

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОТНОШЕНИЯ  
ВЯЗКОСТЕЙ НА СКОРОСТЬ ПРОТИВОТОЧНОЙ КАПИЛЛЯРНОЙ  
ПРОПИТКИ ПОРИСТЫХ СРЕД**

*Б. Е. Кисиленко, В. М. Рыжик*

(Москва)

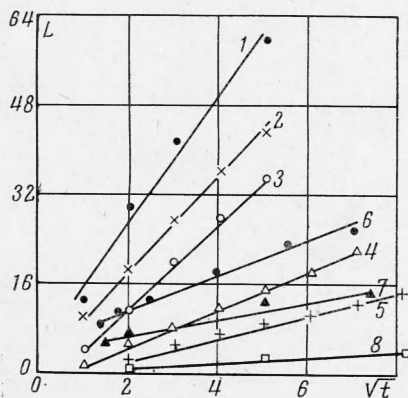
Противоточная капиллярная пропитка представляет собой одновременное движение воды и нефти в порах пласта во встречных направлениях под действием капиллярных сил [1, 2]. Это явление играет существенную роль в механизме вытеснения нефти водой. Противоточная пропитка является практически единственным путем извлечения нефти из целиков небольшого размера, окруженных водой. Такого рода целики образуются при неустойчивом процессе вытеснения нефти [3], а также при вытеснении нефти из резко неоднородных и трещиноватых пластов [4-6]. Для оценки нефтеотдачи в случае образования целиков нефти (т. е. при неустойчивом продвижении фронта) важно знать зависимость скорости противоточной пропитки от отношения вязкостей нефти и воды. В настоящей работе описывается серия экспериментов, проведенных с целью исследования этой зависимости.

Опыты проводились на стеклянных трубках длиной 37 см и диаметром 4,7 см, набитых стеклянным порошком. Проницаемости моделей колебались в пределах 1,0—1,5 *дарси*. С обоих концов каждой трубки устанавливались фильтры из спеченного стеклопорошка (толщина фильтра 7—9 мм). Фильтры прикреплялись к трубке при помощи эпоксидной шпаклевки. Для гидрофиллизации поверхности пористой среды трубки перед экспериментом промывались, помимо эфира и метилового спирта, 30%-ным раствором соляной кислоты. Очередность промывки была следующая: метиловый спирт—эфир—кислота—вода—метиловый спирт. Трубки устанавливались в приборе, конструкция которого показана на фиг. 1. Трубка 6 при помощи эпоксидной шпаклевки соединялась с камерой 4 таким образом, чтобы фильтр 3 находился напротив мерного цилиндра 2. На другом конце модели устанавливалась заглушка 7.

После насыщения трубки моделью нефти камера и мерный цилиндр заполнялись водой. Масло, выходящее из модели, поступало в цилиндр, а вода из камеры — в модель. Таким образом, можно было в течение опыта наблюдать за количеством вышедшей из модели жидкости и за расстоянием, пройденным фронтом (трубка была проградуирована по длине).

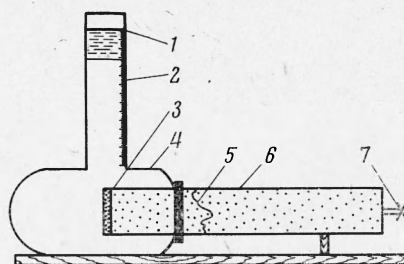
В большей части опытов в качестве модели нефти использовалась смесь очищенного керосина и вазелинового масла. Поверхностное натяжение таких смесей на границе с водой менялось незначительно — от 37 до 40 *дин/см*. В нескольких экспериментах вытесняемой жидкостью служила смесь арланской нефти, керосина и вазелинового масла (одна часть нефти на три части неполярной жидкости). Вытесняющей жидкостью во всех опытах была дистиллированная вода. Эксперименты проводились с различными отношениями вязкости нефти и воды ( $M = \mu_2 / \mu_1 = 2-20$ ).

По результатам всех опытов, проведенных на каждом отношении вязкостей нефти и воды, строились осредненные кривые зависимости пути, пройденного фронтом  $L$



Фиг. 2

от  $t^{0.5}$ . Такой вид зависимости выбран потому, что, согласно результатам теоретического исследования [2], до момента подхода фронта к закрытому концу образца выполняется соотношение  $L = ct^{0.5}$ , где  $c$  — постоянная величина, зависящая от свойств пористой среды и жидкостей. Все осредненные кривые  $L(t^{0.5})$  изображены на фиг. 2 ( $t$  — в сутках). На прямых 1—5 представлены результаты опытов, проведенных при  $M$  соответственно равном 2,5, 5,3, 8,0, 14,0, 19,0. Связанная вода не моделировалась. Из графика видно, что зависимость  $L(t^{0.5})$  хорошо аппроксимируется прямой для всех отноше-

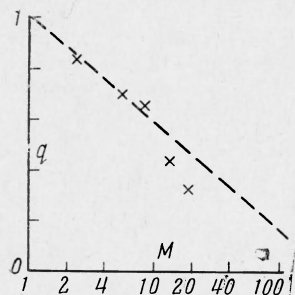


Фиг. 1

ний вязкости. Скорость капиллярной пропитки при одном и том же отношении вязкостей  $M$  существенно снижается, когда в вытесняемую жидкость добавляется нефть (прямая 6 при  $M = 2.5$  и прямая 8 при  $M = 19$ ).

Конечная нефтеотдача, равная предельной водонасыщенности, во всех опытах колебалась при изменении вязкости в незначительных пределах: от 69 до 72%. Средняя насыщенность в зоне смеси также менялась мало. Таким образом, при всех вязкостях длина, пройденная фронтом, была фактически пропорциональна впитавшемуся в образец объему воды.

Скорость капиллярной пропитки может быть охарактеризована величиной  $s = Lt^{-0.5}$  или  $Q_0 = Qt^{-0.5}$ , где  $Q$  — впитавшийся ко времени  $t$  объем воды. Зависимость  $Q_0$  от отношения вязкостей была определена теоретически на основе автомодельного решения задачи о противоточной капиллярной пропитке, приведенного в работе [2]. В этой работе показано, что распределение водонасыщенности  $s(x, t)$  в линейном образце до подхода «фронта пропитки» к закрытому концу может быть найдено путем решения граничной задачи для обыкновенного дифференциального уравнения второго порядка, связывающего  $s$  с величиной



Фиг. 3

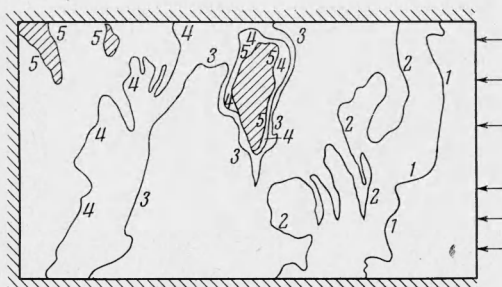
$$\xi = \frac{x}{at^{0.5}} \quad \left( a = \left( \frac{\sigma \cos \theta}{\mu_1} \right)^{0.5} \left( \frac{k}{m} \right)^{0.25} \right)$$

Здесь  $\sigma$  — поверхностное натяжение на границе нефть — вода,  $\theta$  — краевой угол,  $k$  — проницаемость,  $m$  — пористость породы. Были рассчитаны<sup>1</sup> кривые  $s(\xi)$  при различных отношениях вязкостей  $M$ . Предельная водонасыщенность при  $\xi = 0$  (т. е.  $t \rightarrow \infty$  или

$x = 0$ ) принималась в этих расчетах равной 0.7. Кривые относительной проницаемости и капиллярного давления использовались те же, что и в работе [2]. По кривым  $s(\xi)$  можно найти количество жидкости, впитавшейся в образец за время  $t$ , равное  $Q = qat^{0.5}$ , где  $q = q(M)$ . Были найдены значения  $q$  при отношении вязкостей  $M$ , равном 1, 2, 10 и 100. Все значения  $q$  были рассчитаны при одном и том же значении начальной водонасыщенности  $s_0 = 0.2$ .

Значения  $q$  могут быть определены только с точностью до постоянного множителя, так как использовались не экспериментальные, а расчетные кривые капиллярного давления и, кроме того, неизвестна величина динамического угла смачивания  $\theta$ . Поэтому на фиг. 3 зависимость  $q$  от  $\lg M$  построена так, что значение  $q$  при  $M = 1$  принято за единицу. Как видно, зависимость  $q$  от  $\lg M$  в рассчитанном диапазоне представляется практически прямой линией. Экспериментальные значения  $q$  для вытеснения неполярных смесей керосина и вазелинового масла отложены на фиг. 3 также в условном масштабе, так, чтобы теоретические и экспериментальные значения  $q$  при  $M = 2.5$  совпадали. Сравнение показывает, что экспериментальная кривая зависимости  $q$  от  $\lg M$  при  $M < 10$  более пологая, чем теоретическая, а при  $10 < M < 20$  — более крутая. Однако в среднем наклоны теоретической и экспериментальной кривых близки между собой. Конечно, такое сравнение является лишь ориентировочным, так как в экспериментах остаточной воды не было, т. е.  $s_0 = 0$ , а теоретический расчет сделан для  $s_0 = 0.2$ . Заметим, что расчет для  $s_0 = 0$  потребовал бы значительно более трудоемких вычислений. Следует также указать, что при построении экспериментальной зависимости  $q$  от  $M$  не учитывалось некоторое различие проницаемостей моделей, поскольку изменение проницаемостей было невелико — от 1 до 1.5 *дарси*, а в выражение для  $a$  входит  $k^{0.25}$ .

Был проведен один опыт (прямая 7 на фиг. 2), в котором смесь арланской нефти и неполярных жидкостей вытеснялась в присутствии остаточной воды, занимавшей 24% порового объема трубки. Отношение вязкостей  $M = 19$ . Присутствие остаточной воды



Фиг. 4

Был проведен один опыт (прямая 7 на фиг. 2), в котором смесь арланской нефти и неполярных жидкостей вытеснялась в присутствии остаточной воды, занимавшей 24% порового объема трубки. Отношение вязкостей  $M = 19$ . Присутствие остаточной воды

<sup>1</sup> Вычисления проводились в Вычислительном центре АН СССР под руководством Я. И. Алихашкина.

ускорило процесс капиллярного впитывания. Однако и в этом случае скорость капиллярной пропитки при большом отношении вязкостей нефти и воды оказалась значительно ниже, чем для неполярной жидкости той же вязкости.

На ход противоточной пропитки при малых отношениях вязкостей заметно влияет капиллярная неустойчивость, отмеченная в работе [3] для вытеснения нефти водой при малых скоростях. В некоторых опытах под действием капиллярных сил образовались зоны развития языков обводнения, имевшие значительные размеры. В то же время при проведении экспериментов на трубках меньшего диаметра (2.5 см) существенного размазывания фронта за счет капиллярной неустойчивости не происходит.

Для более подробного исследования капиллярной неустойчивости было проведено несколько опытов по противоточной капиллярной пропитке на плоской модели пласта размером  $47 \times 26 \times 1.3$  см, с проницаемостью 5.3 *дарси* при отношении вязкостей  $M = 2.5$ . Методика проведения опытов на плоской модели несколько отличается от той, которая использовалась в опытах при пропитке на трубках. В боковой крышке модели сделана камера, через которую протекала дистиллированная вода. Выходящая из модели нефть поступала в камеру, откуда выносилась потоком дистиллированной воды.

На фиг. 4 показан характер продвижения водонефтяного контакта во времени в одном из опытов (непроницаемые стенки модели на схеме заштрихованы). Видно, что в начале двигался устойчивый фронт вытеснения (контур 1). Затем, по мере падения скорости пропитки, на фронте начали образовываться языки воды (контур 2), проникающие в нефтяную часть модели пласта. В результате остался целик нефти (контур 4), который, в свою очередь, обводнялся путем противоточной капиллярной пропитки. К моменту, когда вода подошла к противоположному концу модели, за фронтом остались три целика нефти (контур 5). Исчезновение их происходило крайне медленно. На полную ликвидацию всех целиков нефти ушло столько же времени, сколько на то, чтобы вода прошла от одного конца модели до другого. Такое замедление пропитки вызвано тем, что водонасыщенность на границе целиков невелика, и значительно меньше, чем на входе в модель. Возможно, что в реальных условиях при весьма малых скоростях вытеснения замеченная особенность может играть существенную роль.

Поступила 12 V 1966

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Graham J. W., Richardson J. C. Theory and application of imbibition phenomena in recovery of oil. *J. Petrol. Technol.*, 1959, vol. 11, No. 2.
2. Рыжик В. М. О капиллярной пропитке водой нефтенасыщенного гидрофильного пласта. *Изв. АН СССР, Механика и машиностроение*, 1960, № 2.
3. Кисиленко Б. Е. Экспериментальное изучение характера продвижения водонефтяного контакта в пористой среде. *Изв. АН СССР, Механика и машиностроение* 1963, № 6.
4. Mattox C. C., Kute J. R. Imbibition oil recovery from fractured water — drive reservoir. *Soc. Petrol. Engng. J.*, 1962, vol. 2, No. 2.
5. Везилов Д. Ш., Кочешков А. А. Экспериментальное исследование механизма нефтеотдачи трещиновато-пористых коллекторов при заводнении. *Изв. АН СССР, Механика и машиностроение*, 1963, № 6.
6. Мартынцив О. Ф., Рыжик В. М. Исследование процесса вытеснения нефти водой из неоднородных пластов. *Изв. АН СССР, Механика*, 1965, № 5.

#### О СМЕШАННОЙ ЗАДАЧЕ ДЛЯ МОДИФИЦИРОВАННОГО УРАВНЕНИЯ ВЛАГОПЕРЕНОСА

В. А. Янгербер (Ленинград)

Обычно движение влаги в почве описывается нелинейным уравнением диффузии [1], основанным на законе Дарси. Однако имеют место эксперименты [2-4], в которых качественная картина влажности существенно отличается от той, которая наблюдается в результате решения уравнения диффузии. Попытка объяснить движение воды, соответствующее указанным экспериментальным данным, предпринята в [2]. Для этого вся сеть капилляров в почве классифицируется на две группы: толстые, магистральные каналы, по которым в основном движется жидкость, и тонкие капилляры, транспортирующие воду к магистральным. Обозначая потенциал влаги в тонких капиллярах через  $\psi$ , а в магистральных — через  $\psi_e$  (эффективный потенциал по терминологии [2]), можно записать пропорциональность скорости изменения влажности  $\gamma$  на любой глубине разности этих потенциалов

$$\psi_e - \psi = K_1 \partial w / \partial t$$