

ности (например, деформацию метки в песте) и может использоваться для расчета отдельных характеристик течения. Для описания же процесса в целом косого соударения металлических пластин с образованием кумулятивной струи необходимо рассматривать модель с более сложной зависимостью между напряжениями и скоростями деформирования.

Авторы выражают благодарность В. П. Урушкину за помощь в проведении экспериментов, С. А. Кинеловскому — за ряд полезных советов в ходе выполнения работы.

Поступила в редакцию 9/VII 1982

#### ЛИТЕРАТУРА

1. М. А. Лаврентьев. УМН, 1957, XII, 4(76).
2. G. Birkhoff, D. McDougall, E. Pugh e. a. J. Appl. Phys., 1948, 19, 563.
3. R. J. Eichelberger. J. Appl. Phys., 1956, 27, 1.
4. С. А. Кинеловский, Ю. А. Тришин. ФГВ, 1980, 16, 5, 26.
5. С. К. Годунов, А. А. Дерибас. Докл. АН СССР, 1972, 202, 5.
6. С. К. Годунов, А. А. Дерибас, В. П. Мали. ФГВ, 1975, 11, 1, 3, 3.
7. В. А. Батищев. ПМТФ, 1980, 1, 62.
8. Дж. Бэтчелор. Введение в динамику жидкости. М.: Мир, 1973.
9. М. В. Рубцов.— В кн.: Динамика сплошной среды. Вып. 51. Новосибирск, 1981.
10. Н. С. Козин, В. И. Мали, М. В. Рубцов. ФГВ, 1977, 13, 4, 619.
11. М. В. Рубцов. ФГВ, 1977, 13, 6, 930.
12. В. А. Симонов. ФГВ, 1971, 7, 2, 280.
13. Н. С. Козин, В. А. Симонов. ФГВ, 1973, 9, 4, 551.
14. М. В. Рубцов. ПМТФ, 1977, 6.

### РАСПРОСТРАНЕНИЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В АЭРОВЗВЕСИ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ

Т. П. Гавриленко, В. В. Григорьев

(Новосибирск)

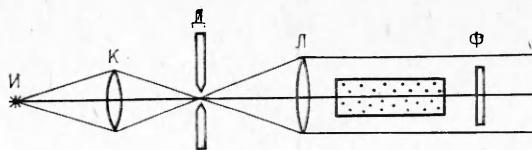
Экспериментальные исследования распространения ударных волн в аэровзвеси твердых частиц ограничиваются, по существу, тремя работами [1—3]. В основном это связано с трудностями получения больших объемов однородной аэровзвеси порошка, размеры частиц которого лежат в диапазоне 40—100 мкм. В работе [1] аэровзвесь порошка получали вбррасыванием порции порошка сверху в вертикально расположенную трубу. Концентрация аэровзвеси определялась весовым методом, т. е. построением зависимости накопления твердой фазы в сосуде от времени работы дозатора. Известно, что полученная таким способом аэровзвесь имеет неоднородную концентрацию как вдоль оси, так и по ее поперечному сечению.

В работе [4] экспериментально показано, что в вертикальном потоке аэровзвеси концентрация в различных местах отличается более чем в 2 раза. Неоднородность концентрации тем выше, чем больше размер частиц и удельный вес материала.

Получить однородную аэровзвесь с заданной концентрацией довольно трудно. Наиболее перспективные способы перевода порошка в аэровзвесь: пневматический (струей воздуха под большим давлением) и механических колебаний. В работе [5] получена довольно однородная по концентрации аэровзвесь при помощи механических колебаний с использованием механического вибратора. Поэтому и в настоящих опытах за основу при создании устройства для получения аэровзвеси выбран способ механических колебаний.

**Устройство для создания аэровзвеси.** Для получения аэровзвеси использован механический вибратор. Металлический канал квадратного сечения с прозрачными окнами на торцах и сбоку перемещался вертикально по направляющим. На валу электродвигателя с варьируемым

Рис. 1. Схема регистрации аэровзвеси теневым методом.



числом оборотов закреплены эксцентрик, который через подшипник, шатун и штангу преобразует вращение вала в вертикальные колебания канала, закрепленного на штапге. Амплитуда колебаний канала определялась формой эксцентрика и могла изменяться от 0,2 до 4 мм, частота вращения двигателя регистрировалась электромагнитным датчиком и частотомером.

В канал вводилась определенная заранее порция порошка, которая при механических колебаниях образует в канале аэровзвесь. Для измерения концентрации аэровзвеси использовался теневой метод (рис. 1): импульсный параллельный пучок света, охватывающий все сечение канала, проходит вдоль (или поперек) оси канала и фиксируется на фотопленку  $\Phi$ . Для получения параллельного пучка использована часть стандартного теплеровского прибора ( $I$  — источник света, импульсная лампа ИФК-250,  $K$  — конденсор из набора линз,  $D$  — круглая диафрагма, расположенная в фокусе длиннофокусной линзы  $L$  ( $F = 1500$  мм, апертура пучка 80 мм)). При таком способе на пленке фиксируется теневая картина аэровзвеси, усредненная по ходу светового пучка. При малых концентрациях получается мгновенная фотография распределения частиц, и последующей обработкой (подсчетом или на микрофотометре) можно определить их мгновенную локальную концентрацию и ее распределение по сечению или вдоль канала.

Предварительно проведенные эксперименты показали, что для получения однородной (с точностью 10%) концентрации аэровзвеси необходимо, чтобы амплитуда скорости колебаний канала была не менее чем

$$v = A\omega = \sqrt{2gl},$$

где  $A$  — амплитуда колебаний;  $\omega$  — круговая частота;  $l$  — высота канала;  $g = 10$  м/с<sup>2</sup>. Задавая  $A$  и  $l$ , вычислим  $\omega$ , обеспечивающую равномерную концентрацию аэровзвеси. В опытах установлено, что однородность концентрации не зависит от количества порошка, загруженного в канал, а при выбранной амплитуде скорости не зависит и от размеров его частиц.

**Постановка экспериментов.** Металлический канал, закрепленный на вибраторе, разделен тонкой мембраной из конденсаторной бумаги на две секции: с аэровзвесью и инициирования. Секция инициирования вакуумировалась, затем заполнялась стехиометрической смесью ацетилена с кислородом до давления 1 атм. В другую секцию загружалось определенное количество порошка, обеспечивающее заданную концентрацию. Включался вибратор, и когда частота колебаний достигала заданной величины, производилось инициирование взрывчатой смеси разрядом конденсатора. В стехиометрической смеси ацетилена с кислородом при начальном давлении 1 атм участок перехода горения в детонацию практически отсутствует, поэтому детонационная волна в секции инициирования формируется практически возле электродов разрядника, достигнув конца секции инициирования, она распадается и по аэровзвеси распространяется ударная волна, параметры которой изменяются по мере распространения. Длина секции инициирования составляла 100 и 300 мм, длина секции с аэровзвесью — 500 мм. Амплитуда колебаний равнялась 1,5 мм, частота 70 Гц. В опытах использованы сфероидизированные порошки: ВК-25 диаметром  $130 \pm 30$  мкм и ВН-30 диаметром  $40 \pm 20$  мкм. Массовое содержание частиц (отношение их массы к общей массе газа) варьировалось от 0 до 5. Однородность концентрации порошка вдоль оси канала дополнительно контролировалась по распределению порошка на дне канала после остановки вибратора.

Вдоль всего канала на расстоянии 100 мм друг от друга установлены инициаторы; два из них в секции инициирования контролировали скорость детонации, а пять в секции с аэровзвесью использовались для измерения скорости ударной волны по мере ее распространения. Относительная погрешность измерения скорости не превышает 3%.

**Распространение ударной волны в аэровзвеси.** Анализ распространения стационарной ударной волны (УВ) в аэровзвеси, проведенный в [6], показал, что позади ударного фронта имеется достаточно протяженная пробка газа с постоянными параметрами, в которой взвешенные частицы ускоряются. С точки зрения термодинамики частицы за фронтом УВ играют двойную роль: прогреваясь в потоке, они отбирают от газа тепло, при трении газа о частицы на их поверхности тепло выделяется. Таким же образом влияют на поток шероховатости на стенках трубы.

За нестационарной УВ крупные частицы (диаметр  $\sim 100$  мкм) приобретают небольшую скорость ( $\sim 100$  м/с), поэтому воздействие частиц на поток можно рассматривать как воздействие на него стенок с шероховатостью, т. е. распространение УВ волны в аэровзвеси эквивалентно ее распространению в трубе с соответственно подобранным гидравлическим диаметром.

В связи с этим для расчета профиля скорости УВ, распространяющейся по аэровзвеси, взята модель, описанная в [7]. В модели использовано решение для точечного взрыва, центр которого совпадает с точкой инициирования детонации в трубе, а энергия точечного взрыва изменяется во времени. Возьмем приведенную в [7] зависимость изменения числа Маха УВ от пройденного волной расстояния  $z$ , длины секции инициирования  $L_0$  и диаметра трубы  $d$ .

$$M - \frac{1}{M} = \left( \tilde{M}_* - \frac{1}{\tilde{M}_*} \right) \hat{z}^{-0.5} \exp(-0.16\kappa\hat{z}) = 20, \quad (1)$$

где  $\tilde{M}_*$  — число Маха УВ после распада детонации, рассчитанное без учета потерь в секции инициирования;  $\hat{z} = z/L_0$ ;  $\kappa = \lambda L_0/d$ ;  $\lambda$  — коэффициент сопротивления. Отсюда

$$M = \theta + \sqrt{\theta^2 + 1}. \quad (2)$$

Для расчетов заменим в формуле (2) диаметр трубы на эквивалентный гидравлический диаметр  $d_r$  — диаметр такого канала, потери давления на единицу длины в котором такие же, как в реальной трубе с аэровзвесью. Для канала без аэровзвеси

$$\begin{aligned} \tau &= \lambda/8 \cdot \rho u^2, \quad F = \lambda/8 \cdot \rho u^2 \pi l d, \\ \Delta p &= F/S = F \cdot 4/\pi d^2 = \lambda \rho u^2 l / 2d. \end{aligned} \quad (3)$$

Для канала с аэровзвесью

$$F = \frac{\lambda}{8} \rho u^2 \pi l d + \frac{1}{2} c_D \rho u^2 \frac{\pi d_r^2}{4} n \frac{\pi d^2}{4} l.$$

Здесь  $d_q$  — диаметр частицы;  $n$  — число частиц в единице объема;  $c_D$  — коэффициент сопротивления, зависящий от числа Маха и Рейнольдса;

$$\Delta p = \frac{F}{S} = \frac{\lambda}{2} \rho u^2 \frac{l}{d} + \frac{1}{2} c_D \rho u^2 \frac{\pi d^2}{4} n l. \quad (4)$$

Из равенства давлений в формулах (3) и (4) следует

$$\frac{4\lambda}{d_r} = \frac{4\lambda}{d} + c_D \pi d_q^2 n$$

или

$$d_r = \frac{4\lambda}{\frac{4\lambda}{d} + c_D n \pi d_q^2}.$$

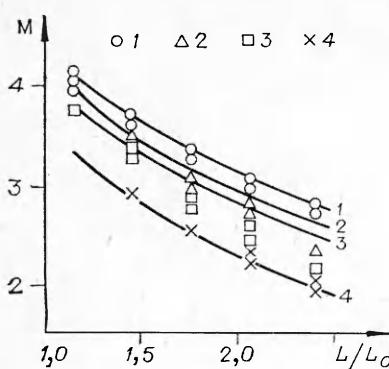


Рис. 2. Затухание УВ в аэровзвеси,  $L_0 = 300$  мм.  
1 — ударная волна в воздухе; 2 — ВК-25,  $\alpha=2,5$ ; 3 — ВК-25,  $\alpha=5$ ; 4 — WC+30% Ni,  $\alpha=5$ .

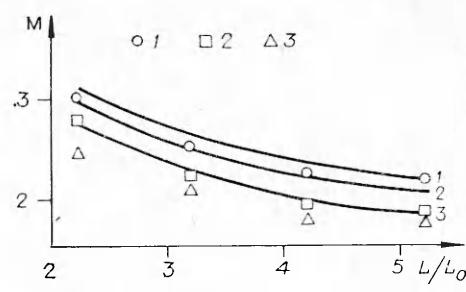


Рис. 3. Затухание УВ в аэровзвеси,  $L_0 = 100$  мм.  
1 — ударная волна в воздухе; 2 — ВК-25,  $\alpha=5$ ; 3 — WC+30% Ni,  $\alpha=5$ .

Концентрацию можно выразить через массу взвешенного в газе порошка, тогда

$$d_r = \frac{1}{\frac{1}{d} + \frac{3}{2} c_D \frac{m_q \rho_r}{m_r \rho_q} \frac{1}{d_q} \frac{1}{\lambda}},$$

где  $\rho_q$ ,  $m_q$  — плотность и масса частиц;  $\rho_r$ ,  $m_r$  — плотность и масса газа.

Подставляя  $d_r$  в (2), можно рассчитать профиль спада скорости УВ. Ясно, что при заданных  $L_0$  и  $d$  при различных  $d_r$  получим различные  $\bar{M}_*$  при распаде детонации, поэтому за  $\bar{M}_*$  будем брать величину, рассчитанную по формуле, когда  $d_r = d$ . Коэффициент сопротивления  $c_D$  изменяется от 0,4 до 1 [6], для расчетов взято 0,63 — среднее геометрическое границ измерения  $c_D$ .

**Обсуждение результатов.** Результаты измерений (точки) и расчетов (кривые) по приближенной модели приведены на рис. 2 и 3, на которых представлены результаты экспериментов при длинах секции инициирования 300 и 100 мм соответственно, для порошка ВК-25 с диаметром частиц  $130 \pm 20$  мкм и порошка WC + 30Ni с диаметром частиц  $40 \pm 20$  мкм при различных массовых соотношениях аэровзвеси.

Из сопоставления данных рис. 2 и 3 видно, что модель [7] пригодна для проведения оценочных расчетов профиля скорости нестационарной ударной волны в аэровзвеси. Наибольшее отклонение численных и измеренных данных равно 20%. Его можно уменьшить, проведя коррекцию модели. В частности, можно скорректировать модель по  $\bar{M}_*$ , учтя потери в трубе при распространении детонации. Для мелких частиц в модели не учитывается ускорение частиц порошка в потоке газа, поэтому расчет по модели будет давать тем большую ошибку, чем легче ускоряются частицы аэровзвеси, т. е. чем меньше их размеры и плотность и чем больше концентрация.

Большие различия между рассчитанными и измеренными данными имеют место до  $M = 2$ , а затем эти различия незначительны, что показано сравнением точного машинного счета и по приближенной модели [7].

Таким образом, применяя механические колебания, можно получать в каналах длиной  $\sim 1$  м однородную аэровзвесь заданной концентрации. Приближенная модель позволяет описать затухание нестационарной ударной волны в аэровзвеси с достаточной для практики точностью, до  $M = 2$  различие в рассчитанных данных не превышает 20%.

В заключение авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность Ю. А. Николаеву и С. А. Ждану за полезные обсуждения и советы.

Поступила в редакцию 22/II 1983

## ЛИТЕРАТУРА

1. А. С. Кауфман, Б. С. Лимонов, С. В. Тараканов.— В кн.: Термофизика и физическая гидродинамика. Сб. трудов Ин-та теплофизики СО АН СССР. Новосибирск, 1978.
2. Н. И. Белугин, Ю. С. Марков.— В кн.: Вопросы математической физики и теории колебаний. Вып. 2. Иваново, 1973.
3. Е. Outa, K. Tajima, H. Morii. Bul. of ISME, 1976, 19, 130.
4. В. Н. Милютин, А. М. Подвысоцкий, А. А. Шрайбер.— В кн.: Физика аэродисперсных систем. Вып. 16. Киев — Одесса: Высща школа, 1977.
5. R. Morse. Ind. Eng. Chem., 1955, 47, 1170.
6. А. П. Алхимов, А. Н. Чапырин, А. Л. Предеин, Р. И. Солоухин. ПМТФ, 1977, 4.
7. Т. П. Гавриленко, В. В. Григорьев, С. А. Ждан и др. ФГВ, 1982, 18, 1.

## ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ГОРЮЧЕЙ ГАЗОВОЙ СМЕСИ НА ПАРАМЕТРЫ ПЛОСКОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ, ГЕНЕРИРУЕМОЙ ПРИ ВЗРЫВЕ В ВОЗДУХЕ

А. П. Войтов, Б. Е. Гельфанд, С. А. Губин,  
В. Н. Михалкин, В. А. Шаргатов  
(Москва)

Расчет параметров ударной волны, генерируемой взрывом горючей газообразной смеси, необходим для предсказания последствий подобных взрывов при аварийных ситуациях. Параметры ударных волн в воздухе изменяются с расстоянием от центра взрыва и определяются размерами области, занимаемой горючей газообразной смесью и ее составом. Анализ параметров ударных волн, возникающих при распаде произвольного разрыва на границе между продуктами детонации (ПД) и воздухом, проводился в работах [1—4]. Численное решение подобной задачи приведено в [3, 4].

Значительный интерес представляет исследование влияния состава горючей смеси на параметры плоской ударной волны в воздухе, генерируемой взрывом. Постановка задачи традиционна и подробно описана в [1, 3].

Рассматривается пространство справа и слева от плоскости симметрии, до расстояния  $x_0$  заполненное реагирующей газовой смесью, а дальше — воздухом. Детонационная волна инициируется вдоль плоскости симметрии. После выхода детонационной волны на границу раздела в воздухе начинает распространяться ударная волна. Для описания возникающего нестационарного течения используются одномерные уравнения газовой динамики в лагранжевых координатах

$$\frac{\partial u}{\partial t} = - \frac{\partial p}{\partial M}, \quad (1)$$

$$v = \frac{\partial x}{\partial M}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} = - \frac{\partial (pu)}{\partial t}, \quad (3)$$

$$E = I + 0,5u^2, \quad (4)$$

$$\frac{\partial x}{\partial t} = u. \quad (5)$$

Здесь  $v$  — удельный объем;  $u$  — массовая скорость;  $p$  — давление;  $I$  — удельная внутренняя энергия;  $t$  — время;  $x$  — пространственная переменная;  $M$  — лагранжева массовая переменная.

Границные условия:

$$\text{при } x = 0 \quad u = 0,$$

$$\text{при } x = Dt \text{ и } t < x_0/D \quad u = u_D, \quad p = p_D, \quad v = v_D,$$