

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ КРИВЫХ КАПИЛЛЯРНОГО ДАВЛЕНИЯ МЕТОДОМ СТАБИЛИЗИРОВАННОЙ ЗОНЫ

В. Н. МАРТОС, В. М. РЫЖИК

(Москва)

Предлагается косвенный метод определения динамических кривых капиллярного давления расчетным путем по результатам измерений распределения насыщенности при вытеснении газа водой из пористой среды.

Уравнения совместной фильтрации двух несмешивающихся жидкостей с учетом капиллярности получаются на основе предположения, что разность давлений между фазами равна капиллярному давлению, которое предполагается известной однозначной функцией насыщенности [1, 2]. Зависимость кривых капиллярного давления (как и кривых относительных проницаемостей) только от насыщенности обосновывается тем, что при небольших скоростях фильтрации капиллярные силы значительно превышают гидродинамический перепад давления и полностью контролируют распределение фаз в порах. Однако при одной и той же насыщенности распределение фаз может быть, вообще говоря, различным в зависимости от истории процесса насыщения, а в случае большой скорости фильтрации — и от скорости. Влияние истории сказывается в гистерезисе кривых капиллярного давления, который изучен довольно подробно [3]. Влияние скорости фильтрации на кривые капиллярного давления изучено значительно хуже, так как методы измерения капиллярного давления относятся к статическим условиям. Влияние скорости на зависимость капиллярного давления от насыщенности обусловлено двумя явлениями: а) фильтрация может происходить настолько быстро, что не будет устанавливаться равновесное распределение фаз и будет сказываться влияние сил гидродинамического сопротивления на распределение фаз в порах, б) может сказываться влияние скорости на краевой угол смачивания.

Прямое измерение динамических кривых капиллярного давления связано с очень сложной экспериментальной техникой и было сделано лишь в работе Ливайна [4].

Как известно [2, 5], если вытеснение несмешивающихся жидкостей производится с постоянной скоростью, то вблизи фронта вытеснения образуется «стабилизированная» зона, в которой распределение насыщенности не изменяется (в системе координат, связанной с фронтом). Измеряя распределение насыщенности в этой зоне, можно, зная скорость фильтрации, построить кривые капиллярного давления.

Если пренебречь вязкостью газа, одномерная фильтрация жидкости с газом описывается следующей системой уравнений:

$$u = -\frac{k}{\mu} f_1(s) \frac{\partial p}{\partial x}, \quad p = p_0 - p_c(s) \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + m \frac{\partial s}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

Здесь  $u$  — скорость фильтрации,  $s$  — насыщенность жидкостью,  $k$  — проницаемость,  $m$  — пористость,  $f_1(s)$  — относительная проницаемость,  $p$  — давление в водной фазе,  $p_0$  — постоянное давление в газовой фазе,  $p_c(s)$  — капиллярное давление,  $\mu$  — вязкость жидкости. Уравнения (1), (2) представляют собой обобщенный закон Дарси и уравнение неразрывности.

В стабилизированной зоне скорость  $u$  и насыщенность — функции переменной  $\xi = x - Vt$ , где  $V$  — скорость перемещения фронта. Отсюда имеем

$$\frac{du}{d\xi} - mV \frac{ds}{d\xi} = 0, \quad u = mV(s - s_0) \quad (3)$$

Здесь  $s_0$  — начальная насыщенность. Из условия, что за фронтом при насыщенности  $s_1$  заземленный газ неподвижен, имеем

$$u_1 = mV(s_1 - s_0), \quad V = \frac{u_1}{m(s_1 - s_0)} \quad (4)$$

где  $u_1$  — скорость фильтрации жидкости за фронтом.

Из уравнений (1) получим

$$\frac{dp_c}{d\xi} = \frac{\mu u_1}{k f_1(s)} \frac{s - s_0}{s_1 - s_0} = \frac{m \mu V (s - s_0)}{k f_1(s)}, \quad p_c(s) - p_c(s_1) = \frac{m \mu V}{k} \int_{s_0}^s \frac{s(\xi) - s_0}{f_1(s(\xi))} d\xi \quad (5)$$

Таким образом, если имеется экспериментальная зависимость  $s(\xi)$ , то, зная относительные проницаемости, можно по формуле (5) рассчитать зависимость  $p_c(s)$ .

Была проведена серия экспериментов по определению динамических кривых капиллярного давления на модели пласта в виде горизонтальной трубы, набитой кварцевым песком. Длина модели 170 см, диаметр 5,2 см, проницаемость 10 *дарси*, пористость 0,40. Эксперименты проводились при начальной водонасыщенности  $s_0 = 0,21$ . Скорость фильтрации в каждом эксперименте была постоянной (задавалась насосом постоянного расхода) и менялась в пределах от 0,0011 до 0,020 см/сек. Измерение насыщенности производилось методом электросопротивления, поэтому вытесняющей жидкостью была не дистиллированная вода, а насыщенный раствор  $\text{CaSO}_4$ . Подробное описание использованной установки для измерения водонасыщенности дано в работе [6].

Эксперименты показали, что при вытеснении с постоянной скоростью изменение насыщенности в различных точках по длине модели практически повторяется со сдвигом во времени, пропорциональным скорости вытеснения, что подтверждает предположение о существовании стабилизированной зоны. Типичные кривые  $s(t)$  в двух точках модели, отстоящих друг от друга на расстоянии 58 см (скорость движения фронта 0,013 см/сек), показаны на фиг. 1. Скорость  $V$  может быть найдена путем деления расстояния между двумя точками замера на величину сдвига во времени между появлением какого-нибудь значения насыщенности в этих точках.

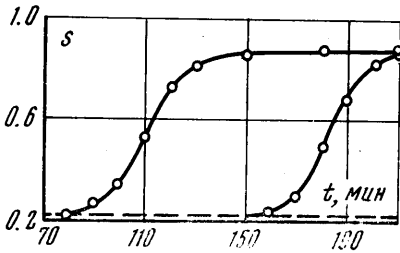
Вместо зависимости  $s(\xi)$ , замеренной по распределению насыщенности в некоторый момент времени, удобнее использовать кривые  $s(t)$ , полученные в одной точке. При этом вместо формулы (5) величина  $p_c(s)$  рассчитывается по формуле

$$p_c(s) - p_c(s_1) = \frac{m\mu V^2}{k} \int_{t_0}^t \frac{s(\tau) - s_0}{f_1[s(\tau)]} d\tau \quad (6)$$

Расчет производился по формуле (6). Относительная проницаемость  $f_1(s)$  была получена методом вытеснения на той же модели. Функция  $f_1(s)$  может быть представлена формулой

$$f_1(s) = \left( \frac{s - s_0}{1 - s_0} \right)^2 = 1,62(s - 0,21)^2$$

По формулам (5) или (6) кривые  $p_c(s)$  получаются с точностью до постоянного слагаемого. Для построения полной кривой капиллярного давления необходимо знать абсолютную величину  $p_c$  хотя бы при одном значении насыщенности. Чтобы получить эти данные, в ходе опыта с помощью водяного пьезометра непрерывно измерялось давление на входе в модель. Это давление должно быть приблизительно линейной функцией времени, так как вследствие постоянной скорости нагнетания фронт вытеснения также продвигается с постоянной скоростью и гидравлические сопротивления линейно растут со временем. Особенность вытеснения газа водой заключается в том, что вследствие сжимаемости газа за фронтом вытеснения заземленный водой газ практически неподвижен [7]. Поэтому можно принять (и это подтверждается результатами измерений), что насыщенность за фронтом



Фиг. 1

вытеснения вне стабилизированной зоны постоянна. Изменение насыщенности за фронтом за счет сжимаемости мало, потому что перепад давления в условиях эксперимента был много меньше начального атмосферного давления.

Пусть насыщенность во всей обводненной зоне (за исключением стабилизированной зоны) равна  $s_1$ . Проинтегрируем уравнение (1) по  $x$  вдоль зоны постоянной насыщенности от  $x = 0$  до начала стабилизированной зоны  $x = l$  для некоторого момента времени  $t$ . Получим

$$\frac{\mu u_1 l}{k f_1(s_1)} = p(0, t) - p(l, t) \quad (7)$$

Заметим, что  $p(l, t) = p_0 - p_c(s_1)$  в соответствии с формулой (1). Зависимость  $l$  от времени при достаточно больших  $t$  (после полного образования стабилизированной зоны) может быть представлена в виде  $l = V(t - \tau_0)$ . Время запаздывания  $\tau_0$  невелико по сравнению с полным временем вытеснения. Его величина определяется по дан-

ным об изменении распределения насыщенности со временем. Окончательно получим следующую связь давления  $p(0, t)$  со временем:

$$p(0, t) - p_0 = \frac{\mu u_1 V(t - \tau_0)}{k f_1(s_1)} - p_c(s_1) \quad (8)$$

Если построить кривую зависимости избыточного давления на входе в модель  $p - p_0$  от  $t - \tau_0$ , то при больших  $t$  эта зависимость представляется прямой, отсекающей на оси ординат отрицательный отрезок, равный  $p_c(s_1)$ . Таким образом, можно найти искомую постоянную для полного построения кривой капиллярного давления в динамических условиях.

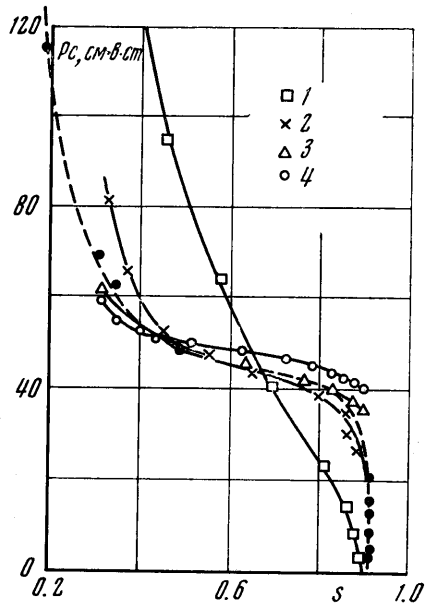
Кривые капиллярного давления, рассчитанные по описанной выше схеме, приведены на графиках фиг. 2 (данные 1 для  $V = 0.050$  см/сек, 2 —  $V = 0.013$ , 3 —  $V = 0.0077$ , 4 —  $V = 0.0055$ ). Для сопоставления на графике показана также статическая кривая капиллярного давления, полученная на том же образце методом пропитки (пунктир). Чтобы получить эту кривую, образец устанавливался вертикально и сообщался с сосудом, свободная поверхность воды в котором располагалась несколько выше нижнего торца трубы. После установления равновесия (через трое суток) измерялось распределение насыщенности по вертикали, соответствующее капиллярному равновесию.

Рассмотрение кривых, представленных на фиг. 2, показывает следующее. Во-первых, кривые для двух малых скоростей фильтрации расходятся со статической кривой капиллярного давления на величину порядка 5—10%. Учитывая, что статическая кривая получена непосредственным измерением, а динамические — довольно громоздким пересчетом с участием относительных проницаемостей, такое совпадение можно считать удовлетворительным.

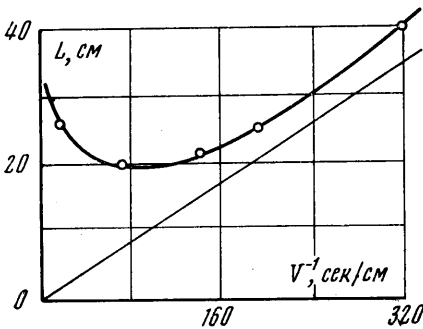
Во-вторых, из сопоставления кривых  $p_c(s)$  для разных скоростей видно, что в случае малых скоростей кривые капиллярного давления сравнительно незначительно отличаются одна от другой, причем чем меньше скорость, тем выше кривая капиллярного давления. (В пределе при  $u_1 \rightarrow 0$  должна была бы получиться статическая кривая. То, что статическая кривая лежит ниже кривой для наименьшей скорости вызвано, по-видимому, погрешностью метода пересчета.)

С дальнейшим ростом скорости значения  $p_c(s_1)$  по-прежнему монотонно убывают (в опытах  $s_1 \sim 0.89-0.90$ ). В то же время производная  $dp_c/ds$  при увеличении скорости вытеснения  $V$  до 0.013 см/сек и особенно при скорости 0.050 см/сек резко возрастает. В результате при скорости 0.013 см/сек расчетная динамическая кривая капиллярного давления лежит значительно выше статической кривой в диапазоне  $s < 0.4$ , а кривая для скорости 0.050 см/сек — выше статической для всех  $s < 0.65$ . При этом кривая для скорости 0.050 см/сек резко отличается от остальных кривых значительно более быстрым ростом  $p_c$  при уменьшении  $s$ .

Причина падения величины  $p_c(s_1)$  с ростом скорости, по-видимому, связана с зависимостью краевого угла смачивания от скорости. В наших опытах в качестве пористой среды использовался кварцевый песок. В статических условиях краевой угол на границе кварц — вода — газ  $\theta$  близок к нулю, но с ростом скорости  $\theta$  может значительно вырасти, что приведет к снижению кривизны менисков и снижению капиллярного давления.



Фиг. 2



Фиг. 3

нулю, но с ростом скорости  $\theta$  может значительно вырасти, что приведет к снижению кривизны менисков и снижению капиллярного давления.

Труднее объяснить рост капиллярного давления при малых значениях насыщенности. Возможно этот рост кажущийся и вызван неприменимостью уравнений (1) при больших скоростях. По-видимому (см. книгу Д. А. Эфроса [2]), отклонение от статических кривых при больших скоростях следует связывать с величиной параметра  $T = \sigma / \mu u_1$ , где  $\sigma$  — поверхностное натяжение на границе вода — воздух. Таким образом, уравнения вида (1) неприменимы при значениях  $T < 1.4 \cdot 10^5 \div 7 \cdot 10^5$ . Отклонение расчетных кривых капиллярного давления нельзя объяснить нелинейностью закона фильтрации при больших скоростях. Максимальное число Рейнольдса, в котором в качестве характерного размера принят размер зерна, в опытах составляло 0.02, что значительно меньше критического числа Рейнольдса, которое колеблется от 3 до 10.

Если считать, что уравнения (1) применимы, а кривая  $p_c(s)$  не зависит от скорости, то из формулы (5) видно, что длина стабилизированной зоны (расстояние между точками с двумя выбранными значениями насыщенности) должна быть пропорциональной  $V^{-1}$ . Этот факт был впервые установлен в работе Раппопорта и Лиса [8]. На фиг. 3 показана построенная по данным опытов авторов зависимость длины стабилизированной зоны  $L$  (между насыщенностями 0.40, 0.80 от  $V^{-1}$ ). Из графика видно, что зависимость  $L$  от  $V^{-1}$  при малых скоростях примерно соответствует указанной связи. Однако при значении  $V^{-1} \sim 100$  сек/см имеется минимум, а при дальнейшем уменьшении  $V^{-1}$  снова наблюдается рост стабилизированной зоны. Рост стабилизированной зоны с ростом скорости наблюдался ранее в экспериментах по вытеснению нефти водой на моделях пласта с небольшими малопроницаемыми включениями [9]. Этот рост был связан с запаздыванием процесса перераспределения вытесняющей фазы между включениями и основным потоком. По-видимому, в рассматриваемом случае рост стабилизированной зоны также связан с неравновесностью процесса насыщения. Возможно, что при больших скоростях начинает сказываться влияние незначительных неоднородностей, присущих всякой пористой среде. В таком случае по аналогии с работой [9] следует считать, что процесс вытеснения определяется не параметром  $T$ , а параметром  $Td/l$ , где  $d$  — характерный размер пор или зерна породы, а  $l$  — масштаб неоднородности. Для обоснования этого вывода потребуются дополнительные серия экспериментов на различных типах пористых сред.

Во всяком случае при больших скоростях вытеснения нарушается, по-видимому, непрерывность одной из фаз в стабилизированной зоне. В то же время именно непрерывность фаз служила основным предположением для обоснования применимости уравнений (1) для описания совместной фильтрации воды и газа (точнее говоря, фильтрации с неполным насыщением).

Поступило 28 III 1971

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Buckley S., Leverett M. C. Mechanism of fluid displacement in sands. Trans. AIME, 1942, vol. 146.
2. Эфрос Д. А. Исследования фильтрации неоднородных систем. Л., Гостоптехиздат, 1963.
3. Развитие исследований по теории фильтрации в СССР (1917—1967). М., «Наука», 1969, гл. 5, § 7.
4. Levine J. Displacement mechanism in consolidated porous system. Trans. AIME, 1954, vol. 201.
5. Jones-Farrar J., Calhoun J. Computation of a linear flood by the stabilized zone method. Trans. AIME, 1953, vol. 198.
6. Богомолова А. Ф., Белый В. В., Солопкин Е. Ф. Многоканальный прибор с автоматической регистрацией для измерения электропроводности. Сб. «Физико-геологические факторы при разработке нефтяных и нефтегазоконденсатных месторождений», М., «Недра», 1969.
7. Рыжик В. М. О зоне неподвижного газа при вытеснении газа водой из пористой среды. Изв. АН СССР, МЖГ, 1966, № 6.
8. Rapoport L. A., Leas W. I. Properties of linear waterfloods. Trans. AIME, 1953, vol. 198.
9. Мартынцив О. Ф., Рыжик В. М. Исследование процесса вытеснения нефти водой из неоднородных пластов. Изв. АН СССР, Механика, 1965, № 5.