

УДК 532.546

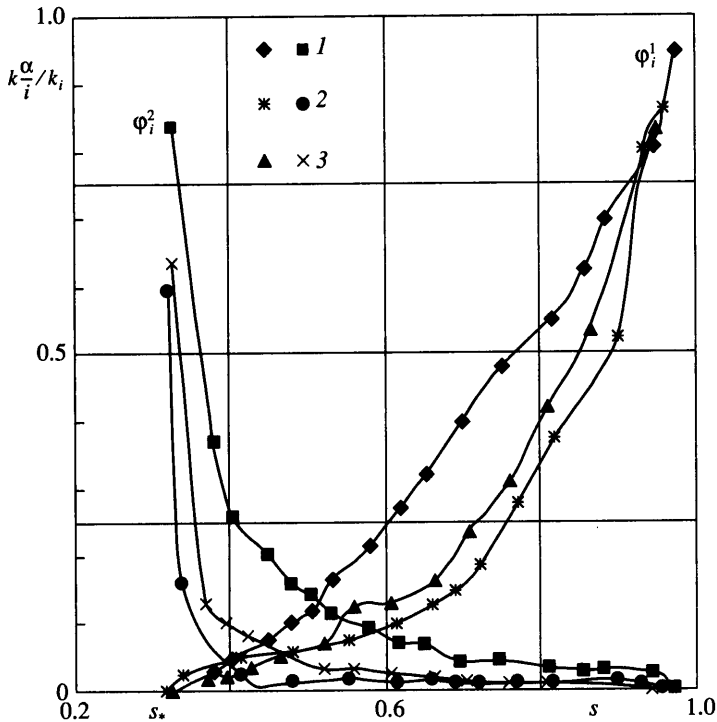
© 2004 г. М. Н. ДМИТРИЕВ, Н. М. ДМИТРИЕВ, В. В. КАДЕТ,
М. Н. КРАВЧЕНКО, С. Г. РАССОХИН**ДВУХФАЗНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ В ТРАНСВЕРСАЛЬНО-ИЗОТРОПНОЙ
ПОРИСТОЙ СРЕДЕ: ЭКСПЕРИМЕНТ И ТЕОРИЯ**

Приведены результаты эксперимента по определению относительных фазовых проницаемостей при фильтрации двух несмешивающихся жидкостей в слоистом песчанике с трансверсально-изотропными фильтрационными свойствами. Измерения произведены на трех ориентированных кернах: по напластованию, перпендикулярно и под углом в 45° к напластованию. Дано приближенное решение о стационарной двухфазной фильтрации к конечной галерее в анизотропной пористой среде при произвольной взаимной ориентации галереи и главных осей тензора коэффициентов абсолютной проницаемости. Приближенное решение было протестировано на экспериментальных результатах. Хорошее совпадение теоретических и экспериментальных результатов позволяет рекомендовать для проведения инженерных расчетов как связи между абсолютными и фазовыми проницаемостями для трансверсально-изотропных и ортотропных пористых сред, так и приближенное решение.

Ключевые слова: двухфазная фильтрация, анизотропия, трансверсальная изотропия, фазовые и абсолютные проницаемости.

Проблема обобщения классических моделей теории двухфазной фильтрации несмешивающихся жидкостей, использующих тензоры коэффициентов фазовых проницаемостей, на случай анизотропных фильтрационных свойств относится к числу актуальных, поскольку реальные пористые и трещиноватые среды, коллекторы углеводородного сырья, как правило, проявляют анизотропию. В [1–4] была установлена структура связей для тензоров коэффициентов абсолютных, фазовых и относительных проницаемостей для сред, проявляющих анизотропные фильтрационные свойства, выписаны и проанализированы тензоры фазовых и относительных проницаемостей, установлен общий вид функций относительных фазовых проницаемостей. Однако отсутствие комплексных экспериментальных исследований двухфазной фильтрации с учетом анизотропии пласта и решения задачи о притоке к конечной галерее для обработки экспериментальных данных не позволяло использовать результаты теоретических исследований на практике. В работе приведены результаты экспериментальных исследований относительных фазовых проницаемостей для трансверсально-изотропной пористой среды и результаты их обработки с помощью приближенного решения задачи о притоке к конечной галерее в анизотропном пласте.

1. Экспериментальное определение относительных фазовых проницаемостей в трансверсально-изотропной пористой среде. Для проведения исследований использовалась автоматизированная система многофазной фильтрации ООО «ВНИИГАЗ» [5]. Цилиндрические образцы из керна сцементированного слоистого песчаника были выпилены параллельно, перпендикулярно и под углом 45° к плоскости напластования. Перед измерениями образцы керна экстрагировали, высушивали, после чего помещали в тефлоновую и витонтовую оболочки и затем в кернодержатель системы многофазной фильтрации. В результате эксперимента были измерены абсолютные проницаемости при фильтрации гептана в термобарических условиях экспериментов (давление 5 МПа, температура 20°C). Основные фильтрационно-емкостные свойства



Фиг. 1. Экспериментальные значения относительных фазовых проницаемостей: 1 – в образце, выпиленном по напластованию; 2 – в образце, выпиленном перпендикулярно напластованию; 3 – в образце, выпиленном под углом в 45° к напластованию, ϕ_i^1 , ϕ_i^2 ($i = 1, 2, 3$) для жидкости и газа соответственно

кernового материала следующие: абсолютная проницаемость в плоскости напластования $k_1 = 908 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$, перпендикулярно ей $k_3 = 520 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$, под углом в 45° – $k_2 = 613 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$, среднее значение пористости $m = 0.341$.

Для эксперимента по двухфазной фильтрации использовался тот же гептан (конденсированная фаза) и метан в качестве газовой фазы. Фазы предварительно тщательно перемешивали для насыщения их друг другом с целью исключения массообмена между ними в процессе фильтрации в пористой среде.

Методически определение относительных фазовых проницаемостей сводилось к многократному повторению опытов по совместной фильтрации метана и гептана с различающимися от опыта к опыту долями фильтрующихся фаз в потоке. Каждый режим фильтрации осуществляли до достижения стационарного состояния и далее поддерживали постоянный перепад давления на модели пласта. В ходе стационарной фильтрации определяли объемы закачанных в модель пласта и поступивших к выходу флюидов. Средние насыщенности пористой среды флюидами измеряли методом материального баланса. Экспериментальные результаты по определению относительных фазовых проницаемостей в режиме вторичного дренирования приведены на фиг. 1. Заметим, что большим значениям проницаемости ($k_1 > k_2 > k_3$) соответствует и большее значение относительной фазовой проницаемости. Данный экспериментальный результат отличается от полученного численным моделированием двухфазной фильтрации в ортотропной и трансверсально-изотропной пористых средах [6]. Там большим значениям абсолютной проницаемости соответствовали меньшие значения относительной фазовой проницаемости.

2. Приближенное решение задачи о притоке к конечной галерее в анизотропном пласте. В кристаллофизике для определения физических свойств анизотропных сплошных сред, задаваемых тензорами второго ранга, рассматриваются две модельные задачи, в которых образец представляет собой или пластину (толщина образца много меньше диаметра), или длинный стержень (длина образца много больше характерного размера) [7, 8]. В результате измерений определяется так называемое направленное свойство, т.е. свойство, определенное вдоль направления, задаваемого ортом n_j , который перпендикулярен пластине или направлен вдоль оси симметрии длинного стержня. В теории фильтрации это направленная проницаемость $k_{ij}n_in_j$ (определяется при фильтрации на пластине) и направленное фильтрационное сопротивление $r_{ij}n_in_j$ (определяется при фильтрации в длинном стержне), где k_{ij} – тензор коэффициентов абсолютной проницаемости, r_{ij} – тензор коэффициентов абсолютных фильтрационных сопротивлений. Однако современные лабораторные установки имеют кернодержатели для образцов, у которых длина L и диаметр D имеют один порядок (для описанного выше эксперимента $D/L \approx 0.6$). Поэтому при произвольной взаимной ориентации главных направлений тензора коэффициентов проницаемости и орта, перпендикулярного к галерее, необходимо рассматривать задачу о притоке к конечной галерее в анизотропном пласте. Постановка задачи подробно описана в [9, 10]. Точное решение задачи имеет громоздкий вид и представляется с помощью специальных функций Якоби [9]. Поэтому представляется удобным построить приближенное решение задачи. Приближенное решение задачи представляется в виде [11]:

$$Q = \frac{k_e \Delta p}{\mu L} S \quad k_e = \sqrt{\frac{k_{ij}n_in_j \left[1 + \sqrt{k_{ij}n_in_j r_{\alpha\beta}n_\alpha n_\beta (D/L)} \right]}{r_{\alpha\beta}n_\alpha n_\beta \left[\sqrt{k_{ij}n_in_j r_{\alpha\beta}n_\alpha n_\beta + (D/L)} \right]}} \quad (2.1)$$

где Q – дебит галереи, $\Delta p/L$ – модуль градиента давления, μ – вязкость, S – площадь сечения образца, k_e – эффективная проницаемость, $r_{ij}n_in_j$ и $k_{ij}n_in_j$ – значения направленного фильтрационного сопротивления и проницаемости, соответственно вычисленные вдоль оси симметрии образца.

Приближенное решение (2.1) учитывает асимптотику точного, согласно которой при $D/L \rightarrow 0$ эффективная проницаемость стремится к обратному значению направленного фильтрационного сопротивления, вычисленного вдоль оси симметрии образца – $k_e \rightarrow 1/r_{\alpha\beta}n_\alpha n_\beta$, а при $D/L \rightarrow \infty$ – значение эффективной проницаемости стремится к значению направленной проницаемости $k_e \rightarrow k_{\alpha\beta}n_\alpha n_\beta$.

Так как при установившемся процессе модель двухфазной фильтрации аналогична модели однофазной [12, 13], то положим, что приближенное решение (2.1) можно обобщить на случай двухфазной установившейся фильтрации в анизотропных пористых средах. Такое обобщенное решение представляется равенствами (2.1), но справедливыми уже для каждой фазы.

Для наиболее часто используемых в прикладных задачах ортотропных и трансверсально-изотропных фильтрационных свойствах второе из соотношений (2.1) можно представить в виде

$$\frac{k_e^\alpha}{k_3^\alpha} = \Phi_3^\alpha \sqrt{\frac{A^\alpha \left[1 + \sqrt{A^\alpha B^\alpha D/L} \right]}{B^\alpha \left[\sqrt{A^\alpha B^\alpha + D/L} \right]}} \quad (2.2)$$

При этом для ортотропной пористой среды

$$\begin{aligned} A^\alpha &= \varphi_{13}^\alpha \theta_{13} \cos^2 \alpha + \varphi_{23}^\alpha \theta_{23} \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma \\ B^\alpha &= \varphi_{31}^\alpha \theta_{31} \cos^2 \alpha + \varphi_{32}^\alpha \theta_{32} \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma \end{aligned} \quad (2.3)$$

а для трансверсально-изотропного материала:

$$A^\alpha = \Phi_{13}^\alpha \theta_{13} \sin^2 \gamma + \cos^2 \gamma, \quad B^\alpha = \Phi_{31}^\alpha \theta_{31} \sin^2 \gamma + \cos^2 \gamma \quad (2.4)$$

где Φ_i^α – функция, задающая относительную фазовую проницаемость вдоль i -го главного направления тензора фазовых проницаемостей и α -й фазы, $\Phi_{ij}^\alpha = \Phi_i^\alpha / \Phi_j^\alpha$, $\theta_{ij} = k_i / k_j$, k_i – главные значения тензора абсолютной проницаемости, α, β, γ – углы, которые образует орт n_i , направленный по оси симметрии образца (керна) с главными осями тензора абсолютной проницаемости.

3. Анализ экспериментальных данных и тестирование приближенного решения. Структура и явный вид функций относительных фазовых проницаемостей для анизотропных пористых сред подробно обсуждались в [3, 4]. Общий вид полученных в [4] функций относительных фазовых проницаемостей для жидкости и газа представляется выражениями:

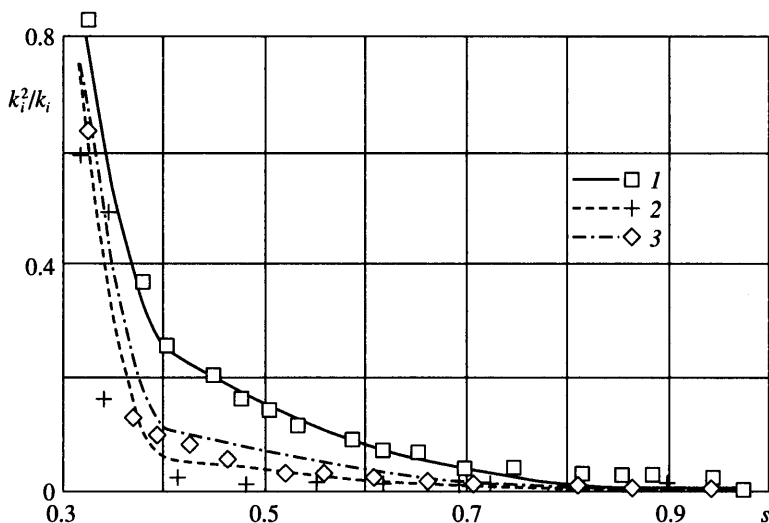
$$\Phi_i^1 = \left[a_i + \left(\frac{I_1(k)}{3k_i} - 1 \right) (s_{(i)}^* - s) \right] \left(\frac{s - s_{(i)*}}{s_{(i)}^* - s_{(i)*}} \right)^{\epsilon_i} \quad (3.1)$$

$$\Phi_i^2 = \left[b_i + \left(\frac{I_1(k)}{3k_i} - 1 \right) (s - s_{(i)*}) \right] \left(\frac{s_{(i)}^* - s}{s_{(i)}^* - s_{(i)*}} \right)^{\beta_i} \quad (3.2)$$

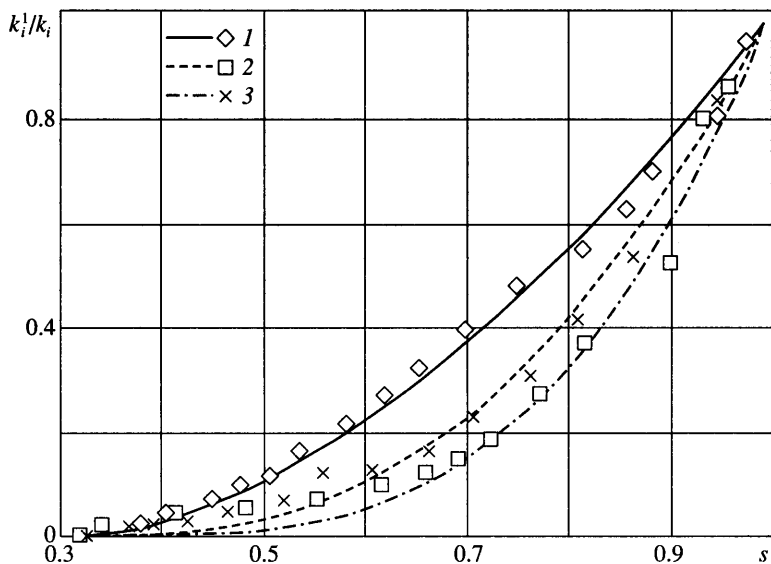
где s_* и s^* – нижняя и верхняя предельные насыщенности пористой среды жидкостью, задающие интервал, в котором обе фазы подвижны, $a_i, b_i, \epsilon_i, \beta_i$ – параметры, которые определяются экспериментально, при этом $a_i = \Phi_i^1(s_{(i)}^*)$, $b_i = \Phi_i^2(s_{(i)*})$.

Выписанные представления относительных фазовых проницаемостей (3.1) и (3.2) в совокупности с приближенным решением (2.1), (2.4) позволяют использовать результаты лабораторного эксперимента как для проверки тензорного характера связи между абсолютными и фазовыми проницаемостями [1], так и для тестирования приближенного решения. Для задания фильтрационных свойств в трансверсально-изотропной пористой среде достаточно двух измерений абсолютных проницаемостей и двух измерений относительных фазовых проницаемостей вдоль главных осей тензора коэффициентов проницаемостей. Измерения относительной фазовой проницаемости на третьем образце, наклоненном под углом в 45° к плоскости напластования, являются контрольными, так как они с помощью выписанных связей могут быть получены чисто теоретически, как значение направленной фазовой проницаемости по данным, полученным на образцах, выпиленных по главным направлениям.

Результаты сравнения теоретических и экспериментальных кривых относительных фазовых проницаемостей для газа представлены на фиг. 2, жидкости – на фиг. 3. Видно, что представления относительных фазовых проницаемостей выражениями (3.1) и (3.2) достаточно хорошо аппроксимируют экспериментальные результаты в направлении главных осей, и что результаты вычислений по приближенному решению (2.5) хорошо согласуются с экспериментальными результатами для измерений относительных фазовых проницаемостей в третьем образце, наклоненном под углом в 45° к плоскости напластования. Заметим, что при аппроксимации относительных фазовых проницаемостей для газа пришлось использовать представление (3.2) дважды. Одна аппроксимация использовалась на интервале насыщенности от 0.96 до 0.4, вторая – от 0.4 до 0.3. Это обстоятельство, по-видимому, объясняется изменением структуры потока



Фиг. 2. Сравнение экспериментальных (точки) и относительных фазовых проницаемостей с теоретическими (линии) для газа: 1 – для образца, выпиленного по напластованию; 2 – для образца, выпиленного перпендикулярно напластованию; 3 – для образца, выпиленного под углом в 45° к напластованию



Фиг. 3. То же, что и на фиг. 2, для жидкости

газа в пласте. На первом интервале поток мог иметь четочный характер, на втором – шнурковый.

Заключение. Дано экспериментальное обоснование тензорного характера связи между абсолютными и фазовыми проницаемостями. Относительные фазовые проницаемости не являются универсальными функциями насыщенности. Они зависят от типа анизотропии и отношений главных значений тензора абсолютных проницаемос-

тей $\theta_{ij} = k_{ij}/k_j$. Показано, что при получении исходной информации для проектирования разработки месторождений природных углеводородов необходимо комплексное исследование предэксплуатационного кернового материала на нескольких образцах с учетом факторов анизотропии пористой среды.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (№ 02-01-00369).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дмитриев Н.М., Максимов В.М.* О структуре тензоров коэффициентов фазовых и относительных проницаемостей для анизотропных пористых сред // Докл. РАН. 1998. Т. 358. № 3. С. 337–339.
2. *Дмитриев Н.М., Максимов В.М.* Определяющие уравнения двухфазной фильтрации в анизотропных пористых средах // Изв. РАН. МЖГ. 1998. № 2. С. 87–94.
3. *Максимов В.М., Дмитриев Н.М.* Методы нелинейных тензорных функций в моделях двухфазной фильтрации в анизотропных средах // Проблемы современной механики. М.: Изд-во МГУ, 1998. С. 76–83.
4. *Дмитриев М.Н., Дмитриев Н.М., Кадет В.В.* Обобщенный закон Дарси и структура фазовых и относительных фазовых проницаемостей для двухфазной фильтрации в анизотропных пористых средах // Изв. РАН. 2003. № 2. С. 136–145.
5. *Тер-Саркисов Р.М., Николаев В.А., Рассохин С.Г., Кобелев В.А., Ваньков В.П.* Компьютеризированные установки многофазной фильтрации и их применение при разработке методов повышения конденсатаотдачи // Повышение углеводородоотдачи пласта газоконденсатных месторождений. М.: ВНИИГАЗ, 1998. С. 27–38.
6. *Bear J., Braester C., Menier P.S.* Effective and relative permeabilities of anisotropic porous media // Transp. Porous Media. 1987. V. 2. № 3. P. 301–316.
7. *Сиротин Ю.И., Шаскольская М.П.* Основы кристаллофизики. М.: Наука, 1975. 680 с.
8. Современная кристаллография (в 4-х тт.). Т. 4. Физические свойства кристаллов. М.: Наука, 1981. 495 с.
9. *Marcus H.* The permeability of a sample of an anisotropic porous medium // J. Geophys. Res. 1962. V. 67. № 13. P. 5215–5225.
10. *Marcus H., Evenson D.E.* Directional permeability in anisotropic porous media // Univ. Calif. Berkeley. Water Resources Center. 1961. P. 105.
11. *Дмитриев Н.М.* К методике определения проницаемости в анизотропных коллекторах углеводородного сырья // Математические методы и ЭВМ в моделировании объектов газовой промышленности. М.: ВНИИГаз, 1991. С. 30–43.
12. *Басниев К.С., Кочина И.Н., Максимов В.М.* Подземная гидромеханика. М.: Недра, 1983. 415 с.
13. *Коллинз Р.* Течение жидкостей через пористые материалы. М.: Мир, 1964. 350 с.

Москва
E-mail: dmitriev.msc@mtu-net.ru

Поступила в редакцию
4.XI.2003