

## ЛИТЕРАТУРА

1. Полубаринова-Кочина П. Я. Теория движения грунтовых вод. М., Гостехиздат, 1952.
2. Градштейн И. С., Рыжик И. М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. М., Физматгиз, 1963.

УДК 533.15

### НЕКОТОРЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ О ВЫТЕСНЕНИИ ГАЗА ГАЗОМ ИЗ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ

С. Н. БУЗИНОВ, М. А. ПЕШКИН

(Москва)

В связи с разработкой газоконденсатных месторождений методом обратной закачки сухого газа приводятся результаты экспериментального исследования вытеснения газа газом на трубных моделях однородных пористых сред различной проницаемости.

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.

Основной интерес в таком процессе представляет зона смеси, протяженность которой определяет необходимое количество вытеснителя для полного извлечения исходного продукта. Длина зоны смеси зависит от таких факторов, как скорость фильтрации, продолжительность процесса, характеристики пористой среды и физические свойства жидкости.

Вытеснение смешивающихся жидкостей одинаковой вязкости и плотности из пористой среды описывается уравнением диффузии с конвективным членом, из которого следует зависимость длины зоны смеси  $l$  от коэффициента дисперсии  $D$  и времени процесса  $t$

$$(1) \quad l \sim \sqrt{Dt} = \sqrt{DLu^{-1}}$$

где  $L$  — путь вытеснения, а  $u$  — скорость.

Исследования [1-4], проведенные в основном на жидкостях, показали, что увеличение длины зоны смеси пропорционально корню квадратному из пройденного расстояния.

Коэффициент дисперсии для различных фильтрационных систем определяется обычно экспериментальным путем и его зависимость от параметров процесса принято выражать в критериальной форме

$$(2) \quad D/D_0 = 1/E + \varphi(d_p u/D_0)^n$$

где  $D_0$  — коэффициент молекулярной диффузии,  $d_p$  — средний размер частиц пористой среды,  $E$  — коэффициент извилистости,  $\varphi$  и  $n$  — коэффициенты, зависящие от характера пористой среды и ее однородности. Графическое изображение результатов экспериментов в виде зависимости  $D/D_0 = f(d_p u/D_0)$  позволяет указать область, где определяющей является молекулярная диффузия ( $D/D_0 = \text{const}$ ), и область конвективного перемешивания ( $d_p u/D_0 \geq 10^{-1}$ ), где  $D/D_0 \sim u^n$ .

Эксперименты с различными пористыми средами показали, что коэффициенты в (2) могут колебаться в весьма широких пределах. Так, например, коэффициент извилистости для большинства насыпных сред  $E \approx 1.5$ , однако для некоторых песчаников, доломитов и известняков он возрастает до 10 и более [5]. Это означает, 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 (2) по данным [6] колеблется в пределах  $n = 1.17 \div 1.24$ , а по данным [7]  $n = 1.0 \div 1.5$ . Это означает, что в области конвективной дисперсии ошибка в оценке коэффициента дисперсии может достигать, например, 30 раз при  $d_p u/D_0 = 10^{-1}$  и 3 раз при  $d_p u/D_0 = 10$ . Такое большое различие в коэффициентах дисперсии для одних и тех же чисел  $d_p u/D_0$  принято объяснять прежде всего фактором неоднородности пористых сред. При существующем уровне знаний расчетная оценка коэффициента дисперсии и длины зоны смеси из-за малой точности не целесообразна.

Многочисленные лабораторные эксперименты, проведенные с жидкостями на сравнительно хорошо проницаемых пористых средах, показывают либо неизменность, либо некоторое увеличение длины зоны смеси с увеличением скорости фильтрации. Обработка экспериментальных данных единственным автором данной статьи исследования смещения газов в пористой среде [8] показала, что увеличение скорости фильтрации приводит к увеличению длины зоны смеси при давлении более 71 *ата* и уменьшению при давлении менее 36 *ата*.

Нет единства и в оценке влияния характеристик пористой среды на длину зоны смеси. Авторы [9] считают, что длина зоны смеси не зависит от проницаемости, а в [2] отмечено резкое увеличение длины зоны смеси у цементированного ядра малой проницаемости по сравнению с длиной зоны у насыщенного ядра большой проницаемости.

Исследование вытеснения газа газом из пористой среды проводилось на моделях в виде набитых кварцевым песком различного состава труб диаметром 50 мм, длиной 1, 2 и 3 м. В большинстве опытов азот вытеснялся углекислым газом. Состав газовой смеси на выходе из модели определялся путем анализа проб на газоанализаторе ВТИ-2, который работал по принципу поглощения углекислого газа раствором едкого калия.

Несколько опытов проведено при вытеснении аргона азотом и азота или аргона метаном. В этом случае состав газовой смеси на выходе определялся хроматографом. Газ в модель поступал из баллонов через поддерживающий постоянное давление редуктор и систему запорных кранов. На выходе из модели кроме запорных имелись два последовательных регулировочных крана, которые позволяли предварительно выбрать желаемый расход газа. За этими кранами устанавливались последовательно подключаемые стеклянные пипетки для отбора проб газа и газовый счетчик. Давление газа в магистралях установки и в различных точках модели измерялось образцовыми манометрами. Физические свойства использовавшихся газов приведены в таблице. При постоянном давлении на входе в модель и фиксированном положении

Газ	$\mu$	$\nu \cdot 10^{-7}$ г/см·сек, $p=13.5$ <i>ата</i> , $t=20^\circ$ С	$D_0$ , см <sup>2</sup> /сек, $p=1$ <i>ата</i>
N <sub>2</sub>	28	1790	0.178
CO <sub>2</sub>	44	1527	0.0965
Ar	40	2250	0.157
CH <sub>4</sub>	16	1107	0.200

нии регулирующего крана на выходе вытеснение одного газа другим может привести к изменению расхода в пределах от  $\nu_1/\nu_2$ , если гидравлическое сопротивление установки определяется пористой средой, до  $\sqrt{\mu_2/\mu_1}$ , если сопротивление установки определяется краном на выходе, что имело место в большинстве опытов.

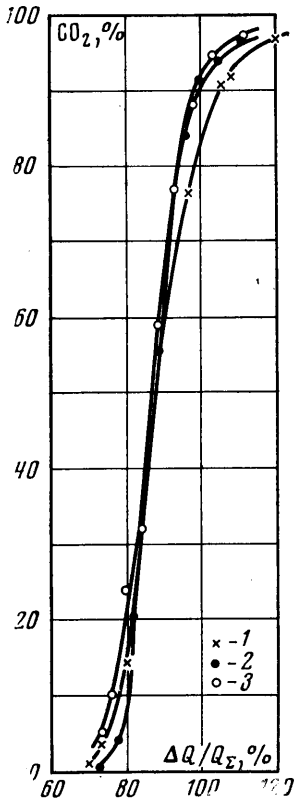
В опытах определялось количество извлеченного из модели газа и его состав на выходе при постоянном давлении на входе ( $p=12.5$  и 2 *ату*) для различных скоростей фильтрации; давление по длине модели при этом менялось незначительно. При установившемся режиме фильтрации одного газа одновременно закрывался кран на подводящей магистрали и открывался кран на магистрали подачи газа — вытеснителя, давление которого предварительно устанавливалось равным давлению вытесняемого газа. Момент переключения подачи газа был начальным моментом опыта по вытеснению.

По результатам экспериментов подсчитывались запас газа в модели  $Q_2$ , скорость фильтрации  $u$ , коэффициент газоотдачи  $\beta$  и длина зоны смеси  $l$ . Коэффициент газоотдачи  $\beta = \Delta Q_1 / Q_2$ , где  $\Delta Q_1$  — количество газа, вытесненного из модели до момента, когда содержание газа-вытеснителя в смеси становится равным 10%. Длина зоны смеси  $l$  определялась как длина части модели, в которой при пластовом давлении содержание газа-вытеснителя изменялось от 10 до 90%. Эта длина при практически неизменном давлении подсчитывалась так:  $l = \Delta Q_2 B_0 / mFP$ ; где  $m$  — пористость,  $F$  — площадь сечения трубной модели,  $p$  — среднее давление в модели,  $B_0$  — атмосферное давление,  $\Delta Q_2$  — количество газа, вытесненное из модели при изменении содержания газа-вытеснителя на выходе от 10 до 90%.

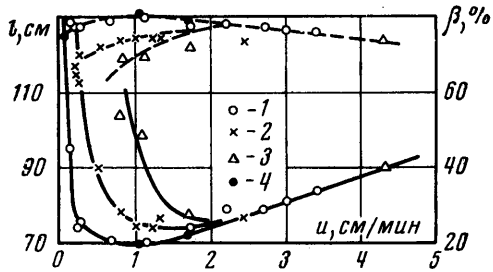
Типичные кривые изменения концентрации углекислого газа (газа-вытеснителя) на выходе из трехметровой модели, заполненной азотом, с проницаемостью  $k=128$  мд для трех скоростей фильтрации представлены на фиг. 1. Точки 1, 2, 3 соответствуют  $u=0.13, 1.13, 3.0$  см/мин. Для смещения при вытеснении из пористой среды характерно, что задняя граница зоны смеси газов значительно более растянута, чем

передняя, и больше подвержена изменению при изменении параметров процесса. Определение малых концентраций в газовой смеси связано с ошибками, и поэтому при расчете длины зоны смешения принято условно характеризовать границы зоны концентрациями 10 и 90%. Если за границы зоны смеси принять концентрации 5 и 95%, то, как показала обработка результатов многочисленных опытов, длина зоны будет в среднем в 1.4 раза больше.

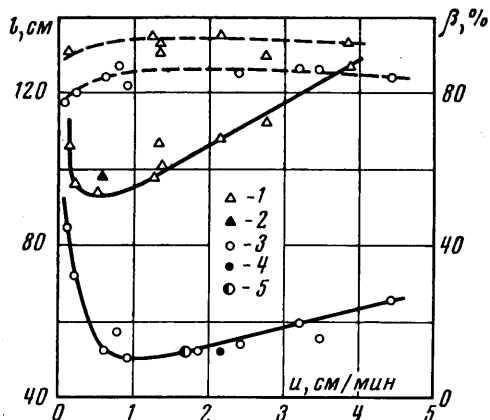
Изменение длины зоны смеси  $l$  и коэффициента газоотдачи  $\beta$  с изменением скорости для этой же модели представлено на фиг. 2. Точки 1, 2, 3 соответствуют вытеснению  $\text{CO}_2 \rightarrow \text{N}_2$  при давлении 13.5, 5 и 3 *ата*, а точки 4 – вытеснению  $\text{CH}_4 \rightarrow \text{Ar}$  при давлении 13.5 *ата*. Можно выделить следующие характерные области на представленных зависимостях. Для давления  $p=13.5$  *ата* при скоростях фильтрации больше



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3

1.5 *см/мин* (21.6 *м/сут.*) увеличение скорости приводит к прямолинейному возрастанию  $l$  – это область преобладающего влияния конвективной дисперсии. При скоростях фильтрации меньше 0.3 *см/мин* (4.32 *м/сут.*) уменьшение скорости приводит к увеличению  $l$  вследствие увеличения времени процесса молекулярной диффузии, которая играет доминирующую роль; при постоянстве коэффициента диффузии и пути вытеснения согласно (1) должно выполняться равенство соотношений  $l_1/l_2 = \sqrt{a_2/u_1}$ .

В промежуточной области скорости проявляются оба процесса – молекулярная диффузия и конвективная дисперсия, поэтому результаты опытов различных исследователей в этой промежуточной области кажутся противоречивыми.

Коэффициент молекулярной диффузии в газах при давлениях до 200 *ат* обратно пропорционален давлению. Каких-либо данных о влиянии пористой среды на эту зависимость нет. Известно лишь, что при атмосферном давлении пористая среда существенно уменьшает коэффициент диффузии и можно предполагать, что с увеличением давления это влияние уменьшается. Однако резкое увеличение коэффициента диффузии с уменьшением давления в пористой среде не вызывает сомнения. Для иллюстрации роли молекулярной диффузии в образовании зоны смеси двух газов

на описанной выше модели были проведены опыты по вытеснению азота углекислым газом при давлениях 5 и 3 *ата*. Результаты этих опытов, представленные на фиг. 2, показывают, что в области конвективной дисперсии длина зоны смеси не зависит от давления, но вследствие увеличения коэффициента молекулярной диффузии резкое увеличение длины зоны смеси наблюдается для давления  $p=5$  *ата* уже при уменьшении скорости фильтрации ниже 0.7 *см/мин*, а для давления  $p=3$  *ата* — ниже 1.5 *см/мин*. В предыдущих исследованиях, проведенных в основном на жидкостях, именно из-за малого значения коэффициента диффузии [ $D_0=(0.5\div 4)\cdot 10^{-5}$  *см<sup>2</sup>/сек*] не удалось отметить увеличения длины зоны смеси при уменьшении скорости фильтрации ниже определенного значения.

На этой же модели были проведены опыты по вытеснению аргона метаном ( $\text{CH}_4 \rightarrow \text{Ar}$ ), которые показали, что отношение вязкостей при его изменении от 1.17 для системы  $\text{CO}_2 \rightarrow \text{N}_2$  до 2.04 для системы  $\text{CH}_4 \rightarrow \text{Ar}$  не влияет на длину зоны смеси (см. фиг. 2).

Как следует из фиг. 2, коэффициент газоотдачи  $\beta$  меняется с изменением скорости фильтрации в соответствии с изменением длины зоны смеси, так как при этом меняется и зона смеси от концентрации 0 до 10%, по которой производится подсчет.

Зависимости изменения длины зоны смеси  $l$  и коэффициента газоотдачи  $\beta$  от скорости фильтрации были сняты также на двухметровых вертикальных трубных моделях с проницаемостью  $k=290$  и 18 *мд* (фиг. 3). Характер зависимостей такой же, как и у представленных на фиг. 2 для модели с  $k=128$  *мд*. Точки 1, 2 на фиг. 3 относятся к модели с  $k=18$  *мд* и соответствуют вытеснению  $\text{CO}_2 \rightarrow \text{N}_2$  и  $\text{CH}_4 \rightarrow \text{N}_2$ , а точки 3, 4, 5 относятся к модели с  $k=290$  *мд* и соответствуют вытеснению  $\text{CO}_2 \rightarrow \text{N}_2$ ,  $\text{Ar} \rightarrow \text{N}_2$  и  $\text{N}_2 \rightarrow \text{Ar}$ .

На малопроницаемой модели с  $k=18$  *мд* длина зоны смеси резко (почти в 2 раза) возросла по сравнению с длиной зоны на модели с  $k=290$  *мд*, остальные параметры моделей одинаковы.

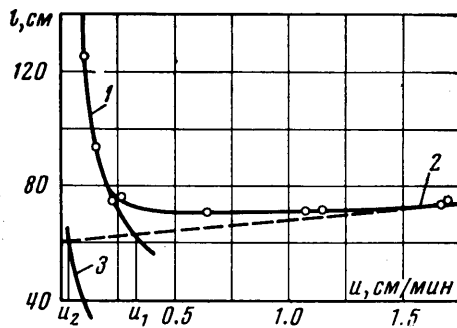
У сравнительно хорошо проницаемой модели с  $k=290$  *мд* область скоростей, при которых длина зоны минимальна, смещена в сторону больших скоростей фильтрации, а у малопроницаемой модели с  $k=18$  *мд* — в сторону меньших скоростей, что объясняется прежде всего влиянием пористой среды на молекулярную диффузию.

На двухметровой вертикальной модели с  $k=290$  *мд* проводились опыты по вытеснению азота аргоном ( $\text{Ar} \rightarrow \text{N}_2$ ) и аргона азотом ( $\text{N}_2 \rightarrow \text{Ar}$ ) на близких режимах фильтрации. Практически полное совпадение результатов этих опытов свидетельствует об отсутствии заметного влияния на процесс вытеснения гравитационных сил (отношение плотностей аргона и азота 1.43) и отношения вязкостей газов ( $v_{\text{Ar}}/v_{\text{N}}=1.25$ ).

Модели длиной 2 и 3 *м* образовались соединением одинаковых по проницаемости моделей длиной 1 *м*, на каждой из которых были проведены опыты по вытеснению азота углекислым газом. Сравнение результатов опытов на моделях одинаковой проницаемости, но разной длины показывает, что в обследованном диапазоне скоростей фильтрации длина зоны смеси возрастает пропорционально корню квадратному из пройденного расстояния, т. е. в соответствии с (1).

Для определения коэффициентов дисперсии результаты опытов по вытеснению газа газом на различных моделях были обработаны по приближенной методике Н. Л. Раковского [3]. Полученная зависимость коэффициента дисперсии от скорости фильтрации имеет вид, аналогичный (2). Следует отметить более резкое возрастание коэффициента дисперсии с увеличением скорости и соответственно большее значение показателя степени, особенно для малопроницаемой модели, по сравнению с данными, полученными для насыпных хорошо проницаемых сред [6, 7].

В каждом конкретном случае вытеснения, характеризующемся длиной пути (или временем процесса), проницаемостью пористой среды, физическими свойствами газов и прежде всего коэффициентами молекулярной диффузии существует диапазон скоростей фильтрации, в котором длина зоны смеси и коэффициент газоотдачи практически не меняются. Эти режимы вытеснения будут оптимальными с точки зрения расхода газа-вытеснителя для наиболее полного извлечения вытесняемого газа. Превышение скорости фильтрации за границы этого диапазона приводит к увеличению длины зоны смеси, однако эти режимы вытеснения не представляют интереса для разработки газоконденсатных месторождений и поэтому не рассматриваются. Уменьшение скорости фильтрации за границы этого диапазона приводит к резкому увели-



Фиг. 4

чению длины зоны смеси и к падению коэффициента газоотдачи и поэтому технологически не выгодно.

В принципе из (1) и (2) можно выразить длину зоны смеси как функцию скорости фильтрации  $l=f(u)$  и определить скорость, при которой длина зоны будет минимальной. Однако большой диапазон возможных значений входящих в эти уравнения постоянных коэффициентов, характеризующих пористую среду, делает такое решение нецелесообразным. Минимальная допустимая скорость фильтрации, при которой длина зоны близка к минимальным значениям, может быть оценена по результатам экспериментального исследования непосредственно или путем пересчета.

При пластовом давлении, отличающемся от давления в лабораторном эксперименте, изменится только та часть зависимости длины зоны смеси от скорости фильтрации, которая определяется преобладающим влиянием молекулярной диффузии. В зоне малых скоростей эта зависимость имеет вид  $l \sim 1/\sqrt{u}$  и хорошо согласуется с экспериментальными данными (фиг. 4, кривая 1). Минимально допустимая скорость фильтрации  $u_1$  определяется точкой пересечения построенной по экспериментальным данным (кривая 2) прямой  $l=a+bu$ , соответствующей линейной зависимости длины зоны от скорости в области конвективной дисперсии, и кривой зависимости типа  $l \sim 1/\sqrt{u}$ , также построенной по экспериментальным данным. При прочих равных условиях длина зоны смеси в области молекулярной диффузии зависит от давления  $l_1/l_2 = \sqrt{p_2/p_1}$ . Эта зависимость следует из (1) и соотношения  $D_0 p = \text{const}$ . На основании этого исходная экспериментально полученная левая часть зависимости  $l=f(u)$  может быть перестроена на другое давление, как это показано на фиг. 4 (кривая 3), и точка пересечения ее с неизменной линейной зависимостью  $l=a+bu$  и даст значение минимально допустимой скорости фильтрации  $u_2$  при давлении  $p_2$ . Как пример можно указать, что пересчет экспериментальной зависимости, представленной на фиг. 2, при давлении  $p=13.5 \text{ ата}$  на давление  $p=135 \text{ ата}$  дает изменение минимально допустимой скорости  $u$  от 0.33 до 0.022 см/мин (0.288 м/сут.).

Анализ экспериментальных данных по вытеснению газа газом из однородных пористых сред различной проницаемости показывает, что длина зоны смеси, определенная по концентрациям 5 и 95%, при расстоянии между нагнетательными и эксплуатационными скважинами 1 км для оптимальной скорости фильтрации будет 20÷30 м; при меньших скоростях длина зоны смеси может возрасти в несколько раз.

Авторы благодарны А. Х. Мирзаджанзаде и В. М. Рыжику за обсуждение результатов работы.

Поступила 9 III 1973

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Rosenberg D. I. Fluid displacement from porous media - mechanics of steady state single-phase. A. I. Ch. E. Journal, 1956, No. 3.
2. Koch H. A., Slobod R. L. Miscible slug process. J. Petrol. Technol., 1957, No. 2.
3. Забородин П. И., Раковский Н. Л., Розенберг М. Д. Вытеснение нефти из пласта растворителями. М., «Недра», 1968.
4. Slobod R. L., Burcik E. I., Cashdollar B. H. The effect of viscosity ratio and path length in miscible displacement in porous media. Producers Monthly, 1959, vol. 23, No. 8.
5. Carman P. C. Flow of gases through porous media. Z. Butter Worthes Sci. Publ., 1956.
6. Blackwell R. I., Rayne I. R., Terry W. W. Factors influencing the efficiency of miscible displacement. Trans. ASME, 1959, vol. 216, No. 1.
7. Legatski M. W., Katz D. L. Dispersion coefficients for gases flowing in consolidated porous media. Soc. Petrol. Engng J., 1967, vol. 7, No. 1.
8. Mertz R. V., Huntington R. L. Gas mixing in porous media. Oil Weekly, 1941, vol. 103, No. 1.
9. Hall H. N., Geffen T. M. A laboratory study of solvent flooding. J. Petrol. Technol., 1957, No. 2.