

На фиг. 5 приведены осциллограммы записи давления в ударной волне ($M_0 = 1,5$) при прохождении через шероховатый участок (экран) длиной $L = 50$ см ($s = 91$ мм; $H = 0,43$ м). Расстояние от нижнего торца до датчика 1 — 0,68 м (цена деления вертикальной шкалы 0,04 МПа), до датчика 2 — 0,44 м (0,06 МПа), до датчика 3 — 0,2 м (0,03 МПа). Видно, что после выхода из экрана волна с нарастающим за фронтом давлением трансформируется в стандартную ударную волну ступенчатого профиля с неизменной величиной избыточного давления на фронте и за ним. Эксперименты с другими конфигурациями экранов и другими M_0 подтвердили обнаруженный эффект.

Таким образом, использование экрана в виде каскада колец ограниченной длины позволяет эффективно ослабить ударные волны на выходе из экрана, т. е. уменьшить перепад давления на фронте при сохранении ступенчатого профиля давления. Трансформация профиля давления в стандартную ударную волну сопряженная с потерями импульса на трение газового потока, проявляется только внутри загроможденного участка и в его непосредственной близости. Удаление защищаемого объекта на незначительную длину от экрана снимает неопределенность в форме воздушной волны, обусловленную релаксационным воздействием фрикционных потерь на газовый поток.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гурин А. А., Малый П. С., Савенко С. К. Ударные воздушные волны в горных выработках. М.: Недра, 1983. 223 с.
2. Чеховских А. М., Орлов Н. В., Шапуров А. В. Влияние запыленности воздуха на процесс распространения воздушных ударных волн в горных выработках // Горноспасательное дело. Вып. 5. Донецк, 1972. С. 90—93.
3. Медведев С. П., Поленов А. Н., Гельфанд Б. Е., Цыганов С. А. Воздушные ударные волны при внезапном расширении сжатой двухфазной среды насыщенной плотностью // Физика горения и взрыва. 1987. Т. 23. № 3. С. 135—139.
4. Koch R. Druckverlust and wärmeübergang bei verwirbelter strömung // VDI-Forschungsheft. 1958. B. 24. № 469. 44 S.

Москва

Поступила в редакцию
10.1.1990

УДК 532.546

© 1991 г.

А. П. КУРШИН

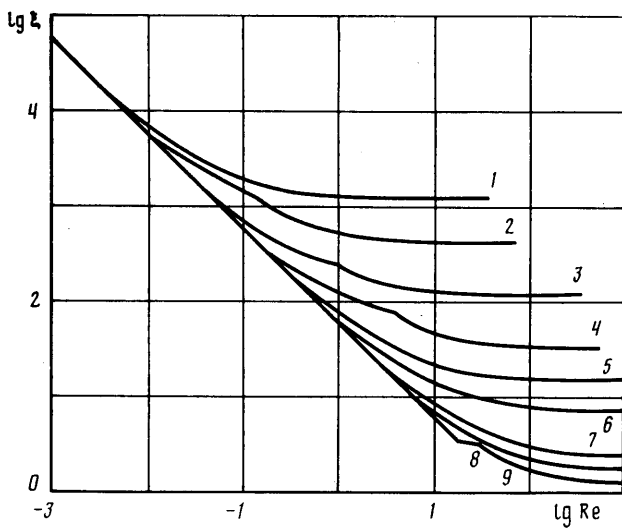
О ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЕ ОБЛАСТИ ЛИНЕЙНОГО ЗАКОНА ФИЛЬТРАЦИИ ПРИ ТЕЧЕНИИ ГАЗА ЧЕРЕЗ ПОРИСТУЮ СРЕДУ

Рассматривается вопрос о зависимости критического числа Рейнольдса Re_1 , характеризующего верхнюю границу применимости линейного закона фильтрации, от других характеристик фильтрующей среды. Показано, что Re_1 уменьшается с ростом безразмерного инерционного коэффициента сопротивления в области режимов развитого инерционного течения β_* . Подавляющее большинство известных экспериментальных данных достаточно хорошо аппроксимируется зависимостью $Re_1 = 7\beta_*^{-1,16}$. Анализируется влияние ошибки в определении Re_1 с помощью предложенного соотношения на погрешность нахождения коэффициента сопротивления фильтрующей среды. Делается вывод о том, что полученное соотношение может быть использовано для определения Re_1 при инженерных расчетах.

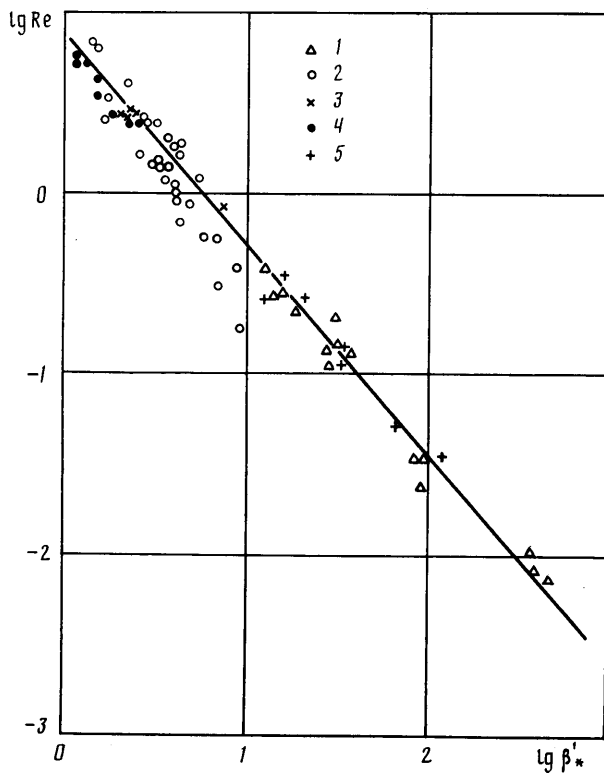
В [1] в результате анализа и обобщения экспериментальных данных [2—10] было показано, что зависимость критического числа Re_1 , характеризующего верхнюю границу применимости линейного закона фильтрации, от других характеристик фильтрующей пористой среды можно представить в виде соотношения

$$Re_1 = 10^{0,5(0,045+n)} d_0^{-0,65} m, \quad Re = \frac{Gd}{\eta m}, \quad d = \sqrt{\frac{32}{\alpha_1 m}}, \quad d_0 = \frac{d}{d_1} \quad (1)$$

Здесь m — пористость среды; G и η — соответственно массовый расход через единичную площадку среды, перпендикулярную направлению фильтрации, и динамическая вязкость фильтруемой жидкости; $d_1 = 1$ м, d — условный диаметр пор среды; $\alpha_1 = 1/k$ — вязкостный коэффициент сопротивления среды в области линейной фильтрации; k — коэффициент проницаемости среды; n — некоторый безразмерный коэф-



Фиг. 1



Фиг. 2

фициент. При этом не удалось установить зависимость величины n от структурных характеристик среды и было предложено для ориентировочных оценок при определении Re_1 с использованием соотношения (1) полагать $n = -0,13$, а в дальнейшем величину n уточнить после проведения новых систематических исследований разнообразных пористых сред по единой методике. Однако к настоящему времени новых данных по исследованию Re_1 не появилось, а необходимость в более точной оценке Re_1 сохраняется. Поэтому подойдем к вопросу выяснения зависимости Re_1 от других параметров, характеризующих фильтрующую пористую среду, с иных позиций.

По данным [11], коэффициент гидравлического сопротивления пористой среды при линейной фильтрации жидкости описывается соотношением $\xi_1 = 64/Re$, а в области переходных режимов течений (с учетом данных на фиг. 2 из [1]) может быть описан соотношением

$$\xi_2 = 64\alpha_0'/Re + \beta_0'.$$

Здесь α_0' , β_0' — постоянные, являющиеся аналогами безразмерных коэффициентов сопротивления; они соответствуют значениям коэффициентов a_2 и b_2 в [1].

Поскольку за верхнюю границу линейной фильтрации принимается значение $Re = Re_1$, которое должно удовлетворять обоим приведенным соотношениям при $\xi_1 = \xi_2$, то получаем

$$Re = 64(1 - \alpha_0')/\beta_0'$$

Из анализа данных [12–15] видно, что безразмерный вязкостный коэффициент сопротивления пористой среды α_0' изменяется для исследованных структур в пределах $0,7 \leq \alpha_0' < 1$, а коэффициент сопротивления β_0' , будучи величиной одного порядка с величиной инерционного безразмерного коэффициента сопротивления в области режимов развитого инерционного течения $\beta_*' = 8\sqrt{2} m^{1,5} \beta_* \alpha_1^{-0,5}$ (см. [11]), —

в диапазоне от единицы до нескольких сотен [11–14], тысяч [15] и в принципе может достигать бесконечности (непроходимое тело). Здесь β_* — размерный инерционный коэффициент сопротивления в области развитых инерционных режимов течения. Если полагать, что коэффициент α_0' отличается от безразмерного вязкостного коэффициента в области линейной фильтрации $\alpha_1' = 1$ (см. [11]) не менее чем на 5%, то величина $1 - \alpha_0'$ в зависимости от структуры пористой среды будет изменяться в диапазоне от $\sim 0,05$ до 0,3 (т. е. в пределах одного порядка). Поскольку β_0' при этом изменяется на много порядков, то из сказанного вытекает, что величина Re_1 в первую очередь определяется величиной β_0' и, следовательно, теми структурными характеристиками фильтрующей среды, которые определяют величину инерционной составляющей коэффициента сопротивления. Параметры же, которые определяют величину вязкостной составляющей, оказывают влияние второго порядка малости.

Высказанные соображения подтверждаются видом зависимостей $\xi = f(Re)$ на фиг. 1, полученных для разнообразных по структуре пористых сред. Графики построены с помощью соотношений (6), (10) из [11], по экспериментальным данным табл. 2, 3 из [11] (зависимости 2–5 — образцы из графитов ППГ, ГМЗер, ГМЗ — ОСЧ; 6 — образец из угля; 8 — образец пористого металла с $m = 0,38$ из шариков сферической формы), табл. 1 из [14] (7 — засыпки из глинозема, силикагеля, активированного угля; 9 — засыпки из полированных шариков) и табл. 4 из [15] (1 — образец из зерна горной породы). Значения безразмерного инерционного коэффициента сопротивления β_*' в области развитых инерционных режимов течения для кривых 1–9 на фиг. 1 были равны соответственно 1120; 445; 30,3; 14,9; 7,14; 2,24; 1,54; 1. Коэффициент β_*' является основной гидродинамической характеристикой пористой среды, которая отображает инерционную составляющую ее гидравлического сопротивления при фильтрации и которая определяет величину коэффициента β_0' . Видно, что величина Re_1 уменьшается с ростом β_*' .

Попытаемся конкретизировать эту связь. На фиг. 2 приведены экспериментальные зависимости $Re_1 = f(\beta_*')$ для разнообразных пористых сред, построенные по данным различных авторов и результатам их обобщений. Здесь экспериментальные точки 1 отвечают графитам (по данным табл. 2 из [11]), 2 — пористым металлам (по данным табл. 3, 4 из [11] и сведениям по Re_1 из [9]), 3 — образцам [6] из керамики, угля (по данным табл. 3 из [11]), 4 — засыпкам (по данным рис. 3 и зависимости (11) из [14]), 5 — песчаникам, алевролитам. Представлены данные для разнообразных по структуре графитов [13] (прошивных с пропиткой каменноугольным пеком с последующим обжигом и графитацией и без таковых, прессованных из различных исходных порошков и т. д.), металлов различной пористости из сферических частиц и разных смесей частиц сферической и неправильной формы, по образцам из шамота, кизельгура, кварца, стекла, угля, по засыпкам из разнообразных по форме (от сферической до кусковой), размерам (от 0,05 до 20 мм) и фракционному составу частиц, по образцам из ядер различных горных пород.

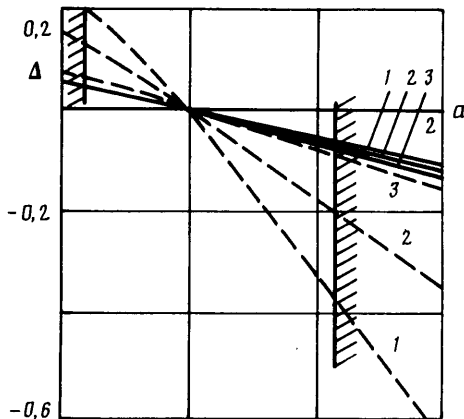
Данные на фиг. 2 можно аппроксимировать соотношением

$$Re_1 = 7\beta_*'^{-1,16} \quad (2)$$

Выпадает из этой зависимости точка, относящаяся к насыщенным образцам из стальных полированных шариков диаметром 2, 4, 6 мм, и несколько точек, относящихся к образцам пористых металлов пористостью $m < 0,25$ из смеси частиц сферической (10 и 20%) и неправильной (90 и 80%) формы. Разброс остальных точек относительно зависимости (2) не превышает $\pm 60\%$.

Погрешность в определении Re_1 приводит к ошибкам при построении зависимости $\xi = f(Re)$ в области переходных режимов течения.

Анализ величин относительных ошибок $\Delta\xi$, выполненный с использованием зависимостей (6), (7), (10) из [11], показал, что $\Delta\xi < \Delta = f(a)$. Графики зависимостей Δ , построенные для случаев $\alpha_*' = 1$ и 3 (сплошные и штриховые линии); $Re_2/Re_1 = 5, 10, 50$ (зависимости 1-3), приведены на фиг. 3. Здесь Re_2 — число Рейнольдса, характеризующее верхнюю границу области переходных режимов течения; $\alpha_*' = \alpha_*/\alpha_1$, α_* — соответственно безразмерный и размерный вязкостный коэффициенты сопротивления пористой среды в области развитых инерционных режимов течения;



Фиг. 3

a — коэффициент, показывающий, во сколько раз число Re_0 , определенное по соотношению (2), отличается от истинного значения Re_1 ($a = Re_0/Re_1$). На фиг. 3 выделены границы диапазона изменения коэффициента a , соответствующие разбросу $\pm 60\%$ экспериментальных данных относительно аппроксимирующей зависимости (2).

В таблице приведены данные о диапазонах изменения коэффициентов α_*' , β_*' и соотношения Re_2/Re_1 , которые зафиксированы при исследовании пористых проницаемых образцов с разнообразными структурами. Учитывая возможные диапазоны изменения этих характеристик, данные на фиг. 3 и широкие диапазоны изменения коэффициента сопротивления ξ с изменением коэффициента β_*' и числа Re ,

Материалы	α_*'	Re_2/Re_1	β_*'	Источники
Засыпки	1-1,4	2-9	1-2,3	[14]
Пористые металлы	1-1,6	6-44	0,8-130	[11]
Керамики	1,13-1,3	8,4-17	2-7	[11]
Графиты	1,02-3	1,3-45	13-460	[11]
Естественные породы	1-4,7	10-42	11-6400	[15]

можно сделать вывод о том, что зависимость (2) достаточно хорошо описывает экспериментальные данные и ее можно использовать для определения Re_1 при инженерных расчетах. При этом нужно учитывать, что в случае специальных образцов, получаемых из полированных шариков, значения Re_1 могут быть несколько выше тех, что вытекают из зависимости (2).

Зависимость числа Re_1 от коэффициента β_*' с физической точки зрения можно объяснить следующим образом. Величина Re_1 для конкретной пористой среды определяется совокупностью тех возмущающих факторов, которые воздействуют на поток при фильтрации (шероховатость стенок пор и каналов, степень изменения формы, извилистости и проходного сечения каналов по длине образца и т. д.). Эти же структурные особенности фильтрующей среды, которые определяют момент начала проявления сил инерции с увеличением скорости фильтрации, вероятно, определяют и величину инерционной составляющей гидравлического сопротивления в области развитых инерционных режимов течения, которая учитывается через коэффициент β_*' . Поскольку факторы, определяющие величину Re_1 и коэффициент β_*' , одни и те же, то представляется логичной зависимость $Re_1 = f(\beta_*')$.

Отметим, что коэффициент β^* для большинства искусственных проницаемых структур, представляющих практический интерес (засыпки и материалы с жесткой структурой — пористые металлы, графиты, волоконные структуры), в первом приближении может быть определен по эмпирическим соотношениям через основные структурные характеристики среды [11, 14].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куршин А. П. Закономерности течения газа через пористые среды с жесткой структурой // Уч. зап. ЦАГИ. 1981. Т. 12. № 6. С. 62–77.
2. Требин Г. Ф. Фильтрация жидкостей и газов в пористых средах. М.: Гостоптехиздат, 1959. 157 с.
3. Grootenhuis P. Flow of gases through porous metal compacts // Engineering. 1949. V. 167. № 4340. P. 291–292.
4. Ward J. C. Turbulent flow in porous media // Proc. Amer. Soc. Civil Eng. J. Hydraulics Division. 1964. V. 90. № 5. Pt. 1. P. 1–12.
5. Бивера Г., Спэрроу Е. Течение через волокнистые пористые среды, не подчиняющиеся закону Дарси // Прикл. механика. 1969. № 4. С. 59–63.
6. Ишкин И. П., Каганер М. Г. Гидравлическое сопротивление пористых сред // Кислород. 1952. № 3. С. 8–21.
7. Каминский Я. А. Движение газов и жидкостей в пористом металлокерамическом материале // Порошковая металлургия. 1965. № 8. С. 55–61.
8. Прокопов В. Г., Шеляг В. Р. Некоторые закономерности течения через пористые металлокерамические системы // Порошковая металлургия. 1970. № 9. С. 34–39.
9. Белов С. В., Поляев В. М., Каргусов О. Г. О пределе применения закона ламинарной фильтрации в пористых металлах // Изв. вузов. Машиностроение. 1971. № 3. С. 72–75.
10. Абдулгабов А. П. О законе движения жидкостей и газов в пористой среде // Изв. вузов. Нефть и газ. 1961. № 4. С. 83–89.
11. Куршин А. П. Гидравлическое сопротивление пористой среды при фильтрации газа // Уч. зап. ЦАГИ. 1985. Т. 16. № 4. С. 73–83.
12. Куршин А. П. Гидродинамические характеристики пористых проницаемых металлокерамик // Тр. ЦАГИ. 1984. Вып. 2230. 42 с.
13. Куршин А. П. Гидродинамические характеристики проницаемых графитов и композиционного материала ТКМ // Химия твердого топлива. 1984. № 3. С. 136–143.
14. Куршин А. П., Гусева Л. В. Гидравлическое сопротивление насыпных слоев при фильтрации жидкости // Теплоэнергетика. 1989. № 10. С. 51–55.
15. Куршин А. П., Гусева Л. В. Экспериментальное исследование фильтрации воздуха через образцы из кернов естественных пород при различных градиентах давления. // Сб. рефератов депонированных рукописей Всесоюз. Ин-та междунар. информации. 1988. Вып. 7. ДО № 7654. 137 с.

Москва

Поступила в редакцию
16.11.1989