

ЛИТЕРАТУРА

1. Левич В. Г. Физико-химическая гидродинамика. М., Физматгиз, 1959.
2. *Sih Ping Hwei, Newman J.* Mass transfer to the rear of a sphere in Stokes flow. J. Heat and Mass Transfer, 1967, vol. 10, No. 12.
3. *Newman J.* Mass transfer to the rear of a cylinder at high Schmidt numbers. J. Ind. and Engng. Chem. Fundament, 1969, vol. 8, No. 3.
4. Воксаян А. Б., Головин А. М., Толмачев В. В. Конвективная диффузия к системе периодически расположенных сфер при малых числах Рейнольдса. ПМТФ, 1966, № 5.
5. Бейтмен Г., Эрдейи А. Высшие трансцендентные функции, т. I. М., «Наука», 1973.

УДК 533.15

ЗОНА СМЕСИ ФИЛЬТРУЮЩИХСЯ ГАЗОВ В РАЗЛИЧНЫХ ПОРИСТЫХ СРЕДАХ

С. Н. БУЗИНОВ, М. А. ПЕШКИН

(Москва)

Приводятся результаты экспериментального исследования зоны смеси последовательно фильтрующихся газов в насыпных неоднородных пористых средах различной проницаемости и в неоднородных слоистых пластах.

Коэффициент дисперсии и длина зоны смеси в пористой среде при фильтрации смешивающихся газов или взаиморастворимых жидкостей зависят от характеристик среды (например, [1, 2]).

Сопоставление экспериментальных данных показало отсутствие единой критериальной зависимости коэффициента дисперсии от чисел Пекле (Pe) или Рейнольдса (Re), определяемых по характерному размеру частиц. В области конвективной дисперсии отмечается влияние формы и размера однородных частиц на коэффициент дисперсии [3-5]. Для сопоставления и обобщения результатов экспериментов в различных пористых средах кроме проницаемости и пористости, позволяющих определить размер «среднего» канала, при рассмотрении неоднородной среды вводят фактор неоднородности или укладки частиц. Значительные трудности возникают при рассмотрении макронеоднородных сред, сред с включениями и слоистых сред.

Ранее было показано влияние коэффициента молекулярной диффузии на процесс перемешивания фильтрующихся газов в насыпных пористых средах различной проницаемости [2] и отмечено смещение области конвективной диффузии в сторону малых чисел Pe и Re для малопроницаемых сред [6].

В данной работе экспериментально исследуется роль абсолютных размеров каналов пористой среды и их неоднородности на интенсивность перемешивания, которая характеризуется коэффициентом дисперсии или длиной зоны смеси.

1. В опытах на трубах диаметром 35 мм, длиной 200 см, набитых кварцевым песком или корундовым порошком различных фракций, азот вытеснялся углекислым газом при давлении $P=8$ атм и различных скоростях фильтрации. Методика проведения опытов была такой же, как в [2].

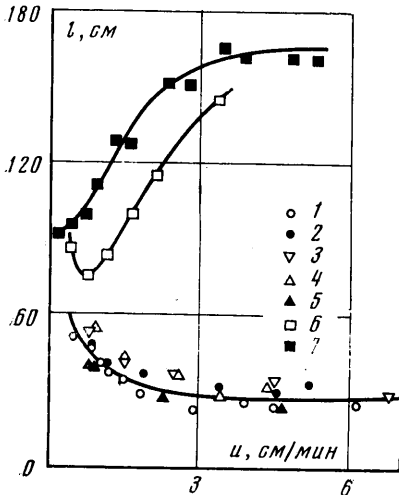
На фиг. 1 представлены экспериментальные данные (кривые 1-7), полученные на различных пористых средах 1-7, характеристика которых дана ниже:

№	Материал	Размер частиц d , мм	d^* , мм	k , г
1	Кварцевый песок	0.08-0.63	0.3	25
2	То же	0.25-0.315	0.28	29
3	»	0.2-0.25	0.22	23
4	»	0.1-0.2	0.15	12
5	Корундовый порошок	-	0.05	2.1
6	То же	-	0.005	0.035
7	»	0.005 и 0.05	0.027	0.050

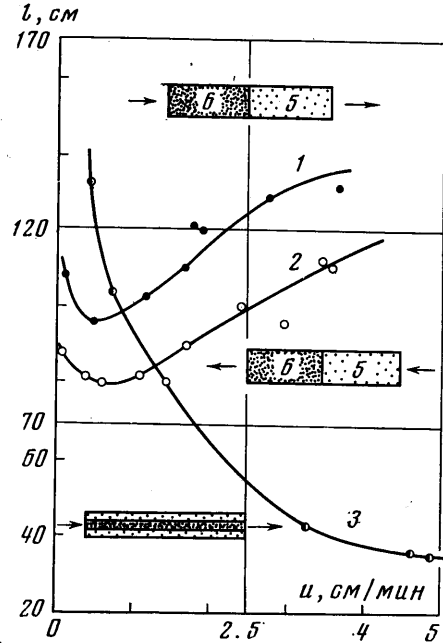
Песок широкой фракции 1, пески узкой фракции 2-4 и однородный корундовый порошок 5, несмотря на различие в проницаемости от $k=29$ г до $k=2.1$ г, дают практически одинаковую зависимость длины зоны смеси l от скорости фильтрации u . Резко отличную зависимость дает мало проницаемая пористая среда из мелкого ко-

рундового порошка 6. Для этой пористой среды характерны большие абсолютные значения длины зоны смеси и более резкое ее изменение со скоростью фильтрации. Возрастание длины зоны смеси с уменьшением скорости фильтрации, свидетельствующее о решающей роли молекулярной диффузии в процессе перемешивания, наблюдается в мало проницаемой модели лишь в области малых скоростей $u < 0.7$ см/мин.

2. Резко неоднородная пористая среда 7 была образована перемешиванием равных весовых частей корундовых порошков со средними размерами частиц $d^* = 0.05$ и 0.005 мм.



Фиг. 1



Фиг. 2

Проницаемость такой смеси $k = 0.50$ г не коррелируется со средним диаметром частиц смеси $d^* = 0.027$ мм и приближается к проницаемости порошка с $d^* = 0.005$ мм, $k = 0.035$ г. Для пористой среды из смеси корундовых порошков зависимость 7 длины зоны от скорости фильтрации в области конвективной дисперсии идет выше аналогичной зависимости для среды 6; примечательно также отсутствие области молекулярной диффузии вплоть до $u = 0.2$ см/мин и постоянство длины зоны при $u > 3.5$ см/мин, что принято связывать с отклонениями от закона Дарси.

Анализ приведенных зависимостей позволяет отметить следующее. Проницаемость пористой среды, размеры слагающих ее частиц и их однородность в широком диапазоне их изменения ($k = 2 \div 30$ г $d^* = 0.05 \div 0.28$ мм) не влияют на размер зоны смеси, если поровые каналы сравнительно велики и не подавляют молекулярную диффузию. Дальнейшее уменьшение проницаемости до $k = 0.035$ г ($d^* = 0.005$ мм) резко увеличило размеры зоны смеси и вид ее зависимости от скорости фильтрации, что может быть объяснено влиянием поровых каналов на молекулярный перенос, сокращением длины свободного пробега молекул и возникновением кнудсеновской диффузии. При «малых» размерах каналов, малой проницаемости большое значение имеет однородность пористой среды. Следует заметить, что разделение каналов на «малые» и «большие» носит условный характер и определяется только коэффициентом молекулярной диффузии фильтрующих газов, который зависит от давления и температуры.

3. Влияние макронеоднородности пористой среды на величину зоны смеси исследовалось на двух слоистых моделях. Первая, имитирующая последовательную неоднородность, представляла собой трубу, половина которой была набита корундовым порошком 5, а вторая половина — порошком 6. Зависимость длины зоны смеси от скорости фильтрации при вытеснении углекислым газом азота сначала из мало проницаемой среды 6 ($k = 0.035$ г), а затем из хорошо проницаемой среды 5 ($k = 2.1$ г), как следует это из фиг. 2 (кривая 1), идет значительно выше зависимости, полученной при обратном направлении вытеснения (кривая 2). Результаты этого эксперимента согласуются с расчетом, основанным на известной зависимости $l = A\sqrt{L}$, где l — длина зоны смеси, L — пройденный путь, A — постоянная, зависящая от характеристик пористой среды и скорости фильтрации.

При фильтрации из среды 6 в среду 5 размер зоны смеси на выходе равен

$$l_{\Sigma 6-5} = A_5 \sqrt{L_5 + L_6} + (A_6 - A_5) \sqrt{L_6}$$

при обратном направлении фильтрации

$$l_{\Sigma 5-6} = A_6 \sqrt{L_5 + L_6} - (A_6 - A_5) \sqrt{L_5}$$

Разница в длинах зон

$$\Delta l = l_{\Sigma 6-5} - l_{\Sigma 5-6} = (A_6 - A_5) (\sqrt{L_6} + \sqrt{L_5} - \sqrt{L_6 + L_5})$$

при

$$L_5 = L_6, \quad \Delta l = (A_6 - A_5) (2\sqrt{L} - \sqrt{2L})$$

Так как $A_6 > A_5$, то $\Delta l > 0$, т. е. длина зоны смеси при течении сначала через мало проницаемую среду, а затем через хорошо проницаемую при равных длинах пути больше, чем при обратном направлении течения.

4. Вторая модель представляла собой две соосные трубы: внутренняя труба $\varnothing 26$ мм была набита корундовым порошком 6, а кольцевое пространство между внутренней и наружной трубой было набито корундовым порошком 5. Входное и выходное сечения являются общими для обоих потоков и общая проницаемость такой модели $k = 0.84$ г. Величина произведения проницаемости на площадь поперечного сечения фильтрационного потока у наружной кольцевой части модели примерно в 40 раз больше, чем у внутренней. Вследствие этого влияние замедленных процессов перемешивания во внутренней мало проницаемой пористой среде на общую характеристику зависимости зоны от скорости фильтрации, как это следует из фиг. 2, начинает сказываться все сильнее с уменьшением скорости (кривая 3). Как показывают кривые, концентрация вытесняющего углекислого газа — относительный объем прошедшего газа, мало проницаемая внутренняя среда не сказывается на начале зоны смеси и существенно меняет ее «хвост», причем тем сильнее, чем меньше общая скорость фильтрации. Опыт на моделях с неоднородной пористой средой иллюстрирует влияние различной интенсивности процессов перемешивания в отдельных зонах пласта на величину общей зоны смеси. Авторы благодарны В. Н. Николаевскому за обсуждение результатов работы.

Поступила 26 II 1976

ЛИТЕРАТУРА

1. Николаевский В. Н. Конвективная диффузия в пористых средах. ПММ, 1959, т. 23, вып. 6.
2. Бузинов С. Н., Пешкин М. А. Некоторые экспериментальные данные о вытеснении газа газом из пористой среды. Изв. АН СССР, МЖГ, 1974, № 4.
3. Harleman D. R. F., Mehlhorn P. F., Rumer R. R. Jr. Dispersion-permeability correlation in porous media. J. Hydraul. Div. Proc. Amer. Soc. Civie Engrs, 1963, vol. 89, No. 2, pt 1.
4. Edwards M. F., Richardson J. F. Gas dispersion in packed beds. Chem. Engng Sci., 1968, vol. 23, No. 2.
5. Greenkorn R. A., Kessler D. P. Dispersion in heterogeneous nonuniform anisotropic porous media. Ind. and Engng Chem., 1969, vol. 61, No. 9.
6. Бузинов С. Н., Пешкин М. А. О коэффициенте дисперсии при вытеснении из пористой среды газа газом. ПМТФ, 1975, № 4.

УДК 533.6.011.35

ПУЛЬСАЦИИ ДОННОГО ДАВЛЕНИЯ ЗА ЦИЛИНДРОМ И ДИСКОМ ПРИ ОБТЕКАНИИ ДОЗВУКОВЫМ ПОТОКОМ

В. М. КУПЦОВ, С. И. ОСТРОУХОВА

(Москва)

В настоящей работе проведено экспериментальное исследование пульсаций донного давления за длинным цилиндром ($l/d \approx 5 \div 10$) и тонким диском ($l/d \approx 0.0$). На основании полученных данных и результатов работ других авторов обобщены спектральные и корреляционные характеристики пульсаций донного давления за осесимметричными телами при числе Маха $M \leq 1.0$.