

О КОЭФФИЦИЕНТЕ ДИСПЕРСИИ ПРИ ВЫТЕСНЕНИИ ИЗ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ ГАЗА ГАЗОМ

С. Н. Бузинов, М. А. Пешкин

(Видное)

Приводятся зависимости коэффициента дисперсии от числа Пекле, полученные при обработке экспериментальных данных по вытеснению газа газом из пористой среды различной проницаемости.

Вытеснение газа газом из пористой среды имеет место во многих технологических процессах, в частности при разработке газоконденсатных месторождений путем обратной закачки сухого газа (сайклинг-процесс). Физическая картина вытеснения газа газом из пористой среды во многом аналогична смешивающемуся вытеснению жидкостей, но может существенно отличаться по количественным характеристикам, так как коэффициент диффузии газа при нормальном давлении на четыре порядка, а при пластовом давлении на два порядка больше, чем коэффициент диффузии жидкостей.

Зависимость коэффициента дисперсии при смешивающемся вытеснении жидкостей от различных факторов рассматривается в связи с необходимостью определить размер зоны смеси при разработке нефтяных месторождений.

Многочисленные экспериментальные данные обобщены и представлены в виде критериальной зависимости [1, 2]

$$(1) \quad \frac{D}{D_0} = \frac{1}{E} + \varphi \left(\frac{du}{D_0} \right)^n,$$

где D — коэффициент дисперсии; D_0 — коэффициент молекулярной диффузии; u — скорость фильтрации; d — средний размер частиц пористой среды; E — коэффициент извилистости; φ , n — коэффициенты, зависящие от характера пористой среды и ее однородности.

Графическое изображение зависимости $\frac{D}{D_0} = f\left(\frac{du}{D_0}\right)$ позволяет выделить область, где определяющей является молекулярная диффузия ($\frac{D}{D_0} = \text{const}$), и область конвективного перемешивания ($\frac{du}{D_0} \geq 10^{-1}$), где $\frac{D}{D_0} \sim u^n$.

Эксперименты с различными пористыми средами показали, что коэффициенты в уравнении (1) могут колебаться в весьма широких пределах. Например, коэффициент извилистости для большинства насыпных сред $E=1,5$, для некоторых песчаников, доломитов и известняков он возрастает до 10 и более [3]. Это значит, что в области молекулярной диффузии расчетная оценка коэффициента дисперсии может привести к ошибке в 10 раз, а в оценке длины зоны смеси — в 3 раза. Показатель степени n в уравнении (1) по данным [1] колеблется в пределах $1,17 \div 1,24$, а по данным [4] $n=1,0 \div 1,5$, т. е. ошибка в оценке коэффициента в области конвективной дисперсии, например при $\frac{du}{D_0} = 10^1$, может возрасти в 3 раза. Такое большое

различие в коэффициентах дисперсии для одних и тех же чисел Пекле $\frac{du}{D_0}$ принято объяснять фактором неоднородности пористых сред. При существующем уровне знаний расчетная оценка коэффициента дисперсии и длины зоны смеси из-за малой точности весьма затруднительна.

Коэффициент дисперсии при вытеснении из пористой среды газа газом экспериментально изучен недостаточно. Известны результаты одного опыта [1], который проводился на хорошо проницаемой пористой среде ($k=15g$) в области преобладающего влияния молекулярной диффузии, совпадающие с обобщенной зависимостью для жидкостей. Предполагалось, что эта зависимость справедлива и для области конвективного перемешивания.

Ниже излагаются результаты экспериментов по вытеснению газа газом из пористой среды, предпринятых для изучения особенностей этого процесса.

Исследование вытеснения газа газом из пористой среды проводилось в трубах диаметром 50 и 35 мм, длиной 2 и 3 м, набитых кварцевым песком различного фракционного состава. Проницаемость образцов $k=23, 12 g; 400, 128$ и $18 mg$. В большинстве опытов азот вытеснялся углекислым газом. Состав газовой смеси на выходе из трубы определялся путем анализа проб на газоанализаторе ВТИ-2, который работает по принципу поглощения углекислого газа раствором едкого калия.

Некоторое количество опытов проводилось при вытеснении аргона азотом и азота или аргона метаном. В этом случае состав газовой смеси на выходе определялся хроматографом. Газ в трубу поступал из баллонов через редуктор, поддерживающий постоянное давление. На выходе из трубы два последовательных регулировочных крана позволяли предварительно выбрать желаемый расход газа. За этими кранами устанавливались последовательно подключаемые стеклянные пинетки для отбора проб газа и газовый счетчик. Давление газа в магистралях установки и в различных точках трубы измерялось образцовыми манометрами.

Основные опыты заключались в определении количества извлеченного из образцов газа и его состава на выходе при постоянном давлении на входе ($p=15 \div 2 ат$) для различных скоростей фильтрации. Методически опыты проводились таким образом, что при установившемся режиме фильтрации одного газа одновременно закрывался кран на подводящей магистрали и открывался кран на магистрали подачи газа-вытеснителя, давление которого предварительно устанавливалось равным давлению вытесняемого газа. Момент переключения подачи газа являлся начальным моментом опыта по вытеснению. По результатам каждого эксперимента строилась зависимость изменения концентрации газовой смеси по времени. Эта зависимость использовалась для определения коэффициента дисперсии по формуле Хиеричи [5], которая получена из решения дифференциального уравнения диффузии с конвективным членом при вероятном распределении концентрации

$$D = \frac{1}{T} \left(u \frac{t_2 - t_1}{3,625} \right)^2,$$

где t_1 , T , t_2 — время от начала опыта до момента достижения концентрации 10, 50 и 90%.

Образцы проницаемостью $k=23$ и $12 g$ были набиты кварцевым песком фракционного состава $0,2 \div 0,25$ и $0,1 \div 0,2$ мм, для подсчета критерия

Пекле принималось среднее значение диаметра частиц $d=2,25 \cdot 10^{-2}$ и $1,5 \cdot 10^{-2}$ см.

Для образцов, набитых песком широкой фракции ($k=18, 128$ и 400 мг), средний диаметр частиц условно определялся по проницаемости k и по пористости m .

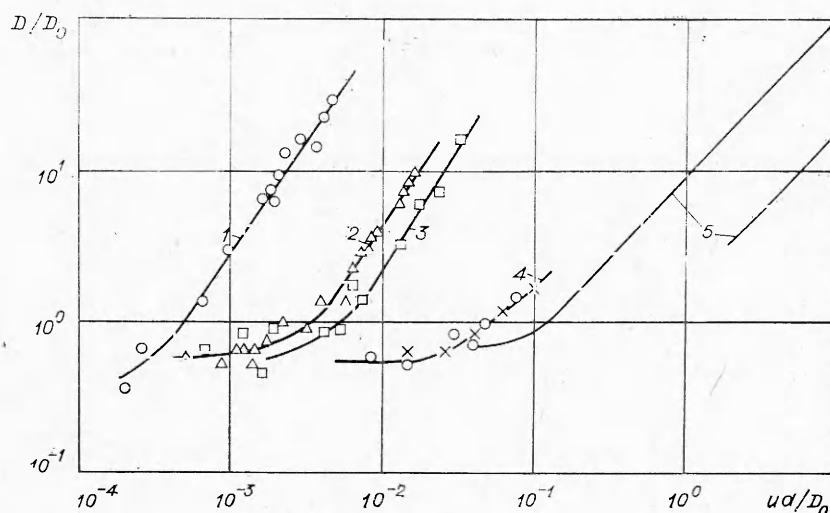
Подсчет среднего диаметра частиц производился по формулам Козени, Терцаги и Юрена [6], а экспериментальные коэффициенты в них были предварительно определены по данным для образцов, набитых песком известной фракции [1, 2].

Газы	D_0 , см ² /с
N ₂ —CO ₂	0,158
N ₂ —Ar	0,191
CH ₄ —Ar	0,200

Расчеты по трем формулам дают близкие значения среднего условного диаметра частиц, которые для данных образцов были приняты равными $0,9 \cdot 10^{-3}$; $2,3 \cdot 10^{-3}$ и $4,35 \cdot 10^{-3}$ см. Неточность в определении среднего условного диаметра частиц пористой среды может сказаться на величине критерия Пекле, но не на ее порядке.

Коэффициенты молекулярной диффузии различных пар газов, использовавшихся в опытах, при давлении 1 ат и температуре 15°C приведены в таблице [7]. Коэффициент молекулярной диффузии газов подсчитывался по зависимости $D_0 p = \text{const}$.

Результаты обработки опытов по вытеснению газа газом на пяти образцах различной проницаемости представлены на фигуре (для $k=18; 128; 400$ мг и 12; 23 г, кривые 1—4 соответственно). Там же для сравнения нанесены общеизвестные экспериментальные зависимости, полученные при смешивающемся вытеснении жидкостей [1] (кривые 5).



Обращает на себя внимание то, что изменение характера зависимости относительного коэффициента дисперсии от числа Пекле, т. е. граница между областями молекулярной диффузии и преобладающего влияния конвективного перемешивания, при вытеснении газа газом зависит от проницаемости пористой среды. Если для хорошо проницаемых пористых сред ($k=29$ и 12 г) эта граница соответствует числам Пекле $\frac{u \cdot d}{D_0} \approx 10^{-2}$,

что согласуется с зависимостью для смешивающегося вытеснения жидкостей, то для сравнительно малопроницаемых пористых сред эта граница смещается в область чисел Пекле 10^{-3} (для $k=128$ и 400 мг) и даже 10^{-4} (для $k=18$ мг).

Увеличение коэффициентов дисперсии со скоростью фильтрации у трех малопроницаемых образцов происходит примерно с одинаковой интенсивностью, и показатель степени в уравнении (1), определенный по представленным на фигуре зависимостям, оценивается величиной $n=1,5$.

Расхождение экспериментальных кривых на фигуре для образцов различной проницаемости может быть следствием некоторого произвола в определении числа Пекле по условному диаметру частиц без учета характера укладки, фактора неоднородности и других особенностей пористой среды. Однако тенденция к увеличению коэффициента дисперсии с уменьшением среднего диаметра частиц при одинаковых числах Пекле не вызывает сомнения. Этот экспериментальный факт отмечался ранее [8].

В области преобладающего влияния молекулярной диффузии получены величины $\frac{D}{D_0} = 0,5 \div 0,6$, а не обычно приводимые в литературе $\frac{D}{D_0} = \frac{1}{E} = 0,7$ для пористых сред большей проницаемости.

Авторы благодарны Н. П. Батуриной и Л. Н. Демидовой за участие в проведении и обработке экспериментов и В. М. Рыжику за обсуждение результатов работы.

Поступила 25 XI 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. Blackwell R. I., Rayne I. R., Terry W. W. Factors influencing the efficiency of miscible displacement.— «Trans. of AIME», 1959, vol. 216.
2. Pfannkuch H. O. Contribution a l'étude des déplacements de fluides miscibles dans un milieu poreux.— «Revue de l'Institut Français du Pétrole», 1963, 11, vol. XVIII, N 2.
3. Carman P. C. Flow of gases through porous media, 1956.
4. Legatski M. W., Katz D. L. Dispersion coefficients for gases flowing in consolidated porous media.— «Soc. Petr. Eng. J.», 1967, vol. 7, N 1.
5. Хиеричи Г. П. Вытеснение нефти из скважин с помощью углеводородов, смешивающихся с нефтью. ГОСИНТИ, 1961.
6. Пирсон С. Д. Учение о нефтяном пласте. Гостехиздат, 1961.
7. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М., Физматгиз, 1963.
8. Hassinger R. C., Rosenberg D. I. A mathematical and experimental examination of transverse dispersion coefficients.— «Soc. Petr. Eng. J.», 1968, vol. 8, N 2.