

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ СЛАБЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ПОРИСТЫХ СРЕДАХ НАСЫПНОЙ ПЛОТНОСТИ

Б. Е. ГЕЛЬФАНД, С. П. МЕДВЕДЕВ, А. Н. ПОЛЕНОВ,
Е. И. ТИМОФЕЕВ, С. М. ФРОЛОВ, С. А. ЦЫГАНОВ

(Москва)

В химической, газовой, нефтяной промышленности находят широкое применение огнепреградители с насадками из гранулированных материалов [1]. Существующие полуэмпирические оценки позволяют в каждом конкретном случае выбрать необходимые насадки, обеспечивающие взрывобезопасность технологического процесса. Однако такие оценки не раскрывают механизм взаимодействия волн горения и особенно детонационных волн с насыпными системами в широком диапазоне материала и размера гранул. Между тем в [2—4] и др. показано, что процессы горения и детонации газов в пористых инертных средах существенно отличаются от аналогичных процессов в отсутствие твердой фазы, например аномальные скорости горения и детонации.

Для раскрытия механизма этих явлений представляется важным учитывать газодинамические характеристики насыпных и пористых систем, в частности скорость звука. Однако необходимо отметить, что особенностью течений двухфазных сред газ — частицы является наличие трения и теплообмена между фазами. Это приводит к невозможности существования неустановившихся изэнтропических движений в таких системах.

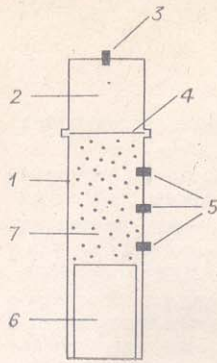
Известно [5], что состояние газа при течении с трением формально можно описать уравнением политропы

$$p\rho^{-n} = \text{const},$$

где p , ρ — давление и плотность газа; n — показатель политропы. Отсюда вводится понятие характеристической скорости данного процесса [5]:

$$(1) \quad u^2 = n p \rho^{-1}.$$

При $n = \gamma$ (γ — отношение удельных теплоемкостей газа), т. е. в случае изэнтропического течения, характеристической будет скорость звука.



Р и с. 1

Вопросу о скорости звука (т. е. скорости распространения малых возмущений давления при постоянной энтропии) в среде газ — частицы посвящено большое количество работ. Их можно разделить на две части. Первая объединяет исследования систем с малой объемной концентрацией твердых (или жидких) частиц. В этом случае газовзвесь представляется эквивалентным газом со скоростью звука [6]

$$(2) \quad a_e^2 = a^2 \Gamma [\gamma (1 + \eta) (1 - \beta)^2]^{-1},$$

где a_e — «равновесная» скорость звука в газовзвеси; a — скорость звука в чистом газе; Γ — отношение удельных теплоемкостей запыленного газа; η — отношение массы частиц к массе газа; β — объемная доля частиц в газовзвеси. Применимость модели [6] к системам с насыпной плотностью, как показано ниже, ограничена.

В [7] теоретически рассмотрено распространение слабых возмущений в умеренно концентрированных газовзвесах с учетом динамической и тепловой релаксации частиц. Однако приведенные соотношения для времен релаксации справедливы лишь при значениях объемной концентрации частиц $\beta < 0,2-0,3$. Принятые в [7] допущения не позволяют применить результаты [7] к системам насыпной плотности с $\beta = 0,65-0,75$.

Другая часть работ посвящена изучению воли сжатия в грунтах и горных породах. Среда описывается континуальными законами механики деформируемого твердого тела [8]. Но здесь используется скорость звука в сплошном материале, что соответствует целям этих работ. Неустановившееся течение смеси газа и зерен грунта при большом объемном содержании грунта рассмотрено в [9]. Однако вопрос о скорости малых возмущений как характеристики сыпучей среды не обсуждается.

Таким образом, представляет интерес проблема определения газодинамических свойств насыпных систем как целого. В данной работе проведено измерение скорости слабого возмущения в форме волны разгрузки в широком диапазоне материала и размера частиц сыпучей среды, а также давления газа в порах.

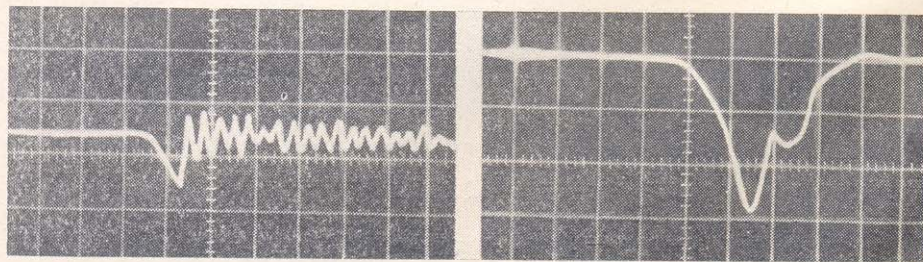
Эксперименты проводились на вертикальной ударной трубе длиной 1,5 м, внутренним диаметром 50 мм (рис. 1). Камера высокого давления (КВД) 1 оснащена тремя пьезоэлектрическими датчиками давления 5. Расстояние от мембраны 4 до первого датчика 21 см, между датчиками 24 см. В КВД толкающий газ — азот или гелий, в камере низкого давления (КНД) 2 — воздух. Вставка 6 использовалась для уменьшения рабочей части трубы, 3 — запускающий датчик. Сыпучая среда 7 помещалась в КВД. После разрыва мембраны (при давлении газа в КВД p_0) по КВД распространялась волна разрежения. Скорость ее головы измерялась с помощью датчиков и запоминающих осциллографов С8-13 на базе 24 и 48 см.

Слабое возмущение моделировалось специально подобранным импульсом разгрузки. Он создавался с помощью КНД длиной 1 см. На рис. 2 представлены типичные осциллограммы импульса разгрузки в газе (верхняя осциллограмма: $p_0 = 0,9$ МПа, 500 мкс в делении горизонтальной шкалы, 0,07 МПа — вертикальной шкалы) и в сыпучей среде (нижняя осциллограмма: $p_0 = 1,9$ МПа, 1000 мкс в делении горизонтальной шкалы, 0,03 МПа — вертикальной шкалы). Видно, что в процессе опытов $\Delta p/p_0 < 0,1$ (Δp — максимальное падение давления в импульсе разгрузки). Выполнение этого неравенства считалось критерием малости данного возмущения.

Для доказательства достоверности методики в отладочных опытах по скорости головы волны разрежения в базе 24 и 48 см измерено значение скорости звука в КВД, заполненной газом — азотом или гелием (98% гелия + 2% воздуха); отмечено полное совпадение измеренных величин с известными — 340 и 950 м/с.

Скорость распространения избранного для исследования импульса разгрузки не зависит от высоты столба сыпучей среды и определяется только свойствами среды. Таким образом, ее можно считать характеристикой данной системы.

В экспериментах варьировались дисперсность и материал частиц насыпной сре-



Р и с. 2

ды (см. таблицу). Для рассеивания использовались калиброванные сита. Средний размер частиц d_0 определялся с помощью измерительного микроскопа. Насыпная плот-

| № п/п | Исследуемое вещество | ρ_p , г/см ³ | ρ_n , г/см ³ | β | d_0 , мм |
|-------|----------------------|------------------------------|------------------------------|---------|------------|
| 1 | Порошок | 2,70 | 0,81 | 0,30 | 0,02 |
| 2 | Песок 1 | 2,45 | 1,78 | 0,73 | 0,20 |
| 3 | Полистирол | 0,60 | 0,43 | 0,70 | 0,35 |
| 4 | Песок 2 | 2,42 | 1,66 | 0,69 | 0,50 |
| 5 | Песок 3 | 2,40 | 1,72 | 0,72 | 0,90 |
| 6 | Пористый полиэтилен | 0,50 | 0,31 | 0,62 | 2,40 |
| 7 | Песок 4 | 2,34 | 1,70 | 0,73 | 3,0 |
| 8 | Гранулы полиэтилена | 0,82 | 0,55 | 0,67 | 4,5 |

ность ρ_n и объемная доля твердой фазы β определялись независимо. Как видно, все исследуемые вещества делятся на две группы: вещества 1, 2, 4, 5, 7 со средней плотностью материала $\rho_p = 2,5$ г/см³; вещества 3, 6, 8 — $\rho_p = 0,65$ г/см³. Каждое вещество в группе отличается только размерами частиц (объемная доля твердой фазы $\beta \approx 0,7$ для всех веществ, кроме 1).

Результаты экспериментов представлены на рис. 3, 4 (в КВД — азот, номера на кривых рис. 3 соответствуют таблице, например, 1 — порошок и т. д.). Ошибка в измерении скорости головы волны разрежения при $p_0 < 2$ МПа менее 20%, при $p_0 \geq 2$ МПа менее 10%. На рис. 3 показана экспериментальная зависимость скорости D головы импульса разгрузки от давления p_0 в системе. Как видно, с увеличением размеров частиц (пор) зависимость от давления ослабляется, а скорость увеличивается. Кривая А построена для веществ 1, 2, 4, 7 по формуле (2), кривая В — для 3, 6, 8. На рис. 4 приведена зависимость скорости D от размера частиц при фиксированных давлениях $p_0 = 0,3; 2,0; 5,0$ МПа (линии 3—1). Видно, что скорость импульса разгрузки в системах 1, 2, 4, 7 и 3, 6, 8 с существенно различными свойствами материалов одинаково изменяется в зависимости от размера частиц (пор). В пределах ошибки эксперимента результаты, полученные для обеих групп веществ, лежат на одной кривой. Причем с изменением давления эта закономерность сохраняется.

Таким образом, скорость распространения малых возмущений в насыпных системах не зависит от материала частиц, а только от их размера (или размера пор между ними) и давления газа в промежутках между частицами.

Формальный подход [5] позволяет сопоставить каждое значение измеренной скорости D с определенной величиной показателя политроны n . Тогда из (1) имеем

$$u = D = (np\rho^{-1})^{0,5},$$

где $n = n(p_0, d_0)$ — функция начального давления в системе и размера частиц (пор).

Из анализа газодинамических уравнений на фронте волны разрежения можно показать, что в случае политропического процесса характер изменения давления со временем в фиксированной точке зависит от показателя политроны n . При $n \geq 1$ имеем классический профиль волны разрежения в газе (см. рис. 2, газ) с хорошо фиксируе-

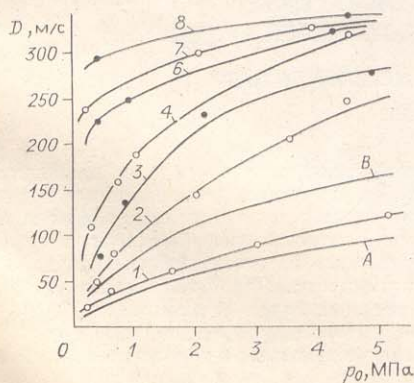


Рис. 3

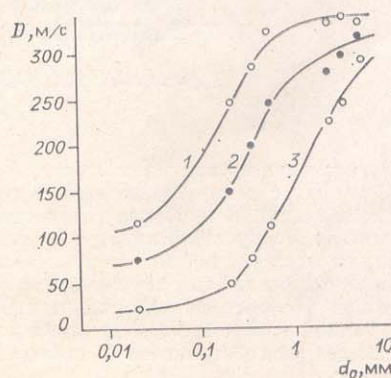
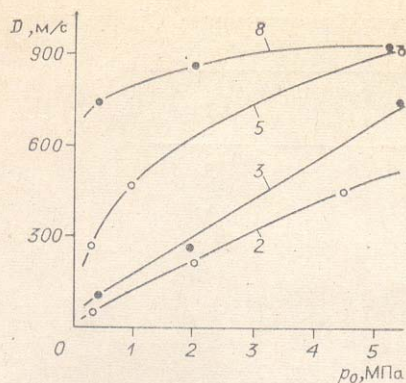


Рис. 4



Р и с. 5

мым слабым разрывом давления на фронте волны. Такие осциллограммы наблюдались в насыпной среде при $D > 290$ м/с (соответствующих $n \geq 1$). При $0 < n < 1$ профиль волны разрежения трансформируется и слабый разрыв отсутствует. Это наблюдалось при $D < 290$ м/с (см. рис. 2, сыпучая среда).

Из сравнения с «равновесной» скоростью звука ясно (см. рис. 4), что при $d_0 < 20$ мкм ($p_0 = 0,1-5,0$ МПа) для оценки скорости малых возмущений давления в насыпных системах можно пользоваться уравнением (2) (с ошибкой 20%). При $d_0 > 2$ мм скорость лежит в диапазоне $D = 250-330$ м/с, т. е.

близка к «замороженной» скорости звука. Для оценок можно принимать ее равной скорости звука в газе (азоте). В диапазоне $d_0 = 0,02-2$ мм лежит «переходная» область, в которой необходимо конкретно учитывать размер частиц (пор).

На рис. 5 представлены зависимости скорости головы импульса разрежения D от начального давления p_0 в насыпной системе при наличии в КВД гелия (смесь 98% гелия + 2% воздуха, $a = 950$ м/с). Видно, что замена газа не влияет на общий характер зависимостей (ср. рис. 3).

ЛИТЕРАТУРА

1. Стрижевский И. И., Заказнов В. Ф. Промышленные огнепреградители. М.: Химия, 1966.
2. Бабкин В. С., Бунев В. А., Коржавин А. А. Распространение пламени в пористых инертных средах.— В кн.: Химическая физика процессов горения и взрыва. Горение газов и натуральных топлив. Черногоровка, 1980.
3. Мамонтов Г. М., Митрофанов В. В., Субботин В. А. Режимы детонации в жесткой пористой среде.— В кн.: Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация. Черногоровка, 1980.
4. Kauffman C. W., Chuanjun Yan, Nicholls J. A. Gaseous detonations in porous media.— Proc. of 19th Symp. (Intern.) on Combustion., Comb. Inst., 1982.
5. Вулпе Л. А. Газовая динамика (стационарные одномерные течения). М.: МАИ, 1949.
6. Rudinger G. Some effects of finite particle volume on the dynamics of gas — particle mixtures.— AIAA J., 1965, v. 3, N 7. Рус. пер. Ракетн. техника и космонавтика, 1965, № 7.
7. Бувевич Ю. А., Федотов С. П. О слабонелинейных возмущениях в концентрированных газовзвесах.— ПМТФ, 1983, № 3.
8. Николаевский В. Н. Механика пористых и трещиноватых сред. М.: Недра, 1984.
9. Христианович С. А. Неустановившееся течение грунтовой массы, содержащей в порах газ высокого давления.— ФТПРПИ, 1982, № 3.

Поступила 18/X 1984 г.