$ мм, $k = 5$ мм. Кинетические параметры реакции горения аррениусовского типа: энергия активации 3,5 МДж/кг, тепловой эффект 2 МДж/кг, предэкспонент 10^{10} с⁻¹, порядок реакции — первый. Кривые $DD_0^{-1}(n)$ имеют ярко выраженный минимум. Аналогичный характер зависимостей $DD_0^{-1}(n)$ отмечен в экспериментах [8]. Таким образом, изменение геометрических размеров шероховатости позволяет регулировать скорость детонации, а наблюдаемый минимум скорости объясняется, по-видимому, максимальным значением коэффициента λ .

Заключение

Проведенные исследования показали, что существует возможность целенаправленного изменения скорости газовой детонации путем выбора соответствующих геометрических характеристик шероховатости. Весьма важно, что при этом можно пользоваться данными о гидравлическом сопротивлении каналов с разными типами препятствий в условиях установившегося потока. Последнее существенно расширяет круг проектных решений при разработке защитных устройств, предназначенных для подавления или ослабления детонационных волн. Кроме того, существуют оптимальные размеры шероховатости данного типа, при которых эффект гашения максимален. Например, при использовании защитного экрана из кольцевых вставок в трубопроводе, подверженном риску возникновения детонации, наиболее эффективна расстановка колец с $s/k = 5 \div 10$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зельдович Я. Б. ЖЭТФ, 1940, 10, 5, 542.
2. Зельдович Я. Б., Гельфанд Б. Е., Борисов А. А. и др. Хим. физика, 1985, 4, 2, 279.
3. Зельдович Я. Б., Гельфанд Б. Е., Каждан Я. М. и др. ФГВ, 1987, 23, 3, 103.
4. Craig J. E., Haines K. // Proc. 12th Symp. (Intern.) on Shock Tubes and Waves.— Jerusalem, 1980.
5. Koch R. VDI-Forschungs-Heft 469.— Dusseldorf: VDI-Verlag, GmbH, 1959.
6. Whitham G. Linear and Nonlinear Waves.— London: Wiley & Sons, 1974.
7. Zel'dovich Ya. B., Borisov A. A., Gelfand B. E. et al. // Dynamics of Explosions/ Ed. A. L. Kuhl et al.— N. Y.: AIAA Inc., 1988.— V. 14.
8. Guenoche H., Manson N. Revue de l'Institute du Petrole, 1949, 2, 53.

г. Москва

Поступила в редакцию 21/X 1988,
после доработки — 10/V 1989

УДК 532.593.539.213

Р. С. Исхаков, В. И. Кирко, А. А. Кузовников, М. Л. Зырянов

ВЛИЯНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВОЙ ОБРАБОТКИ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТЕКОЛ

Известно, что ударно-волновое нагружение кристаллических материалов приводит к появлению в них различного рода дефектов, фазовых превращений [1]. Структура аморфных металлических сплавов (АМС) уже в исходном состоянии насыщена дефектами, поэтому вопрос направленности в них структурных перестроек после нагружения является проблематичным. В [2] изучались ленточные образцы АМС после ударно-волновой обработки с давлением $p \leq 35$ ГПа. Наблюдалась неизменность картин рентгеновской дифракции и микротвердости материала. Вследствие этого сформулирован вывод о том, что в АМС будут проис-