

УДК 532.68

ЭМПИРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИ ПРОТИВОТОЧНОЙ КАПИЛЛЯРНОЙ ПРОПИТКИ ГОРНЫХ ПОРОД

© 2014 г. В.Л. Барабанов

Институт проблем нефти и газа РАН, г. Москва, Россия

Выполнен обзор известных теоретических моделей противоточной капиллярной пропитки горных пород и их экспериментальных проверок. Приведены результаты оригинальных лабораторных экспериментов с кернами, различающимися по проницаемости приблизительно на два порядка. Особенность экспериментов – их большая длительность по сравнению с известными. Обнаружено, что после стадии резкого снижения скорости пропитки и кажущегося выхода кривой насыщенности на асимптоту наступает стадия резкого возрастания скорости пропитки до достижения нового максимума. Кривые роста насыщенности на разных стадиях пропитки хорошо аппроксимируются степенными и логарифмическими законами; определены эмпирические параметры этих законов. Установлена взаимосвязь полученных параметров с фильтрационно-емкостными характеристиками образцов.

Ключевые слова: горные породы, капиллярная противоточная пропитка, проницаемость, пористость, эксперименты лабораторные.

Введение

Противоточная капиллярная пропитка проницаемых пористых материалов используется во многих современных технологиях. В частности, известно, что капиллярная пропитка нефтяных коллекторов является действенным фактором долговременного нефтеизвлечения. Особенно это касается низкопроницаемых коллекторов, а также порово-трещинных коллекторов, осложненных кавернозностью. В то же время, несмотря на достаточно большой объем модельных экспериментов, большинство из них ограничено сравнительно непродолжительным временем, предполагающим, что выход кривой насыщения на условную асимптоту сигнализирует о необратимом затухании процесса. В экспериментах по капиллярной пропитке обычно строятся графики прироста насыщенности от безразмерного (приведенного) времени

$$t_D = \frac{1}{L^2} \sqrt{\frac{k}{m}} \frac{\gamma}{\sqrt{\mu_w \mu_{nw}}} t, \quad (1)$$

где L – характерная длина образца, м; k – проницаемость, м²; m – пористость; γ – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м; μ_w , μ_{nw} – динамические вязкости смачивающей и несмачивающей фаз соответственно, Па·с. В большинстве известных экспериментов это безразмерное время не превышает 10³, и кривые насыщенности имеют S-образную форму [Morrow *et al.*, 2006]. В настоящей работе приведены результаты лабораторных экспериментов по противоточной капиллярной пропитке образцов горных пород, при которых максимальное безразмерное время составило 10⁵–10⁶. Проведение столь длительных наблюдений позволило установить, что существует некая “кажущаяся” (“промежуточная”) асимптота предельной насыщенности, где скорость пропитки мала, после чего процесс пропитки ускоряется, и кривая роста насыщенности приобретает N-образную форму.

В первом разделе статьи представлены известные теоретические модели самопроизвольной капиллярной пропитки проницаемых пористых материалов. Для экономии места даны только постановка задачи и окончательные формулы, детали вывода которых можно найти в цитируемых источниках. Во втором разделе рассмотрены результаты известных лабораторных экспериментов по капиллярной пропитке образцов горных пород разного состава с разными петрофизическими свойствами. Третий содержит описание результатов лабораторных экспериментов, выполненных автором, и оценки эмпирических параметров степенных и логарифмических законов, описывающих разные стадии капиллярной пропитки. И, наконец, в Заключении приведены основные выводы и кратко обсуждаются дальнейшие направления исследований по рассматриваемой проблеме.

Теоретические модели

Классическая модель. Самопроизвольная двухфазная фильтрация в пористой среде описывается системой четырех уравнений:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{u}_w + m \frac{\partial S_w}{\partial t} = 0, \quad \nabla \cdot \mathbf{u}_o + m \frac{\partial S_o}{\partial t} = 0, \\ p_o - p_w = p_c(S_w), \quad S_o + S_w = 1, \end{aligned}$$

где \mathbf{u} – вектор скорости движения фазы; $S_{w,o}$ – насыщенность; $p_{w,o}$ – давления фаз; p_c – капиллярное давление; m – пористость. Нижний индекс w относится к воде (от английского *water*), o – к нефти (от английского *oil*).

Для описания скоростей фаз используются законы Дарси:

$$\mathbf{u}_w = -\frac{k}{\mu_w} k_{rw} \nabla p_w, \quad \mathbf{u}_o = -\frac{k}{\mu_o} k_{ro} \nabla p_o,$$

где k – абсолютная проницаемость; k_{ro}, k_{rw} – относительные проницаемости; $\mu_{w,o}$ – вязкости фаз.

В итоге может быть выведено определяющее нелинейное уравнение противоточной капиллярной пропитки в виде:

$$\nabla \cdot D(S_w) \nabla S_w = -m \frac{\partial S_w}{\partial t}, \quad (2)$$

где D – коэффициент диффузии, зависящий от текущей насыщенности:

$$D(S_w) = \frac{k}{\mu_o} k_{ro} f_w \frac{\partial p_c}{\partial S_w}. \quad (3)$$

В (3) f_w – доля воды в фильтрационном потоке – $f_w = \left(1 + \frac{k_{ro} \mu_w}{\mu_o k_{rw}} \right)^{-1}$.

Рассмотрим некоторый идеализированный процесс [Баренблатт, Ентов, Рыжик, 1984]. Пусть цилиндрический образец пористой среды первоначально заполнен менее смачивающей фазой (например, нефтью). Предполагается, что боковые поверхности и один из торцов образца непроницаемы, а свободный торец в начальный момент приводится в соприкосновение со смачивающей жидкостью (например, водой). В одномерном варианте это приводит к следующему уравнению для водонасыщенности S_w :

$$\frac{\partial S_w}{\partial t} - d^2 \frac{\partial^2 \Phi(S_w)}{\partial x^2} = 0, \quad (4)$$

где $\Phi(S_w) = -\int_0^{S_w} k_{ro}(S_w)F(S_w)J'(S_w)dS_w$; $d^2 = \frac{\gamma \cos \theta}{\mu_w} \sqrt{\frac{k}{m}}$ – коэффициент капилляропроводности; $F(S_w) = \frac{\mu_o k_{rw}}{\mu_o k_{rw} + \mu_w k_{ro}}$; $J(S_w)$ – функция Леверетта; $p_o - p_w = p_c(S_w) = \gamma J(S_w) \sqrt{\frac{m}{k}}$; γ – коэффициент поверхностного натяжения. Одномерная задача капиллярной пропитки (4) имеет автомодельное решение, зависящее от безразмерного параметра вида $\xi = \frac{x}{d\sqrt{t}}$, который описывает скорость движения фронта пропитки.

Введем следующие обозначения: S_{w0} – начальная водонасыщенность; S^* – предельная водонасыщенность, при которой вытесняемая несмачивающая фаза (нефть) переходит в несвязное состояние и капиллярное давление обращается в нуль.

На начальном временном отрезке капиллярной пропитки средняя водонасыщенность образца с характерной длиной l выражается степенной зависимостью

$$\bar{S}_w = S_{w0} + \frac{d}{l} \sqrt{t} K(S^*, S_{w0}), \quad (5)$$

где $K(S_w, S_{w0}) = \int_0^\infty (S_w - S_{w0}) d\xi$.

При асимптотическом приближении к полному насыщению (при $t \rightarrow \infty$) средняя насыщенность описывается экспоненциальной зависимостью

$$\bar{S}_w = S^* - \left(S^* - S_{w0} - \frac{K}{c} \right) \exp \left[-3\Phi'(S^*) \left(\frac{d^2 t}{l^2} - \frac{1}{c^2} \right) \right].$$

Параметр c определяется из асимптотического выражения $c - \xi = \frac{2n}{c(n-1)} (S_w - S^*)^{n-1}$,

в котором n – показатель степени закона, описывающего функцию Леверетта.

Как следует из формулы (5), процесс противоточной капиллярной пропитки на начальной стадии в первом приближении описывается законом $S \sim \sqrt{t}$, совпадающим по форме с известным законом Вашбурна для подъема жидкости в простом капилляре [Washburn, 1921]¹.

Точное автомодельное решение одномерной задачи о противоточной капиллярной пропитке в области конечного размера в рамках выбранной выше модели исследовано в работе [Лобанов, 2011], где отдельно рассмотрены начальная фаза достижения фронтом пропитки непроницаемой границы и заключительная фаза пропитки до предельной насыщенности.

В работе [Жилин, Федоров, 2009] численное решение нестационарного одномерного уравнения (2), полученное для экспоненциальной аппроксимации зависимости коэффициента диффузии от насыщенности $D(S) = a_0 + c_0 \exp\left(\frac{S - S_p}{c}\right)$, где $a_0 = 1.05 \cdot 10^{-8}$; $c_0 = 3 \cdot 10^{-8}$; $S_p = 0.36$; $c = 0.037$, исследовано при начальных (6) и граничных (7) условиях:

$$S(x, t = 0) = \begin{cases} S_0, & x = 0 \\ 0, & 0 < x \leq l, \end{cases} \quad (6)$$

¹ Этот упрощенный закон широко используется во многих экспериментальных работах.

$$S(x=0, t) = S_0, \quad \frac{\partial S(x=l, t)}{\partial x} = 0. \quad (7)$$

На профиле влажности $S(\lambda)$, где $\lambda = x/\sqrt{t}$, выделено три участка. На первом участке $\lambda^* < \lambda < \infty$ происходит относительно небольшое увеличение влажности; на втором наблюдается резкое увеличение влажности, и здесь же находится точка перегиба, за которой форма профиля меняется с вогнутой на выпуклую. Длина этого участка определяется шириной волны по Прандтлю ($l_{Pr}=5.9021$). Третий участок заканчивается точкой $\lambda=0$ и характеризуется плавной выпуклой формой.

В этой же работе исследовано влияние начальной влажности на профиль капиллярной пропитки. При увеличении S_0 от 0.5 до 0.95 обнаружены следующие особенности: размеры области “предвестника” постепенно уменьшаются, при $S_0 > 0.75$ эта область исчезает; постепенно уменьшается ширина волны по Прандтлю, а при $S_0 = 0.7$ возникает “внутренний разрыв”. При $S_0 > 0.75$ увеличивается амплитуда “разрыва” и уменьшается протяженность второго участка. Это означает, что реализуется волновой механизм пропитки, при котором в некоторой области небольшой протяженности резко увеличивается насыщенность.

Сходная модель противоточной капиллярной пропитки на начальной стадии исследована в работе [Li, 2011], автором которой построено аналитическое автомодельное решение рассматриваемой задачи. Показано, что на начальной стадии противоточной пропитки на любом нормированном расстоянии отрицательное произведение нормированных коэффициента диффузии и градиента насыщенности должно быть равно отношению интеграла функции насыщенности в нормированном пространственном интервале к средней насыщенности. Исследованная модель обобщена также на случай, когда на фронте пропитки имеется ненулевой разрыв по насыщенности. В работе [Yazan, Bentsen, Trivedi, 2011] та же модель противоточной капиллярной пропитки обобщена на случай переменной насыщенности на контакте пористой среды с вытесняющей фазой.

Отметим также, что классическую модель противоточной капиллярной пропитки нетрудно обобщить на случай переноса активной жидкой фазы и изменения температуры среды. Для этого добавляются уравнение теплопроводности и замыкающие выражения, описывающие теплообмен между фазами. Пример численного решения такой задачи представлен, в частности, в работе [Алексеева, 2009]. В расчетах фазовые проницаемости описывались в виде степенных законов $k_{rw} = \left(\frac{S_w - 0.2}{0.8}\right)^3$, $k_{ro} = \left(\frac{0.8 - S_w}{0.6}\right)^3$, повсеместно используемых (с иными величинами параметров) и некоторыми другими авторами.

Модель пропитки бидисперсного пористого материала. Под бидисперсным пористым материалом понимается материал, содержащий два типа резко различных по масштабу внутренних неоднородностей, например, трещиновато-пористый материал, кавернозно-пористый материал и т.п. Процессы массопереноса в таких материалах неоднородны, т.е. появляются специальные объемы, массообмен которых с матрицей может отличаться как количественно (иные коэффициенты переноса), так и качественно (иные механизмы переноса). Модель строится для системы каналов двух типов: крупных (транспортных) и соединяющихся с ними мелких (застойных) [Мошинский, 2009]. В безразмерных переменных модель сводится к двум дифференциальным уравнениям массопереноса

$$\varepsilon_1 \frac{\partial G_1}{\partial \tau} - \frac{\partial^2 G_1}{\partial \zeta^2} = G_2 - G_1, \quad (8)$$

$$\varepsilon_2 \frac{\partial G_2}{\partial \tau} = G_1 - G_2, \quad (9)$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – объемные доли транспортных и застойных каналов соответственно; G_1, G_2 – безразмерные концентрации; величины τ и ζ учитывают разные коэффициенты диффузии в транспортных и застойных каналах, а также поперечные сечения и характерные длины каналов.

Применяя операторное разложение уравнения (9) в виде

$$G_2 = \frac{1}{1 + \varepsilon_2 \partial / \partial \tau} G_1 = \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \varepsilon_2^k \frac{\partial^k G_1}{\partial \tau^k} \quad (10)$$

с последующей подстановкой в уравнение (8) и использованием трех первых слагаемых в сумме (10), получим так называемое “эквивалентное” уравнение

$$\frac{\partial G_1}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 G_1}{\partial \zeta^2} + \varepsilon_2^2 \frac{\partial^2 G_1}{\partial \tau^2}, \quad (11)$$

напоминающее известное релаксационное волновое уравнение, однако время “релаксации” в нем ε_2^2 отрицательно.

Выполнив преобразование переменных $G_1 = \exp(\xi)G$, $\tau = 2\xi\varepsilon_2^2$, $z = 2\eta\varepsilon_2$, перейдем к уравнению эллиптического типа $\frac{\partial^2 G}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 G}{\partial \eta^2} = G$, решение которого для функции G_1 записывается как

$$G_1(\xi, \eta) = \exp(\xi) \frac{2\xi}{\pi} \int_{\eta}^{\infty} \frac{K_1(\sqrt{\xi^2 + v^2}) dv}{\sqrt{\xi^2 + v^2}},$$

где $K_1(\alpha)$ – функция Макдональда. Для объема вытесненного материала получим выражение $Q_1(\xi) = \frac{2}{\pi} \exp(\xi) \xi K_0(\xi)$.

Используя известные разложения для функции Макдональда, можно получить зависимости, определяющие поведение функции $Q_1(\xi)$ при $\xi \rightarrow 0$ и при $\xi \rightarrow \infty$:

$$Q_1(\xi) \cong \frac{2}{\pi} \xi \ln\left(\frac{2}{\xi}\right), \quad \xi \rightarrow 0; \quad Q_1(\xi) \cong \sqrt{\frac{2\xi}{\pi}}, \quad \xi \rightarrow \infty. \quad (12)$$

При переходе к переменным ζ, τ асимптотическая формула (12) для $\xi \rightarrow \infty$ точно совпадает с “диффузионным” законом $Q_s = 2(\tau/\pi)^{1/2}$.

Представленная выше модель пропитки тел с бидисперсной пористой структурой проверена экспериментально [Бабенко, Иванов, 2009]. Кривые выхода целевого компонента аппроксимировались формулами $Q = a_1 \tau^{1/2} + b_1$ и $Q = a_2 \tau^{3/4} + b_2$. То, что, как обнаружилось, обе модели описывают процесс экстрагирования с приблизительно одинаковой погрешностью, авторы объясняют наличием в структуре как “длинных”, так и “коротких” транспортных пор.

Модели пропитки с учетом массообмена между капиллярнозаемленными и связноативными объемами фаз. Оригинальная математическая модель капиллярной пропитки однородной изотропной пористой среды предложена в работе [Doster, Zegeling, Hilfer, 2010]. Предполагается, что при пропитке в среде формируются связные (перколяционные) и несвязные (неперколяционные) области; через первые происходит фильтрация, сопровождающаяся массообменом со вторыми. Причем в случае двухфазной насыщенности (например, нефтью и водой) это относится к обоим фазам. В таком случае законы сохранения выглядят следующим образом:

для пористости –

$$m_{wp} + m_{wnp} + m_{op} + m_{onp} + m_s = 1, \quad (13)$$

для насыщенности –

$$S_{wp} + S_{wnp} + S_{op} + S_{onp} = 1, \quad (14)$$

для массы i -й фазы –

$$\frac{\partial(m_i \rho_i)}{\partial t} + \frac{\partial(m_i \rho_i v_i)}{\partial x} = M_i, \quad (15)$$

для момента i -й фазы –

$$m_i \rho_i \frac{D^i}{Dt} v_i - m_i \frac{\partial \Sigma_i}{\partial x} - m_i F_i = Q_i - v_i M_i. \quad (16)$$

В (13)–(16) ρ_i – плотность; m_i – пористость; v_i – скорость; Σ_i – тензор напряжений i -й фазы; F_i – массовая сила на единицу объема, действующая на i -ю фазу; Q_i – перенос момента из i -й фазы во все другие; $D^i / Dt = \partial / \partial t + v_i \partial / \partial x$. Здесь и далее индексы p и np соответствуют перколяционным и неперколяционным областям; dr – стадии дренажа, im – стадии пропитки.

Предполагается, что скорость изменения массы пропорциональна скорости изменения насыщенности:

$$M_{wp} = -M_{wnp} = \eta_2 m \rho_w \frac{S_{wnp} - S_{wnp}^*}{S_w^* - S_w} \frac{\partial S_w}{\partial t},$$

$$M_{op} = -M_{onp} = \eta_4 m \rho_o \frac{S_{onp} - S_{onp}^*}{S_o^* - S_o} \frac{\partial S_o}{\partial t},$$

где η_2, η_4 – константы.

Насыщенности определяются следующим образом:

$$S_w^* = (1 - S_{oim}) \Theta \left(\frac{\partial S_w}{\partial t} \right) + S_{wdr} \left[1 - \Theta \left(\frac{\partial S_w}{\partial t} \right) \right],$$

$$S_o^* = 1 - S_w^*,$$

$$S_{wnp}^* = S_{wdr} \left[1 - \Theta \left(\frac{\partial S_w}{\partial t} \right) \right],$$

$$S_{onp}^* = S_{oim} \Theta \left(\frac{\partial S_w}{\partial t} \right),$$

где S_{wdr}, S_{oim} – предельные насыщенности S_{wnp}, S_{onp} ; $\Theta(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases}$ – функция Хевисайда.

Комбинация уравнений (14)–(16) дает систему из девяти уравнений с десятью неизвестными S_i, v_i, P_{wp}, P_{op} . Чтобы замкнуть эту систему, выводится условие гидростатического равновесия при остаточной насыщенности, т.е. условие капиллярного равновесия. Отмечается, что моделирование процессов пропитки и дренажа обычно является трудной задачей в рамках традиционной теории двухфазной фильтрации, поскольку вводятся сложные функции, описывающие капиллярные кривые и относительные фазовые проницаемости, неизвестные априори. Предложенная в данной работе модель не требует задания этих параметрических функций.

В работе [Shikhmurzaev, Sprittles, 2012] рассмотрена модель капиллярной пропитки пористых материалов, сходная с описанной выше, но отличающаяся от нее введением двух отдельных мод динамики менисков пропитывающей жидкости – моды смачи-

вания и пороговой моды. Мода смачивания (или мода увлажнения) соответствует движению мениска в поровом канале, пороговая – временному запираению мениска в узких местах или в местах разветвления поровых каналов. Запирание мениска продолжается до тех пор, пока не сформируется краевой угол смачивания, необходимый для дальнейшего движения мениска; при этом пороговая мода сменяется модой смачивания. Построена система уравнений, описывающих динамику менисков.

С учетом силы тяжести ρg основное кинематическое условие движения фронта пропитки записывается в виде

$$\frac{dh}{dt} = \frac{k}{\mu} \left[\frac{p_0 - p(h,t)}{h} - \rho g \right], \quad (17)$$

где h – текущая высота капиллярного подъема; p_0 – начальное давление; $p(h,t)$ – давление на фронте пропитки; k – проницаемость; μ – вязкость жидкости. Давление на фронте пропитки $p|_{\partial\Omega_1} \equiv p(h,t)$ определяется суммой давлений на менисках смачивающей моды p_1 и на менисках пороговой моды p_2 с весами A_1 и A_2 , которые представляют собой пространственно осредненные доли единичной площади поверхности фронта и соответствуют двум типам движения ($A_1 + A_2 = 1$), т.е.

$$p|_{\partial\Omega_1} = A_1 p_1 + A_2 p_2. \quad (18)$$

При малых значениях капиллярного числа и числа Бонда мениски имеют форму сферических поверхностей и

$$p_1 = -2\gamma \cos \theta_d / a, \quad (19)$$

где γ – поверхностное натяжение жидкость–газ; a – эффективный радиус поры; θ_d – динамический краевой угол.

Зависимость между динамическим краевым углом θ_d , статическим краевым углом θ_s и скоростью движения мениска смачивающей моды u_1 записывается следующим образом:

$$\frac{u_1}{U_{cl}} = \left(\frac{[1 + (1 - \rho_{1e}^s) \cos \theta_s] (\cos \theta_s - \cos \theta_d)^2}{4(\cos \theta_s + B)(\cos \theta_d + B)} \right)^{1/2}, \quad (20)$$

где $U_{cl} = \left(\frac{\gamma \rho_0^s (1 + 4\alpha\beta)}{\tau\beta} \right)^{1/2}$ – характерный масштаб скорости; $B = \frac{[1 + \rho_{1e}^s u_0(\theta_d)]}{1 - \rho_{1e}^s}$,

$u_0(\theta_d) = \frac{\sin \theta_d - \theta_d \cos \theta_d}{\sin \theta_d \cos \theta_d - \theta_d}$; ρ_0^s , ρ_{1e}^s , α , β , γ , τ – константы материала, определяемые независимыми методами.

Скорость движения мениска в смачивающей моде u_1 не равна нормальной компоненте скорости движения фронта пропитки $u_n = \mathbf{n} \cdot \mathbf{u}|_{\partial\Omega_1}$ (\mathbf{n} – нормаль к фронту), поскольку мениск время от времени переходит из одной моды в другую. Следовательно, в масштабе Дарси скорость $u_n = dh/dt$ должна включать обе скорости – u_1 и u_2 . Скорость фронта пропитки выражается как

$$u_n = A_1 u_1 + A_2 u_2. \quad (21)$$

В изотропной пористой среде “веса” A_i каждой моды движения соответствуют интервалам времени, внутри которых мениски принадлежат той или иной моде. Если s_i – доля длины в масштабе поры, соответствующая i -й моде ($s_1 + s_2 = 1$), то нормированное время присутствия мениска в i -й моде есть s_i/u_i , и, следовательно,

$$A_1 = \frac{s_1 u_2}{s_2 u_1 + s_1 u_2}, \quad A_2 = \frac{s_2 u_1}{s_2 u_1 + s_1 u_2}. \quad (22)$$

Когда мениск достигает барьера, например, конца или разветвления капилляра, его форма начинает деформироваться до тех пор, пока не сформируется критический краевой угол θ_* , необходимый для дальнейшего движения мениска. Другими словами,

$$s_1(\theta_d, \theta_*) = \begin{cases} 1, & \theta_d - \theta_* \geq 0 \\ s_{10}, & \theta_d - \theta_* < 0 \end{cases} \quad s_2 = 1 - s_1,$$

где $s_{10} (<1)$ – характеристика пористой матрицы.

Давление на мениске пороговой моды p_2 есть капиллярное давление $-2\gamma \cos \theta(t)/a$, осредненное внутри интервала времени

$$T = \frac{a}{u_1} \left(\frac{\bar{p}a}{2\gamma} + \cos \theta_d \right) I \left(\theta_d, \theta_*; \frac{\bar{p}a}{2\gamma} \right), \quad (23)$$

где $I \left(\theta_d, \theta_*; \frac{\bar{p}a}{2\gamma} \right) = \int_{\theta_d}^{\theta_*} \frac{d\theta}{(1 + \sin \theta)^2 \left(\frac{\bar{p}a}{2\gamma} + \cos \theta \right)}$. Внутри этого интервала краевой угол изменяется от θ_d до θ_* . Давление p_2 выражается следующим образом

$$p_2 = \bar{p} - \frac{2\gamma J(\theta_d, \theta_*)}{a I \left(\theta_d, \theta_*; \frac{\bar{p}a}{2\gamma} \right)}, \quad (24)$$

где $J(\theta_d, \theta_*) = \left[\frac{1}{2} \tan \left(\frac{\theta}{2} - \frac{\pi}{4} \right) + \frac{1}{6} \tan^3 \left(\frac{\theta}{2} - \frac{\pi}{4} \right) \right]_{\theta_d}^{\theta_*}$; $[f]_a^b = f(b) - f(a)$. Сходная процедура

приводит к выражению осредненной по T скорости пороговой моды:

$$u_2 = \frac{u_1 J(\theta_d, \theta_*)}{\left(\frac{\bar{p}a}{2\gamma} + \cos \theta_d \right) I \left(\theta_d, \theta_*; \frac{\bar{p}a}{2\gamma} \right)}. \quad (25)$$

Для определения давления \bar{p} необходимо решить макроскопическую сопряженную задачу $\nabla^2 \bar{p} = 0$, ($\vec{r} \in \Omega$); $\vec{n} \cdot \nabla \bar{p} |_{\partial\Omega_1} = 0$ с граничным условием $\bar{p} |_{\partial\Omega_2} = p_2$. Эта задача должна решаться параллельно с главной, поскольку последняя требует задания величины давления $\bar{p} |_{\partial\Omega_1}$ на движущемся фронте пропитки.

Уравнения (17)–(25) формируют замкнутую систему для расчета величин h , $p(h, t)$, p_1 , θ_d , u_1 , A_1 , A_2 , s_1 , s_2 , p_2 и u_2 .

Сравнение кривых капиллярной пропитки, рассчитанных по модели (17)–(25) с кривыми пропитки, рассчитанными по модели Вашбурна, показывает, что предложенная модель предсказывает реально наблюдаемую конечную скорость пропитки на начальной стадии и более медленную на поздней. Пороговая мода играет преобладающую роль $\theta_d < \theta_*$, когда фронт пропитки останавливается, не достигнув максимума; причем эта остановка происходит в конкретный момент времени.

Проблемы стационарности течения и граничных условий в задачах о капиллярной пропитке

Одним из ключевых пунктов классической модели самопроизвольной капиллярной пропитки пористых сред является остающееся спорным предположение о связи между капиллярным давлением и насыщенностью в виде функции Леверетта. Обычно эта эмпирическая связь определяется в квазистатических условиях с последующим использованием в динамических. Известны работы, в которых были выполнены экспери-

ментальные оценки различий капиллярных кривых (зависимостей P_c-S_W), полученных в статических и динамических условиях.

В качестве примера рассмотрим результаты экспериментов на двух образцах песка с разной проницаемостью, приведенных в работе [Camps-Roach et al., 2010]. Сравнение статических и динамических зависимостей P_c-S_W показало, что при заданной водонасыщенности капиллярное давление, измеряемое в условиях неравновесного дренажа, статистически больше капиллярного давления в равновесных статических условиях.

Результаты экспериментов описаны в рамках модели $p_{nw} - p_w = p_c^{static} - \tau \frac{\partial S_W}{\partial t}$.

Получены следующие оценки динамического коэффициента τ : $\tau=3.7 \cdot 10^5 - 1 \cdot 10^6$ кг/м·с для образца с проницаемостью $5.3 \cdot 10^{-11}$ м² и $\tau=3.7 \cdot 10^5 - 1 \cdot 10^6$ кг/м·с для образца с проницаемостью $1.47 \cdot 10^{-11}$ м². Для исследования влияния масштаба на величину динамического коэффициента τ были выполнены специальные процедурные расчеты, обнаружившие, что при перемасштабировании величины коэффициентов не изменились. В то же время для обоих образцов прослежена тенденция к увеличению динамического коэффициента с увеличением водонасыщенности.

Остановимся на некоторых проблемах задания корректных граничных условий в задачах о течении жидкостей в капиллярных каналах. В своем обзоре будем придерживаться работы [Ren, Hu, E, 2010] с некоторыми дополнениями и комментариями.

Основная трудность состоит в описании сингулярности линии контакта фаз, которая увеличивается при рассмотрении уравнения Навье–Стокса с граничными условиями типа прилипания [Huh, Scriven, 1971; Dussan, Davis, 1974]. Эта сингулярность не является физической, поскольку приводит к бесконечной скорости диссипации энергии. Это не просто математическая трудность, а показатель сложности физических процессов, которые происходят вблизи линии контакта.

Известны модифицированные модели, удаляющие названную сингулярность (см., например, [Dussan, Davis, 1974; Hocking, 1977]). В большинстве этих моделей постулируется проскальзывание флюида относительно твердой поверхности на линии контакта и предполагается, что вблизи линии контакта либо тангенциальные силы исчезают, либо действует граничное условие Навье, согласно которому сдвиговое напряжение пропорционально скорости проскальзывания. Другим важным граничным условием является величина динамического краевого угла. Обычно предполагается, что эта величина фиксирована и совпадает с величиной статического краевого угла [Hocking, 1992]. Поскольку модифицированные модели направлены на удаление сингулярности, они часто становятся *ad hoc* и не описывают реальных процессов, которые происходят вблизи линии контакта.

В работе [Cox, 1986] проведен асимптотический анализ гидродинамических моделей и получено следующее соотношение между кажущимся краевым углом и скоростью движения линии контакта:

$$g(\theta_a) = g(\theta_m) + Ca \ln\left(\frac{R}{\varepsilon}\right), \quad (26)$$

где R – типичный линейный масштаб системы; ε – длина проскальзывания. Формула (26) является асимптотической и работает только при очень малых числах Рейнольдса и малой величине капиллярного числа $Ca = \mu U / \gamma$. Функция $g(\theta)$ зависит от отношения вязкостей двух флюидов. В специальном случае, когда отношение вязкостей равно 0 (система воздух–жидкость), функция $g(\theta)$ имеет вид:

$$g(\theta) = \int_0^\theta \frac{\theta' - \sin \theta' \cos \theta'}{2 \sin \theta'} d\theta'. \quad (27)$$

Когда краевой угол θ мал, используя разложение Тейлора, можно показать, что $g(\theta) = \theta^3/9$ (такая аппроксимация работает при $\theta > 3\pi/4$). В этом случае уравнение (26) можно записать в виде:

$$\theta_a^3 - \theta_m^3 = \frac{9\eta U}{\gamma} \ln\left(\frac{R}{\varepsilon}\right). \quad (28)$$

Отметим, что в статическом случае, когда $U=0$, “вязкий изгиб” поверхности флюида исчезает, а из уравнения (28) следует, что кажущийся краевой угол равен углу стенки, т.е. $\theta_{m0} = \theta_\gamma$.

Другой тип молекулярно-кинетической модели динамики линии контакта представлен в работах [Blake, Haynes, 1969; Blake, 1993], в которых предлагаемая модель основана на теории Эйринга. Движение линии контакта рассматривается как процесс активации между областями адсорбции на твердой поверхности. Предполагается также, что движение осуществляется за счет неравновесного напряжения Юнга:

$$F = \gamma(\cos\theta_\gamma - \cos\theta_a), \quad (29)$$

где γ – коэффициент поверхностного натяжения. В равновесном состоянии линия контакта с некоторой частотой совершает прыжки между зонами адсорбции. В динамическом состоянии, далеко от состояния равновесия, сила F в уравнении (29) изменяет частоту скачков. Разность двух частот, умноженная на характерную длину, дает скорость движения линии контакта U . Из теории Эйринга следует формула

$$U = 2\kappa_0\lambda \sinh\left[\frac{\gamma(\cos\theta_\gamma - \cos\theta_a)\lambda^2}{2k_B T}\right], \quad (30)$$

где κ_0 и λ – молекулярные параметры, зависящие от характеристик твердой поверхности. Уравнение (30) – главный результат молекулярно-кинетической теории в применении к описанию динамики линии контакта фаз. Для малых краевых углов это уравнение может быть записано как $\theta_a^2 - \theta_\gamma^2 = \frac{2k_B T}{\gamma\kappa_0\lambda^3} U$.

Существует фундаментальное различие между моделями, описывающими диссипацию энергии системы. Гидродинамические модели описывают потерю энергии в объеме вязкого потока, а молекулярно-кинетические модели – вблизи линии контакта. Представленные модели дают разные зависимости между динамическим краевым углом и скоростью движения линии контакта (см. уравнения (26) и (30)).

Известен ряд работ, авторы которых предлагают комбинации гидродинамических и молекулярно-кинетических моделей (см., например, [Petrov, Petrov, 1992; de Ruijter, de Coninck, Oshanin, 1999; de Ruijter et al., 2000]), учитывая одновременно вязкую диссипацию в объеме и диссипацию за счет трения линии контакта. В первой из названных работ [Petrov, Petrov, 1992] использовано модифицированное выражение (26) для краевого угла в виде

$$g(\theta_a) = g[\theta_m(U)] + Ca \ln\left(\frac{R}{\varepsilon}\right),$$

$$\theta_m(U) = \cos^{-1}\left[\cos\theta_\gamma - \frac{2k_B T}{\lambda^2 \gamma} \sinh^{-1}\left(\frac{U}{2\kappa_0\lambda}\right)\right].$$

В работе [Brochard-Wyart, de Gennes, 1992] предложено следующее динамическое уравнение

$$\gamma(\cos\theta_\gamma - \cos\theta_a)U = \left(\frac{3\eta}{\theta_a} \ln\frac{R}{\varepsilon} + C\right)U^2,$$

левая часть которого описывает работу за счет неравновесного напряжения Юнга, а правая – часть потери энергии в объеме и на линии контакта.

Известны и другие модели динамики линии контакта, построенные на принципах молекулярной теории (см., например, [Koplik, Banavar, Willemsen, 1988, 1989; Thompson, Robbins, 1989]), недостатками которых является их относительная сложность и ограничение системами сравнительно малых размеров.

В цитированной выше работе [Ren, Hu, E, 2010] предлагается следующий подход к заданию граничных условий в задачах капиллярного растекания. Динамическое уравнение для двух несжимаемых флюидов имеет вид

$$\rho_i \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_d, \quad \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad \text{на } \Omega_i, \quad (31)$$

где $\boldsymbol{\tau}_d$ – вязкое напряжение. Предполагается, что определяющее соотношение для напряжений линейно:

$$\boldsymbol{\tau}_d = \eta_i (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T); \quad (32)$$

здесь η_i – вязкость флюидов.

Условия, следующие из принципов термодинамики, на поверхности жидкости могут быть записаны как $[p] - V'(h) + \gamma_3 \kappa = \mathbf{n} \cdot [\boldsymbol{\tau}_d] \cdot \mathbf{n}$, $\mathbf{t} \cdot [\boldsymbol{\tau}_d] \cdot \mathbf{n} = 0$, на твердой поверхности – $\mathbf{t} \cdot \boldsymbol{\tau}_d \cdot \mathbf{n} = f(u_s)$ и на линии контакта – $\gamma_3 (\cos \theta_m - 1) - S + V(0) = f_l(u_l)$, где f_l и θ_m удовлетворяют неравенству $f_l(u_l)u_l = [\gamma_3 (\cos \theta_m - 1) - S + V(0)]u_l \leq 0$, в котором $V(h)$ – поверхностная энергия на единицу площади пленки жидкости толщиной h . Эти условия вместе с уравнениями (31) и (32) образуют определяющую модель динамики линии контакта. Сюда же необходимо включить и законы трения, полученные в рамках модели потенциала Леннарда-Джонса. Показано, что, при малых скоростях проскальзывания зависимость силы трения от скорости течения флюида линейна, но при возрастании скорости становится сильно нелинейной. Более того, сила трения начинает уменьшаться при достижении критической скорости проскальзывания. Этот эффект объясняется следующим образом.

Существуют два временных масштаба процесса течения: время релаксации t_r и время проскальзывания t_s . Последняя величина связана со скоростью проскальзывания $t_s = l/u_s$, где l – параметр решетки твердой поверхности. Рассматриваются две ситуации. В первой скорость проскальзывания мала и $t_s \gg t_r$. В этом случае частицы жидкости вблизи твердой поверхности взаимодействуют с кристаллической структурой твердой стенки. Проскальзывание сопровождается прыжками частиц между стенками, и сила трения может быть связана со скоростью проскальзывания по теории Эйринга. Во второй из рассматриваемых ситуаций скорость проскальзывания велика и времена t_s и t_r становятся сравнимы по величине, вследствие чего частицы жидкости не имеют времени на взаимодействие с твердой решеткой. В этом случае твердая поверхность становится гладкой в атомном масштабе, а сила трения уменьшается.

В работе [Ершова и др., 2010] показано существование волноводных мод, сосредоточенных в окрестности границы капиллярного наноканала, найдены их параметры и получено граничное условие на стенке канала:

$$\frac{\partial u}{\partial n} = \frac{1}{L_s} (u - u_s),$$

где $L_s = a/6q$ – длина проскальзывания; a – расстояние между соседними равновесными положениями молекул флюида и твердой фазы; q – коэффициент пропорциональности закона микроскопического рассеяния импульса молекул.

Известные эксперименты по противоточной капиллярной пропитке

Краткий обзор лабораторных экспериментов по прямооточной и противоточной капиллярной пропитке образцов пористых материалов и горных пород, выполненных в 1950–1970 гг., содержится в монографии [Коротаев и др., 1979]. Отметим наиболее показательные, с нашей точки зрения, результаты, представленные в этой работе.

В экспериментах Э. Браунскомба и А. Дейса коэффициент капиллярного вытеснения нефти водой из образцов продуктивного коллектора месторождения Спрабери, составил от 0 до 67%. На основании этих экспериментов был сделан вывод о целесообразности заводнения коллекторов, сложенных трещиновато-пористыми породами с матрицей крайне низкой проницаемости. М.С. Баговым с сотрудниками установлено, что коэффициент капиллярного вытеснения керосина водой из полностью насыщенных им образцов горных пород варьирует от 25 до 69%, тогда как для образцов, содержащих до 20% остаточной воды, коэффициент капиллярного вытеснения ниже и составляет 20–30%. При проведении подобных экспериментов при температуре 90 °С и давлении 300–320 атм коэффициент капиллярного вытеснения фактически не изменился. В экспериментах Ф.И. Котяхова и П. Теймера на образцах известняка с проницаемостью менее 1 мД и пористостью от 0.017 до 0.086 обнаружена прямая зависимость между коэффициентом капиллярного вытеснения и степенью микронеоднородности породы, причем величина коэффициента вытеснения варьировала от 8.8 до 27.3%.

В экспериментах Р. Порсонса и П. Чани на образцах гидрофильных карбонатных пород с пористостью 0.16–0.18 коэффициент противоточного капиллярного вытеснения достигал 30–45%. По результатам экспериментов Л.Б. Булавинова по прямооточной капиллярной пропитке первоначально газонасыщенных образцов горных пород коэффициент вытеснения газа составляет от 52.7 до 83.2%. Этим автором было обнаружено, что коэффициент вытеснения растет с увеличением пористости, но, с другой стороны, явная зависимость между коэффициентом вытеснения и средним радиусом пор отсутствует. Обнаружено также, что с увеличением начальной водонасыщенности коэффициент вытеснения газа водой уменьшается. Однако, результаты других экспериментов, в частности Л. Ханди и П. Датта, указывают на независимость остаточной газонасыщенности после прямооточной капиллярной пропитки от начальной.

Из экспериментов Р.М. Кондрата следует, что скорость капиллярной пропитки и коэффициент капилляропроводности в значительной мере определяется средним радиусом пор – с увеличением среднего радиуса начальная скорость пропитки и коэффициент капилляропроводности увеличиваются, но конечный коэффициент вытеснения газа водой снижается. Исследования влияния температуры на параметры прямооточной капиллярной пропитки газонасыщенных относительно высокопористых сред, выполненные Р.М. Кондратом с сотрудниками, показывают, что с ростом температуры от 20° до 90 °С коэффициент вытеснения увеличивается на 4–6%, скорость капиллярного впитывания возрастает в 1.8–2.8 раза, а коэффициент капилляропроводности – в 1.2–1.7 раза. Отмечается также тенденция к снижению влияния температуры на коэффициент капиллярного вытеснения при уменьшении среднего радиуса пор.

В работе [Mattax, Kyte, 1962] представлены результаты экспериментов, проведенных на искусственных моделях с проницаемостью от 0.075 до 1.475 Д и пористостью от 0.227 до 0.291; коэффициент капиллярного вытеснения нефти водой достигал 47.5% при вязкости нефти 8.5 сП, воды – 0.9 сП. Авторами работы сформулирован критерий подобия фильтрационных процессов для трещиновато-пористых коллекторов в виде

$$\left\{ \frac{t\gamma\sqrt{k/m}}{\mu_w L^2} \right\}_{\text{модель}} = \left\{ \frac{t\gamma\sqrt{k/m}}{\mu_w L^2} \right\}_{\text{блок}} = \pi_0,$$

где t – время пропитки; μ_w – динамическая вязкость воды; γ – коэффициент поверхностного натяжения; k – проницаемость; m – пористость; L – характерный линейный размер блока.

Позже эксперименты по капиллярной пропитке, рассмотренные в названной работе, были проанализированы в работе [Reis, Cil, 1993], где показано, что процесс противоточной капиллярной пропитки удовлетворительно описывается зависимостью $f(t) \propto \sqrt{t}$.

В работе [Blair, 1964] промоделирован процесс радиальной противоточной капиллярной пропитки цилиндрического образца ядра с проницаемостью 200 мД и пористостью 0.321 с изолированными верхним и нижним торцами. Начальная водонасыщенность составляла 9.2%, вязкость нефти – 5 сП, вязкость воды – 1 сП. Было обнаружено, что процесс пропитки описывается степенной функцией $f(t) \propto t^\alpha$, где $\alpha=0.38$.

В известном учебнике [Гиматудинов, 1977] содержится малоутешительный вывод о том, что “пропитка образца прекращается при вытеснении примерно 30% нефти и, в редких случаях, объем вытеснения нефти достигает 50%, что объясняется образованием вблизи границ образца за счет неоднородностей среды водонефтяных эмульсий, резко повышающих фильтрационное сопротивление среды”. Тем не менее, более поздние эксперименты свидетельствуют все-таки о большей эффективности самопроизвольной противоточной капиллярной пропитки. Так, в работе [Юрочко, 1981] исследованы петрофизические свойства продуктивного горизонта, представленного тонким переслаиванием пелитоморфных кремнистых и глинисто-кремнистых пород с единичными мало-мощными прослоями туфов, песчаников и алевролитов (пиленгская свита миоценового возраста, восточное побережье Сахалина). Матрица пород практически непроницаема, открытая пористость ее может достигать довольно значительных величин, что обусловлено своеобразной глобулярно-пластинчатой микроструктурой пелитовой составляющей (гидрослюд). Прямые определения на образцах с естественной нефтенасыщенностью показали, что в матрице есть нефть, содержание которой доходит до 62% объема пор. Установлено, что при погружении образцов с естественной нефтенасыщенностью в модель пластовой воды происходит вытеснение нефти за счет противоточной капиллярной пропитки. В лабораторных условиях этот процесс длился 3–4 суток и в ряде случаев завершался полным замещением нефти водой.

В упомянутой выше монографии [Коротяев и др., 1979] приведены результаты оригинальных экспериментов по прямооточной и противоточной капиллярной пропитке образцов плотных коллекторов, при которых использовался способ гидростатического взвешивания образцов, частично или полностью погруженных в пропитывающую жидкость. Эксперименты проводились с образцами коллекторов Чиренского газоконденсатного и Тюленовского нефтяного месторождений, представленных песчаниками, доломитами и известняками. Два образца с разной начальной газонасыщенностью полностью погружались в термостатируемый сосуд с водой; конечный коэффициент капиллярной пропитки составил 0.969 для одного образца и 0.803 для другого.

В другой серии экспериментов был достигнут максимальный конечный коэффициент прямооточной капиллярной пропитки, равный 0.98. Оценки коэффициента капилляропроводности d^2 исследованных горных пород по данным этих экспериментов варьируют от $0.09 \cdot 10^{-7}$ м²/с до $1.40 \cdot 10^{-7}$ м²/с при изменении эффективного радиуса пор, оцениваемого по формуле $r_{\text{эфф}} = \sqrt{k/m}$, от $0.22 \cdot 10^{-8}$ до $2.54 \cdot 10^{-8}$ м, что в принципе совпадает с известными теоретическими моделями.

В работе [Bourbiaux, Kalaydjian, 1990] представлены результаты экспериментов по капиллярному вытеснению из образцов ядра нефти вязкостью 1.5 сП хлоридным раствором вязкостью 1.2 сП. Показано, что при прямооточной пропитке показатель

степени функции прироста насыщенности равен 0.45; при противоточной капиллярной пропитке этот показатель в течение первых часов составляет 0.5.

Влияние добавок метасиликата натрия на капиллярное прямоточное вытеснение нефти из искусственных кернов исследовано в работе [Елисеенко и др., 1991]. Образцы изготавливались из смеси кварцевого песка и стекла. Проницаемость двух образцов составила 85 ± 0.5 мкм² и 4.5 ± 0.5 мкм², пористость 0.28 ± 0.02 . Образцы насыщались нефтью Яринского месторождения. В качестве пропитывающей вытесняющей жидкости использовалась дистиллированная вода и 4%-ный раствор метасиликата натрия Na₂SiO₃. Прослеживалось капиллярное вытеснение в течение приблизительно 3000 с. Установлено, что объем нефти, вытесненной раствором метасиликата натрия на 30–50% больше, чем объем, вытесняемый за то же время дистиллированной водой.

В работах [Cuiec, Bourbiaux, Kalaydjian, 1990, 1994] представлены результаты экспериментов по противоточной капиллярной пропитке сильно гидрофильных образцов мела. Показано, в частности, что с уменьшением коэффициента поверхностного натяжения скорость пропитки уменьшается, но эффективность вытеснения становится выше. Предполагается, что это связано с увеличением потенциала мобилизации отдельных нефтяных ганглий.

В работе [Конюев, Колагьоди, 1992] исследованы параметры капиллярного впитывания углеводородов в песчаники Костинской свиты, представленной алевролитами с прослоями песчаников и глинистых сланцев и отличающейся крайней неоднородностью фильтрационных свойств – пористость варьирует от 0.014 до 0.108, проницаемость – от 0.01 до 85.6 мкм². Исследовано 66 образцов керна с пористостью от 0.022 до 0.11 и абсолютной проницаемостью от 0.2 до 60 мкм². Породы Костинской свиты гидрофильные. Часть порового пространства за счет нефти гидрофобизирована. В экспериментах по прямоточной капиллярной пропитке определялись три параметра: коэффициент капиллярного насыщения; начальная скорость капиллярного насыщения; коэффициент капилляропроводности. Процесс пропитки аппроксимировался функцией $f(t) = D\sqrt{t}$. Коэффициент капилляропроводности варьировал для различных образцов от 0.1 до 0.4 см/мин^{1/2} ($1.5\text{--}28.5 \cdot 10^{-8}$ м²/с). Начальная скорость капиллярной пропитки составила от 0.06 до 0.2 см/мин; Коэффициент капиллярного вытеснения – от 20 до 71%.

Одним из важных факторов, определяющих заметное отклонение закона капиллярной пропитки от закона Вэшбурна $f(t) = D\sqrt{t}$, является неоднородность пористой среды. Это было продемонстрировано, в частности, в экспериментах по прямоточной капиллярной пропитке волокнистых материалов [Pezron, Bourgain, Queret, 1995]. Эксперименты проводились на материалах типа ISO 8022, отличающихся сильной гидрофобностью. В качестве рабочих жидкостей использовались растворы декана, додекана, гексодекана, *l*-декана и силиконовое масло. Коэффициент поверхностного натяжения варьировал для этих жидкостей от 20.0 до 28.8 мН/м, вязкость – от 0.91 до 21.90 мПа·с. Сходные эксперименты были проведены для искусственных гидрофобных пористых мембран, отличающихся от волокнистых материалов высокой степенью однородности по микроструктуре пористого пространства. Если кривые пропитки для искусственных мембран на начальной стадии хорошо аппроксимировались законом $f(t) = D\sqrt{t}$, в результате чего были получены разумные оценки эффективного радиуса пор 0.45 мкм и эффективного сечения пор 1.56 мм², то для волокнистых материалов кривые пропитки отличались излишней выпуклостью, не позволяющей использовать этот закон аппроксимации. Для дифференциации пропитки по объему и по поверхности нитей волокнистого материала были проведены специальные процедуры и показано заметное различие скоростей пропитки по объему и по поверхности. Сходные эффекты можно ожи-

дать и в неоднородных горных породах, в частности, характеризующихся двойной пористостью при наличии каверн и трещин.

В работе [Grattoni, Chiotis, Dawe, 1995] представлены результаты экспериментов по прямоточной капиллярной пропитке пористых песчаников с целью определения их относительной смачиваемости. Были выполнены две серии экспериментов – одна с образцами цилиндрической формы диаметром 24 мм; другая с тонкими прямоугольными пластинами размером 5.5×11.7×24.2 мм. Эксперименты проводились при комнатной температуре 23.5–24 °С. Состав песчаников преимущественно кварцевый; представлены также разновидности карбонатов, фельдшпатиты, кальциты и, возможно, доломиты. Средний размер зерен варьировал от 0.1 до 0.3 мм. В качестве рабочих жидкостей использовались смеси этанола и воды. Плотность смесей варьировала от 0.789 до 0.998 г/см³, вязкость – от 1.002 до 2.78 мПа·с, коэффициент поверхностного натяжения – от 22.4 до 72.1 мН/м. Кривые прироста веса образцов в диапазоне времен от 100 до 1000 с аппроксимировались уравнением Вашбурна, и определялась относительная величина косинуса краевого угла. Показано, что максимальная смачиваемость соответствует критическому коэффициенту поверхностного натяжения, равному 28 мН/м. Далее с ростом коэффициента поверхностного натяжения смачиваемость уменьшается, причем быстрее для образцов-пластинок, вырезанных нормально к плоскости напластования.

В работе [Ma et al., 1999] приведены результаты аналогичных экспериментов по пропитке образцов нефтяных коллекторов с целью оценки коэффициента предельного капиллярного вытеснения и индекса смачиваемости. Эксперименты проводились с цилиндрическими образцами песчаника Берea диаметром 38 мм и длиной от 62 до 72 мм, разбитых на две группы.

Средняя пористость образцов первой группы составляла 0.22, проницаемость – от 300 до 350 мД. Сначала в течение 10 сут образцы насыщались водным раствором, содержащим NaCl (21.3 г/л), CaCl₂·6H₂O (0.6 г/л), KCl (0.1 г/л) и MgCl₂·6H₂O (0.2 г/л) при плотности 1.012 г/см³ и вязкости 0.967 сП. Затем этот раствор вытеснялся нефтью с плотностью 0.895 г/см³ и вязкостью 39.25 сП. Коэффициент поверхностного натяжения между водным раствором и нефтью составлял 24.2 мН/м; средняя остаточная водонасыщенность – 25%. После этого образцы от 1 до 240 ч выдерживались при температуре 88 °С. Кривые капиллярного вытеснения рассчитывались по изменению веса образцов, погруженных в водный раствор. Пропитка осуществлялась обычно в течение четырех суток, после чего проводилось вынужденное вытеснение оставшейся нефти водным раствором при скорости нагнетания приблизительно 0.2 см³/с.

Образцы второй группы сначала были насыщены 2%-ным водным раствором CaCl₂ с плотностью 1.01 г/см³ и вязкостью 0.9964 сП. Проницаемость образцов по водному раствору была близка к 500 мД. Изменение исходной смачиваемости образцов достигалось путем насыщения их нефтью с плотностью 0.835 г/см³ и вязкостью 7.35 сП. Коэффициент поверхностного натяжения между водным раствором и нефтью составлял 23.1 мН/м, начальная водонасыщенность – приблизительно 25%. Образцы выдерживались при температуре 80 °С от 6 ч до 6 недель.

Коэффициент капиллярного вытеснения для более вязкой нефти составил около 0.3–0.4, тогда как тот же коэффициент для менее вязкой нефти достигал 0.6–0.7.

Сопоставлению характеристик прямоточной и противоточной капиллярной пропитки диатомитов и песчаников посвящена работа [Akin et al., 2000]. Диатомиты (кремнистая сцементированная горная порода), в отличие от обычных песчаников, характеризуются более низкой проницаемостью при сравнительно высокой пористости. Диатомиты гидрофильны, их матрица состоит из биогенного силиката с небольшим количеством глины; проницаемость диатомитов – 0.1–10 мД, пористость – 0.35–0.65. Экспериментальные цилиндрические образцы имели длину $L=95$ мм и диаметр $D=25$ мм; боко-

вая поверхность образцов изолировалась. Средний размер поровых каналов в образцах оценен как ~15 мкм. По другим (независимым) определениям характерный размер зерен (как и пор) диатомита составляет 10–50 мкм при размере поровых каналов 5 мкм. Размер зерен использованного песчаника Береа ~200 мкм. Зерна и диатомита, и песчаника угловатые, что свидетельствует о высоком потенциале капиллярной пропитки водой. В качестве рабочих флюидов использовались вода ($\rho=1000$ кг/м³, $\mu=1.0$ мПа·с, $\gamma=72$ мН/м), *n*-декан ($\rho=730$ кг/м³, $\mu=0.84$ мПа·с, $\gamma=51.4$ мН/м) и воздух ($\rho=1.82$ кг/м³, $\mu=0.0182$ мПа·с).

В первой серии экспериментов исследовались характеристики противоточной капиллярной пропитки водой первоначально сухих образцов. Графики прироста веса образцов пересчитывались в кривые роста насыщенности в безразмерных координатах:

$$S_D = f(\sqrt{t_D}), \quad \text{где } S_D = \frac{S}{\rho_w m V}, \quad t_D = t \gamma \sqrt{\frac{k}{m \mu_s L_c^2}}, \quad \mu_s = \sqrt{\mu_w \mu_{nw}}.$$

Для трех образцов песчаника получено хорошее совпадение кривых пропитки с выходом на прямолинейный отрезок. Аналогичный результат получен и для двух образцов диатомита. Обнаружено, что скорость капиллярной пропитки менее проницаемых диатомитов выше, чем скорость пропитки высокопроницаемых песчаников. Время полной пропитки образцов составило приблизительно 1 ч (или в указанных безразмерных единицах времени – 25). Во время пропитки производилось сканирование порового пространства образцов методом рентгеновской томографии. Обнаружено, что на начальной стадии пропитки фронт капиллярного вытеснения контрастный, но с момента времени 0.62 постепенно диффузионно размывается.

Во второй серии экспериментов образцы первоначально насыщались моделью нефти (*n*-декан) с остаточной водой. Полученные кривые капиллярной пропитки в безразмерных координатах сильно отличались от линейных – как для песчаников, так и для диатомитов они имели *S*-образную форму. Тем не менее, на этих графиках можно выделить прямолинейный участок, по мнению авторов экспериментов, соответствующий стадии пропитки, на которой доминируют капиллярные силы. По времени противоточная капиллярная пропитка нефтеводонасыщенных образцов продолжалась значительно дольше пропитки первоначально сухих образцов. При пропитке нефтенасыщенного диатомита без начальной остаточной воды максимально достигнутая водонасыщенность составила 73% по сравнению с предельной водонасыщенностью 95%, достигнутой при пропитке начально сухого образца. Фронт пропитки характеризовался большей размытостью по сравнению с первой серией экспериментов. Эффективность капиллярного вытеснения нефти водой из нефтеводонасыщенных образцов диатомита составила от 36% до 73% и, очевидно, ухудшалась с ростом начального содержания остаточной воды.

Полученные результаты обсуждаются не столько с позиции их совпадения с известными теоретическими моделями, сколько с феноменологической точки зрения с привлечением ряда интересных особенностей микроструктуры порового пространства песчаников и диатомитов. Предполагается, в частности, что микронеровности стенок гидрофильных пор и поровых каналов способствуют увеличению эффективности противоточной капиллярной пропитки.

В экспериментах, представленных в работе [Baldwin, Spinler, 2002], методом магнитного резонанса прослежена пространственно-временная эволюция водонасыщенности при капиллярной пропитке нефтенасыщенных образцов мела с разной начальной водонасыщенностью. В результате выявлено два механизма капиллярной пропитки, условно классифицированные как “поршневой” и “пленочный”. Первый реализуется при

пропитке нефтенасыщенных образцов с малой начальной водонасыщенностью, второй – при пропитке образцов с большей начальной водонасыщенностью.

Результаты лабораторных экспериментов по влиянию виброакустического воздействия на параметры капиллярной пропитки кернов Ярегского месторождения высоковязкой нефти представлены в работе [Каракчиев, 2002]. Вязкость нефти в пластовых условиях составляет до 20 мПа·с. Заметное увеличение скорости пропитки было зафиксировано при частоте упругих колебаний выше 30 Гц; при частоте 200 Гц было достигнуто четырехкратное увеличение скорости капиллярной пропитки.

Результаты серии экспериментов по изучению параметров противоточной капиллярной пропитки кернов нефтяных пластов в поле упругих колебаний описаны в работе [Кузнецов и др., 2004]. Варьировались проницаемость и пористость образцов, а также плотность и вязкость вытесняемой нефти. Упругое воздействие осуществлялось в полосе частот от 175 до 500 Гц; плотность потока излучения составляла, как правило, десятки Вт/м². Отметим три важных, с нашей точки зрения, момента.

При противоточной капиллярной пропитке образца с проницаемостью 0.611 мкм² и пористостью 0.225 коэффициент вытеснения в течение 12 сут достиг 40%. Последующее упругое воздействие не вызвало дополнительной пропитки.

Образец с проницаемостью 0.035 мкм² и пористостью 0.208 в течение первых 4 сут показал нулевую пропитку. Упругое воздействие инициировало процесс пропитки, но только в первые часы. Следующая инициация пропитки была зафиксирована только спустя сутки. Проведенный цикл упругого воздействия позволил достичь коэффициента вытеснения 30%.

Два одинаковых образца с проницаемостью приблизительно 0.001 мкм² и пористостью 0.16 первоначально были насыщены керосином (вязкость 2.0 мПа·с) и нефтью (вязкость 5.0 мПа·с). Коэффициент капиллярного вытеснения керосина через 200 ч достиг максимальной величины 33%, и упругое воздействие не привело к его увеличению. Коэффициент капиллярного вытеснения нефти через 200 ч достиг 28%, последующее циклическое упругое воздействие увеличило его до 33%.

Экспериментальная оценка коэффициента диффузии влаги при капиллярной пропитке автоклавного газобетона с плотностью 600 кг/м³ и пористостью приблизительно 0.80 содержится в работе [Низовцев и др., 2005]. Эксперименты проводились в изотермических условиях при температуре 20 °С. Боковые поверхности образцов с поперечным сечением 100×100 мм и высотой 80–100 мм изолировались; нижний торец соприкасался с водой, к верхнему был открыт доступ воздуха с постоянной влажностью 30%. Продвижение влаги внутри образца фиксировалось в сечениях на разной высоте гамма-плотномером. При относительной влажности газобетона ниже 30% величина коэффициента диффузии D менялась незначительно и составляла приблизительно 10^{-8} м²/с; при влажности выше 30% наблюдался резкий рост D до величин порядка 10^{-6} м²/с.

Сильная нелинейность графиков капиллярной пропитки в координатах $S - \sqrt{t}$ на относительно больших временах продемонстрирована экспериментами по пропитке древесины маслом [Яриз, Черниченко, Быков, 2005]. Использовались образцы бука, дуба, сосны и ольхи. Линейная зависимость примерно до суток наблюдалась только для бука; для других пород начальный линейный участок составлял не более 1–2 ч, после чего насыщенность асимптотически приближалась к максимально возможной.

В работе [Patro, Bhattacharyya, Jayaram, 2007] представлены результаты лабораторных экспериментов по прямооточной капиллярной пропитке сыпного слоя, представленного порошком Al₂O₃, зерна которого имеют либо угловатую, либо круглую форму. Характерный размер зерен в двух насыпках составлял 25–37 мкм и 63–75 мкм. В качестве жидкости использовался раствор полиэтиленгликоля. Процесс пропитки описывался законом Вашбурна. Эффективный радиус капилляров определялся

при следующих параметрах – $\mu=18.3$ мПа·с, $\gamma=48.0$ мН/м, $\rho=1.13 \cdot 10^{-3}$ кг/м³, $\theta=41^\circ$ (статически определенный краевой угол). Существенным экспериментальным фактом стало то, что эффективный радиус для обеих насыпок на 1–2 порядка меньше среднего размера гидродинамического радиуса, определенного традиционными, чисто геометрическими способами. Так, экспериментальная величина среднего эффективного радиуса для насыпки с размером зерен 25–37 мкм составляла 0.06 мкм, а средняя величина гидродинамического радиуса – 3 мкм.

В работе [Закиров, Муртазалиев, 2009] проведено сопоставление предельных коэффициентов вытеснения газа водой из образцов песчаников и карбонатов, полученных методом принудительного вытеснения и методом капиллярной пропитки. Было исследовано 18 образцов цилиндрической формы длиной 38 мм и диаметром 28 мм. Авторы попытались описать зависимости между коэффициентами вытеснения и пористостью и проницаемостью простыми линейными функциями, однако при этом получили недопустимо большой разброс. В связи с этим авторы обращают внимание на то, что для одной пары образцов, несмотря на существенное различие их петрофизических характеристик, значение коэффициентов вытеснения оказались близкими, а для другой при близости петрофизических параметров значения коэффициентов оказались различными.

В работе [Поспелов, 2008] содержится ссылка на эксперименты по противоточной капиллярной пропитке образцов гранитоидов. Пористость образцов составляла приблизительно 0.03. Было обнаружено, что скорость противоточной капиллярной пропитки образца, содержащего остаточную воду, т.е. достаточно гидрофильного, оказалась заметно выше по сравнению с гидрофобизированным образцом. При одинаковом времени пропитки, составляющем 50 ч, нефтеотдача гидрофильного образца оказалась более чем в два раза выше нефтеотдачи гидрофобного, не содержащего следов остаточной воды, и достигла 0.6. В этой же работе предлагается способ интенсификации капиллярной пропитки за счет акустического воздействия на нефтяные пласты с помощью скважинного излучателя частотой 20 кГц и интенсивностью 2 Вт/см².

Возможности интенсификации капиллярной пропитки за счет ультразвукового эффекта обсуждаются также в работе [Москаленко, Данилов, 2009], в которой, в частотности, показано, что раствор едкого калия под воздействием ультразвука более глубоко проникает в капиллярную сеть бурого угля, усиливая его разложение, что, в свою очередь, вызывает увеличение выхода гуминовых кислот.

Важную роль при капиллярной пропитке сухих пористых сред играет нестационарность процесса теплообмена в системе твердая матрица–жидкость–пар, генерируемого выделением тепла при сорбции пара стенками пор. Этот эффект исследован в экспериментах по прямоточной капиллярной пропитке, представленных в работе [Низовцев, Стерлягов, Терехов, 2010]. Эксперименты проводились с образцами газобетона плотностью 600 кг/м³ и пористостью приблизительно 0.8. Из газобетона были изготовлены образцы размерами 10×100×100 мм, которые высушивались до постоянной массы, после чего их боковые поверхности изолировались. Нижняя поверхность образца соприкасалась с поверхностью воды, а верхняя контактировала с воздухом. Начальная температура образца и воды была 26.5 °С. Далее с шагом 5 с фиксировались термограммы боковой поверхности образца. Пример такой термограммы, зафиксированной до высоты 24 мм через 1 мин после начала пропитки, показывает, что в нижней части образца наблюдалась область пониженных до 20 °С температур; на высоте приблизительно 5 мм по всей ширине образца происходило резкое повышение температуры почти до 38 °С, а затем постепенное ее снижение. Понижение температуры в нижней части образца связывается авторами работы с испарением, а повышение перед фронтом пропитки – с сорбционным увлажнением стенок пор. Построенные профили распреде-

ления температур по высоте образца в разные моменты времени от начала прямооточной пропитки показывают, что сечение с максимальной температурой перемещается вверх, причем величина максимальной температуры постепенно уменьшается. Показательно изменение температуры в отдельном сечении образца. Например, на высоте 20 мм уже через несколько секунд после начала пропитки температура начала резко увеличиваться от фоновой 26.5 °С; приблизительно через 380 с она достигла максимума 35 °С и в течение последующих 1200–1300 с постепенно снизилась до фоновой. Эффект изменения температуры при капиллярной пропитке первоначально сухих образцов очень важно учитывать, в частности, при интерпретации данных регистрации гидростатического веса образца, поскольку рост температуры приводит к тепловому расширению, т.е. к увеличению объема и, соответственно, к увеличению выталкивающей силы.

Большой интерес у исследователей по-прежнему вызывает не только предельная величина капиллярного обмена для пористых сред разного состава, микроструктуры и пр., но и его скорость, в частности, функциональная зависимость изменения насыщенности от времени на разных стадиях пропитки. Например, в работе [Мартос, Палащенко, 2010] приведены кривые насыщения дистиллированной водой изначально сухих треугольных и прямоугольных фигур из фильтровальной бумаги. Было обнаружено отсутствие интерференции фронтов пропитки через соседние ребра фигур, причем скорость движения фронтов на начальной и средней стадиях пропитки хорошо аппроксимировалась функцией $S \sim \sqrt{t}$.

В работе [Гайсин и др., 2011] приведены три графика кривых капиллярной пропитки двух образцов керна пласта Д₁ Хасырейского месторождения и одного образца керна пласта БС₁₀ Ефремовского месторождения. Породы пласта Д₁ преимущественно гидрофобные, породы пласта БС₁₀ преимущественно гидрофильные, что отразилось на величинах предельного коэффициента капиллярного вытеснения – для двух первых образцов через месяц пропитки коэффициенты вытеснения достигли 0.022 и 0.066; для третьего пропитка началась уже в первые сутки и за 15 сут предельный коэффициент вытеснения достиг 0.3.

В серии экспериментов, проведенных Я. Ли с соавторами [Li, Morrow, Ruth, 2008; Li et al., 2011], реализована попытка замера капиллярного давления на фронте самопроизвольной противоточной капиллярной пропитки образцов песчаника Береа. Эксперименты проводились с цилиндрическими образцами, боковая поверхность которых была изолирована, один торец (нижний) был оставлен свободным, а второй (верхний) изолирован и подсоединен к датчику давления. При необходимости через верхний изолированный торец в образец мог нагнетаться воздух. Проницаемость трех экспериментальных образцов составляла 0.06 (образец *L*), 0.5 (образец *M*) и 1.07 (образец *N*) мкм². К нижнему торцу каждого образца монтировалась полупроницаемая мембрана с газопроницаемостью либо 0.003 мкм², либо 0.065 мкм². В качестве жидкости использовалась нефть с вязкостью 0.38 мПа·с и плотностью 0.788 г/см³ и солевой раствор с вязкостью 1.02 мПа·с. В одном из экспериментов использовалась тяжелая нефть с вязкостью 163.2 мПа·с и плотностью 0.874 г/см³; коэффициент поверхностного натяжения нефть–воздух – 25.9 мН/м, вязкая нефть–воздух – 31.5 мН/м, вода–воздух – 72.0 мН/м. Проводились измерения давления воздуха на верхнем торце образца, количества впитываемой жидкости и высоты фронта пропитки. При пропитке сухих образцов нефтью капиллярное давление на фронте пропитки составило 21.3 кПа (образец *L*), 14.5 кПа (образец *M*) и 6.6 кПа (образец *N*). С использованием этих величин по упрощенной формуле $r_{eff}=2\gamma/P_c$ был определен эффективный радиус пор, который сопоставлялся с его оценкой по формуле $r_{eff}=2(2k/m)^{1/2}$. Зависимость между этими радиусами оказалась нелинейной, что, по мнению авторов экспериментов, неудивительно и свидетельствует о том, что геометрия

пор у песчаников с разной проницаемостью различна и не поддается столь простому формальному описанию.

Оригинальные эксперименты

Параметры противоточной капиллярной пропитки определялись автором настоящей статьи по изменению гидростатического веса образцов, полностью погруженных в пропитывающую жидкость. Принцип измерения состоял в преобразовании наклона коромысла рычажных весов ВР-4Э в электрический сигнал. На коромысле весов закреплялся датчик наклона на базе твердотельного акселерометра. Исследуемый образец подвешивался на тонкой нити к плечу коромысла и опускался в сосуд с водой. На другом плече коромысла размещался компенсирующий груз. Эксперименты проводились при комнатной температуре.

Регистрация прироста веса образца выполнялась автоматически с выводом данных на персональный компьютер с дискретизацией по времени от 10 с до 2 мин. Чувствительность к изменению веса образца в разных экспериментах составляла от 0.3 до 0.5 мг.

Образцы представляли собой цилиндры с приблизительно одинаковыми длиной и диаметром (приблизительно по 30 мм). Подготовка образцов заключалась в их первоначальной экстракции и сушке до постоянного веса. В качестве пропитывающей жидкости использовалась дистиллированная вода. Были проведены три серии экспериментов. В первой серии образцы с открытыми торцами и боковой поверхностью полностью погружались в воду, причем их боковая поверхность была параллельна поверхности воды. Во второй боковая поверхность образцов изолировалась, проницаемыми оставались только два торца. В третьей серии один из торцов также изолировался, и пропитка осуществлялась только через оставшийся проницаемый торец. Длительность каждого эксперимента достигала 1000 ч (~40 сут).

По результатам экспериментов были построены кривые самопроизвольного капиллярного вытеснения воздуха водой в координатах текущая водонасыщенность– время пропитки. Одна из таких кривых в качестве примера приведена на рис. 1.

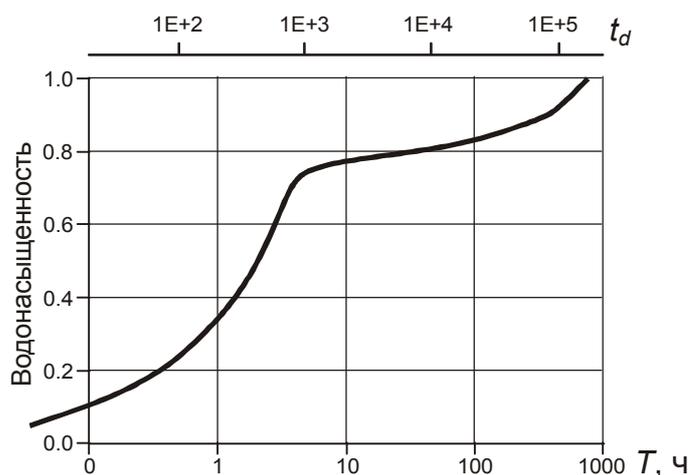


Рис. 1. Пример кривой самопроизвольного капиллярного вытеснения воздуха водой при противоточной капиллярной пропитке образца керна через один проницаемый торец. Нижняя горизонтальная ось – абсолютное время эксперимента; верхняя – безразмерное время, рассчитанное по формуле (1)

Можно видеть, что S-образная форма кривой, подобная наблюдаемой в большинстве известных аналогичных экспериментов (см., например, [Morrow et al., 2006]), сохраняется только при пропитке до 10–100 ч. При продолжении эксперимента (в нашем случае, как отмечено выше, до 1000 ч) форма кривой меняется и становится скорее N-образной. На заключительной стадии отмечается устойчивый рост насыщенности к максимально возможной, равной 1.

Полученные кривые позволяли определить ряд параметров: показатель степени α закона $S \propto t^\alpha$, аппроксимирующего рост насыщенности на начальной стадии пропитки; времена T_1 и T_2 , ограничивающие интервал “кажущегося” снижения скорости пропитки; коэффициент β закона $S \propto \beta \log t$, аппроксимирующего рост насыщенности на конечной стадии пропитки. Эти три параметра определялись при пропитке, осуществляемой через один или оба торца исследуемого образца; дополнительно определялся коэффициент γ закона $S \propto \gamma \log t$, аппроксимирующего пропитку образца с полностью открытой поверхностью на начальной стадии. Выборка перечисленных параметров вместе с проницаемостью k и пористостью m образцов представлена в таблице.

Параметры противоточной капиллярной пропитки

№ образца	$k \cdot 10^{-15}$, м ²	m	$\sqrt{k/m}$, мкм	α	T_1 , ч	T_2 , ч	β	γ
Месторождение Восточный Мессоях								
1	3.72	0.13	0.17	0.59 ⁽²⁾ 0.62 ⁽³⁾	1.3 ⁽²⁾ 2.1 ⁽³⁾	– –	– –	0.17 ⁽¹⁾ $t < 0.5$ ч
2	2.09	0.12	0.13	0.47 ⁽²⁾ 0.57 ⁽³⁾	1.7 ⁽²⁾ 4.2 ⁽³⁾	– 250 ⁽³⁾	– 0.30 ⁽³⁾	0.13 ⁽¹⁾ $t < 0.5$ ч
3	4.98	0.14	0.19	0.59 ⁽²⁾ 0.60 ⁽³⁾	2.1 ⁽²⁾ 4.2 ⁽³⁾	– 250 ⁽³⁾	– 0.30 ⁽³⁾	0.19 ⁽¹⁾ $t < 0.8$ ч
Ярактинское месторождение								
4	16.7	0.11	0.40	0.57 ⁽²⁾ 0.61 ⁽³⁾	1.0 ⁽²⁾ 3.3 ⁽³⁾	20 ⁽²⁾ 10 ⁽³⁾	– –	0.16 ⁽¹⁾ $t < 0.3$ ч
5	10.1	0.09	0.33	0.59 ⁽²⁾ 0.59 ⁽³⁾	10 ⁽²⁾ 10 ⁽³⁾	100 ⁽²⁾ –	– –	0.12 ⁽¹⁾ $t < 0.3$ ч
Береговое месторождение								
6	19.9	0.17	0.35	0.62 ⁽²⁾ 0.63 ⁽³⁾	0.2 ⁽²⁾ 1.2 ⁽³⁾	10 ⁽²⁾ 30 ⁽³⁾	– 0.18 ⁽³⁾	0.35 ⁽¹⁾ $t < 0.2$ ч
7	20.0	0.18	0.33	0.61 ⁽²⁾ 0.61 ⁽³⁾	0.2 ⁽²⁾ 1.5 ⁽³⁾	10 ⁽²⁾ 10 ⁽³⁾	– 0.16 ⁽³⁾	–
8	35.1	0.16	0.47	0.68 ⁽²⁾ 0.66 ⁽³⁾	0.4 ⁽²⁾ 1.3 ⁽³⁾	10 ⁽²⁾ 10 ⁽³⁾	– 0.18 ⁽³⁾	0.53 ⁽¹⁾ $t < 0.2$ час
9	24.0	0.14	0.41	0.81 ⁽²⁾ 0.94 ⁽³⁾	0.3 ⁽²⁾ 0.4 ⁽³⁾	10 ⁽²⁾ 10 ⁽³⁾	0.20 ⁽²⁾ 0.13 ⁽³⁾	0.58 ⁽¹⁾ $t < 0.07$ ч
10	11.0	0.13	0.29	0.58 ⁽²⁾ 0.62 ⁽³⁾	1.1 ⁽²⁾ 2.0 ⁽³⁾	30 ⁽²⁾ –	0.22 ⁽²⁾ –	0.37 ⁽¹⁾ $t < 0.5$ ч
Свободное месторождение								
11	990	0.23	2.07	–	0.1 ⁽²⁾ 0.2 ⁽³⁾	10 ⁽²⁾ 6 ⁽³⁾	0.10 ⁽²⁾ 0.09 ⁽³⁾	–
12	314	0.15	1.47	–	<0.05 ^(2,3)	–	–	–
13	923	0.24	1.96	–	<0.05 ^(2,3)	–	–	–

Примечание: ⁽¹⁾ – пропитка через всю поверхность образца; ⁽²⁾ – через два торца образца; ⁽³⁾ – через один торец образца.

Зависимости вышеназванных эмпирических параметров от величины $\sqrt{k/m}$ для разных условий эксперимента (способа пропитки образца), приведенные на рис. 2, позволяют проследить ряд тенденций.

1. В начальной стадии противоточной капиллярной пропитки образцов с проницаемостью менее 40 мД через один или два открытых торца увеличение насыщенности хорошо аппроксимируется степенным законом $S \propto t^\alpha$. Согласно теоретическим моделям и некоторым экспериментам с разными пористыми материалами, показатель $\alpha=0.5$.

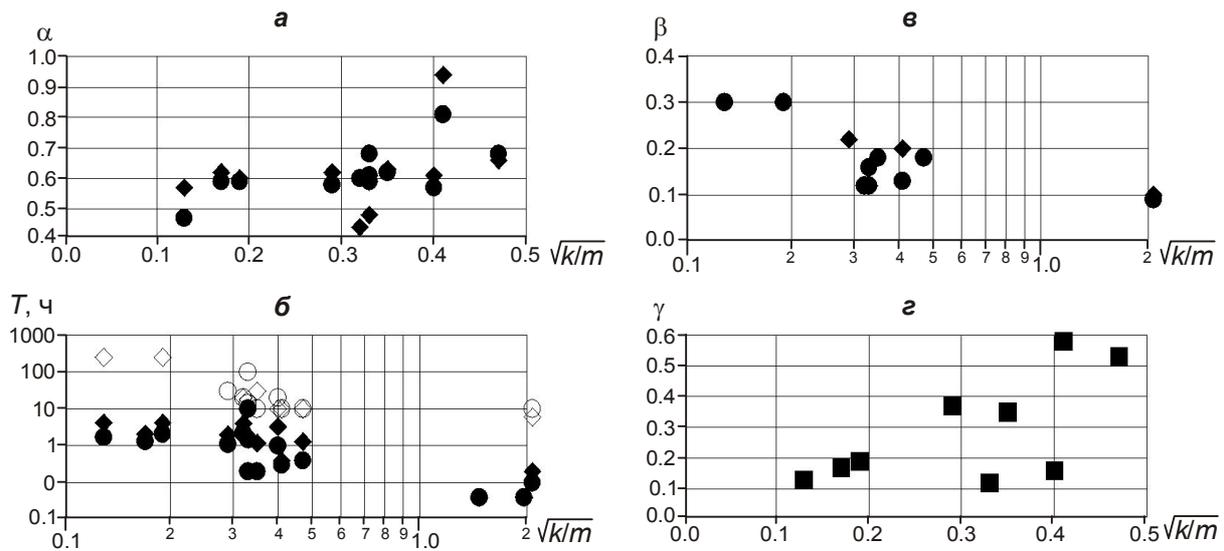


Рис. 2. Зависимость от $\sqrt{k/m}$ эмпирических параметров α (а), T (б), β (в), γ (г) при противоточной капиллярной пропитке образцов керн с обоих торцов (кружки), с одного торца (ромбы), по всей поверхности (квадраты). Залитые значки на фрагменте б – зависимость параметров T_1 , без заливки – T_2 . По осям абсцисс – величины $\sqrt{k/m}$, мкм

В наших же экспериментах показатель α превышает эту теоретическую величину, варьируя в пределах от 0.57 до 0.68 и даже выше. Прослеживается явная тенденция увеличения показателя α с ростом проницаемости k или величины $\sqrt{k/m}$.

2. Начальная стадия противоточной капиллярной пропитки образцов с проницаемостью порядка сотен мД длится менее 2 мин. За это время насыщенность достигает 0.4 и более. Поэтому в наших экспериментах с такими образцами не удалось уверенно определить величины показателя α и коэффициента γ . Более того, точность определения этих параметров сильно зависит от фиксации начального (нулевого) времени, что трудно осуществимо технически из-за возмущения начального температурного и механического состояния системы образец–вода и требует специальной методики экспериментов.

3. Конечная стадия противоточной капиллярной пропитки исследованных образцов приближенно описывается законом $S \propto \beta \log t$ с медленным асимптотическим приближением насыщенности к максимально возможной (в отдельных случаях – даже, как это не удивительно, к 1). Величина коэффициента β варьирует от 0.1 до 0.3 и имеет тенденцию к снижению с увеличением проницаемости образцов.

4. Начальная стадия противоточной капиллярной пропитки образцов с проницаемостью менее 40 мД при полностью открытой поверхности хорошо аппроксимируется законом $S \propto \gamma \log t$. Величина коэффициента γ варьирует от 0.12 до 0.58 и имеет тенденцию к увеличению с ростом проницаемости образцов.

5. Значения T_1 и T_2 , ограничивающие интервал “промежуточного” замедления капиллярной пропитки, имеют тенденцию к снижению с увеличением величины $\sqrt{k/m}$, как это можно видеть на рис. 2, в. Там же хорошо видно, что ширина интервала между моментами T_1 и T_2 в логарифмическом масштабе остается почти постоянной во всем диапазоне $\sqrt{k/m}$, из чего следует приближенное выражение $T_2 \approx 100 \cdot T_1$.

Возможная связь эмпирических законов $S \propto t^\alpha$, $S \propto \beta \log t$ и $S \propto \gamma \log t$ с фрактальными свойствами проницаемых пористых сред обсуждается в работе [Барабанов, Любушин, 2013].

Наличие промежуточного интервала снижения прироста насыщенности было обнаружено нами и ранее в серии экспериментов по противоточной капиллярной пропитке водой образцов, изначально полностью нефтенасыщенных [Барabanов, 2011]. Эксперименты проводились с образцами карбонатных нефтяных коллекторов порово-трещинного типа. Пористость образцов варьировала от 0.07 до 0.25, проницаемость – $(0.2 \div 34.5) \cdot 10^{-3}$ мкм². Капиллярное вытеснение нефти с плотностью 0.854 г/см³ и вязкостью 6.9 мПа·с из образцов осуществлялось водой с минерализацией 65 г/л и плотностью 1.039 г/см³. В среднем временное замедление скорости капиллярной пропитки было зафиксировано на интервале от 40 до 100 ч. Отсюда можно заключить, что наблюдаемый эффект, проявляющийся и в системах жидкость–жидкость, и в системах газ-жидкость, не связан со спецификой растворения газов в жидкостях.

Заключение

Автором предпринята попытка показать, что процесс капиллярной пропитки пористых сред несмотря на его кажущуюся простоту очень сложен и требует не только чисто механических и гидродинамических подходов, но и учета термодинамического состояния контакта газообразной, жидкой и твердой фаз. В разных моделях это учитывается с той или иной степенью детальности.

Проведенные эксперименты продемонстрировали нелинейное развитие процесса противоточной капиллярной пропитки – после временной стадии резкого замедления скорости пропитки и кажущегося выхода предельной насыщенности на асимптоту “неожиданно” может начаться новое увеличение скорости пропитки и дальнейшее развитие процесса. Мы сознательно аппроксимировали участки кривых капиллярной пропитки простейшими степенными и логарифмическими законами, поскольку обнаружение простых зависимостей параметров этих законов от стандартных петрофизических свойств исследуемых образцов, на наш взгляд, надежно свидетельствует о существовании более общего и более сложного механизма капиллярной пропитки, одновременно допускающего простое эмпирическое описание.

Экспериментальные работы в представленном направлении следует продолжать. При этом необходимо не только привлекать образцы горных пород с другими составом, микроструктурой, характеристикой смачивания и т.п., но и проводить дополнительно измерения некоторых иных физических параметров пустотного пространства в процессе капиллярной пропитки.

Литература

- Алексеева А.Г. Численное решение задачи о противоточной капиллярной пропитке пористой среды в неизотермических условиях // II Всеросс. науч. конф. и VII Всеросс. школа-семинар “Математическое моделирование развития северных территорий Российской Федерации”. Якутск, 2009. С.23–25.
- Бабенко Ю.И., Иванов Е.В. Экстрагирование из тела с бидисперсной пористой структурой // Теоретические основы химической технологии. 2009. Т. 43, № 4. С.408–414.
- Барabanов В.Л. Особенности противоточной капиллярной пропитки низкопроницаемых горных пород // Теория и практика применения методов нефтеотдачи пластов: Материалы III Международного научного симпозиума 20–21 сентября 2011 г. Т. 2. М.: ВНИИнефть, 2011. С.78–82.
- Барabanов В.Л., Любушин А.А. Опыт исследования фрактальных свойств капиллярной пропитки горных пород // Инженерно-физический журнал. 2013. Т. 86, № 1. С.3–13.
- Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М. Движение жидкостей и газов в природных пластах. М.: Недра, 1984. 288 с.

- Гайсин М.Р., Фоломеев А.Е., Макатров А.К., Телин А.Г., Афанасьев И.С., Федоров А.И., Емченко О.В., Зайнулин А.В. Определение смачиваемости керна месторождений Вала Гамбурцева различными методами // Территория Нефтегаз. 2011. № 4. С.46–52.
- Гиматудинов Ш.С. Физика нефтяного и газового пласта. М.: Недра, 1977. 269 с.
- Елисеенко Е.Д., Земских В.И., Молчанова А.Г., Хромовичев М.Н. Экспериментальное изучение вытеснения нефти посредством прямоточной капиллярной пропитки водой и водными растворами метасиликата натрия // Труды 2-й Всесоюзной школы-семинара “Разработка месторождений нефти и газа: современное состояние, проблемы, перспективы”. Звенигород, 11–16 марта 1991 г. М.: Ин-т проблем нефти и газа РАН. 1991. С.450–454.
- Ершова А.А., Попов И.Ю., Чивилихин С.А., Гусаров В.В. Волноводные моды и условия прилипания для течения в наноканале // Докл. РАН. 2010. Т. 432, № 6. С.761–763.
- Жилин А.А., Федоров А.В. Физико-математическое моделирование процессов капиллярной пропитки пористых материалов // Прикладная механика и техническая физика. 2009. Т. 50, № 1. С.42–51.
- Закиров С.Н., Муртазалиев А.Ш. К определению коэффициентов вытеснения для терригенных и карбонатных коллекторов // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2009. № 9. С.45–48.
- Каракчиев Э.И. О влиянии виброакустического воздействия на интенсивность капиллярных процессов при разработке залежи высоковязкой нефти // Техноэкогеофизика – новые технологии извлечения минерально-сырьевых ресурсов в XXI веке: Материалы I Всероссийской геофизической конференции-ярмарки, Ухта, 1–5 окт. 2002 г. Ухта: УГТУ, 2002. С.179–182.
- Копеев Т., Колагьоди Р. Върху капиллярното изтласкване на въгледородните флуиди в пясъчниците от Костинската свита на Мариновгеранската площ. // Годишник на Минно-геоложкия университет. 1992. Т. 38, № 1. С.215–219.
- Коротаев Ю.П., Геров Л.Г., Закиров С.Н., Щербаков Г.А. Фильтрация газов в трещиноватых коллекторах. М.: Недра, 1979. 223 с.
- Кузнецов О.Л., Чиркин И.А., Курьянов Ю.А., Рогоцкий Г.В., Дыбленко В.П. Экспериментальные исследования: Сейсмоакустика пористых и трещиноватых геологических сред. Т. 2. М.: ВНИИгеосистем, 2004. 362 с.
- Лобанов Е.М. Точное автомодельное решение противоточной капиллярной пропитки // Инженерно-физический журнал. 2011. Т. 84, № 5. С. 917–926.
- Мартос В.Н., Палащенко Р.Ю. Кинематика противоточной капиллярной пропитки изотропной пористой среды // Повышение эффективности разработки нефтяных месторождений: Сб. научн. трудов ВНИИнефти. Вып. 143. М., 2010. С.68–77.
- Москаленко Т.В., Данилов О.С. Влияние ультразвука на степень извлечения гуминовых кислот из бурого угля Кангаласского месторождения // Наука и образование. 2009. № 1. С.43–45.
- Мошинский А.И. Математическая модель пропитки и экстрагирования в случае бидисперсного пористого материала // Теоретические основы химической технологии. 2009. Т. 43, № 4. С.401–407.
- Низовцев М.И., Стерлягов А.Н., Терехов В.И. Распространение теплового фронта при капиллярной пропитке пористых материалов // Ползуновский вестник. 2010. № 1. С.39–43.
- Низовцев М.И., Станкус С.В., Стерлягов А.Н., Терехов В.И., Хайрулин Р.А. Экспериментальное определение коэффициентов диффузии влаги в пористых материалах при капиллярном и сорбционном увлажнении // Инженерно-физический журнал. 2005. Т. 78, № 1. С.67–73.
- Поспелов В.В. Некоторые особенности разработки залежей нефти в цеолитсодержащих породах фундамента // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2008 (3) – Электронный ресурс: http://www.ngtp.ru/12/50_2008.pdf
- Юрочко А.И. Особенности вещественного состава и физических свойств кремнистых и глинисто-кремнистых пород-коллекторов Окружного месторождения нефти (о. Сахалин) // Геология нефти и газа. 1981. № 9. С.17–21.
- Яриз В.А., Черниченко В.А., Быков Л.Ф. Оптимизация и модернизация способов глубокой пропитки древесины // Материалы конференции “Импрегнация капиллярно-пористых тел”, г. Днепропетровск, 26–28 октября 2005 г. Днепропетровск: Изд-во ДГУ, 2005. С.40–43.
- Akin S., Schembre J.M., Bhat S.K., Kovscek A.R. Spontaneous imbibition characteristics of diatomite // J. Pet. Sci. Eng. 2000. V. 25, N 1/2. P.149–165.

- Baldwin B.A., Spinler E.A.* In situ saturation development during spontaneous imbibition // *J. Pet. Sci. Eng.* 2002. V. 35, N 1/2. P.23–32.
- Blair P.M.* Calculation of oil displacement by countercurrent water imbibition // *SPEG.* 1964. N 9. P.95–202.
- Blake T.D.* Dynamics of contact line // *Wettability* / Ed. J. Berg. NY., 1993. P.251–310.
- Blake T.D., Haynes J.M.* Kinetics of liquid/liquid displacement // *J. Colloid Interface Sci.* 1969. V. 30. P.421.
- Bourbiaux B.J., Kalaydjian F.J.* Experimental study of concurrent and countercurrent flows in natural porous media // *SPERE.* 1990. N 8. P.361–368.
- Brochard-Wyart F., de Gennes P.-G.* Dynamics of partial wetting // *Adv. Colloid Interface Sci.* 1992. V. 29. P.1.
- Camps-Roach G., O'Carroll D.M., Newson T.A., Sakaki T., Illangasekare T.H.* Experimental investigation of dynamic effects in capillary pressure: grain size dependency and upscaling // *Water Resources Research.* 2010. V. 46. W08544, doi: 10.1029/2009WR008881.
- Cox R.G.* The dynamics of the spreading of a liquids on a solid surface. Pt. 1. Viscous flow // *J. Fluid Mech.* 1986. V. 168. P. 169.
- Cuiec L.E., Bourbiaux B.J., Kalaydjian F.J.* Imbibition in low-permeability porous media: understanding and improvement of oil recovery // 7th Annual Symp. on Enhanced Oil Recovery. Tulsa, OK, April 1990. Paper SPE 20259.
- Cuiec L.E., Bourbiaux B.J., Kalaydjian F.J.* Oil recovery by imbibition in low permeability chalk // *Soc. Pet. Eng., Form. Eval.* 1994. V. 9, N 9. P.200–208.
- Doster F., Zegeling P.A., Hilfer R.* Numerical solutions of a generalized theory for macroscopic capillarity // *Phys. Rev. E.* 2010. V. 81. P.036307-1-036307-13.
- Dussan E.B., V, Davis S.H.* On the motion of a fluid-fluid interface along a solid surface // *J. Fluid Mech.* 1974. V. 65. P.71.
- Grattoni C.A., Chiotis E.D., Dawe R.A.* Determination of relative wettability of porous sandstones by imbibition studies // *J. Chemical Technology and Biotechnology.* 1995. V. 64, N 1. P.17–24.
- Hocking L.M.* A moving fluid interface. Pt. 2. The removal of the force singularity by a slip flow // *J. Fluid Mech.* 1977. V. 79. P.209.
- Hocking L.M.* Rival contact-angle models and the spreading of droplet // *J. Fluid Mech.* 1992. V. 239. P.671.
- Huh C., Scriven L.E.* Hydrodynamics model of steady movement of a solid/liquid/fluid contact line // *J. Colloid Interface Sci.* 1971. V. 35. P.85.
- Koplik J., Banavar J.R., Willemsen J.F.* Molecular dynamics of Poiseuille flow and moving contact lines // *Phys. Rev. Lett.* 1988. V. 60. P.1282.
- Koplik J., Banavar J.R., Willemsen J.F.* Molecular dynamics of fluid flow at solid surfaces // *Phys. Fluids A.* 1989. V. 1. P. 781.
- Li Y.* Analytical solutions for linear counter-current spontaneous imbibition in the frontal flow period // *Transport in Porous Media.* 2011. V. 86. P.827–850.
- Li Y., Morrow N.R., Ruth D.W.* Capillary pressure at the imbibition front during water/oil counter-current spontaneous imbibition // *Transport in Porous Media.* 2008. doi: 10.1007/s 11242-008-9272-2.
- Li Y., Mason G., Morrow N.R., Ruth D.W.* Capillary pressure at a saturation front during restricted counter-current spontaneous imbibition with liquid displacing air // *Transport in Porous Media.* 2011. V. 87. P.275–289.
- Ma S.M., Morrow N.R., Zhang X., Zhou X.* Characterization of wettability from spontaneous imbibition measurements // *J. Canadian Petroleum Technology. Special Edition.* 1999. V. 38, N 13. P.94–47.
- Mattax C.C., Kyte J.R.* Imbibition oil recovery from fracture, water-drive reservoirs // *SPEJ.* 1962. N 6. P.177–184.
- Morrow N.R., Fischer H., Li Y., Mason G., Ruth D., Yin P., Wo S.* Fundamental of reservoir surface energy as related to surface properties, wettability, capillary action, and oil recovery from fractured reservoirs by spontaneous imbibition / DE-FC26-03NT15408/Semi-Annual Report 07/01/2006 – 12/31/2006/ University Ave Laramie, WY 82071.
- Patro D., Bhattacharyya S., Jayaram V.* Flow kinetics in porous ceramics: understanding with non-uniform capillary models // *J. Amer. Ceram. Soc.* 2007. V. 90, N 10. P.3040–3046.

- Petrov P.G., Petrov J.G.* A combined molecular-hydrodynamic approach to wetting kinetics // *Langmuir*. 1992. V. 8. P.1762.
- Pezron I., Bourgain G., Queret D.* Imbibition of a fabric // *J. Colloid and Interface Science*. 1995. V. 173, N 2. P.319–327.
- Reis J.C., Cil M.* A model for oil expulsion by countercurrent water imbibition in rocks: one-dimensional geometry // *J. Petrol. Sci. Eng.* 1993. N 12. P.97–107.
- Ren W., Hu D., E W.* Continuum models for the contact line problem // *Phys. Fluids*. 2010. V. 22, N 10. P.102103/1–13.
- de Ruijter M.J., de Coninck J., Oshanin G.* Droplet spreading: Partial wetting regime revisited // *Langmuir*. 1999. V. 15. P. 2209.
- de Ruijter M.J., Charlot M., Voue M., de Coninck J.* Experimental evidence of several time scales in drop spreading // *Langmuir*. 2000. V. 16. P.2363.
- Shikhmurzaev Y.D., Sprittles J.E.* Wetting front dynamics in an isotropic porous medium // *J. Fluids Mechanics*. 2012. V. 694. P.399–407.
- Thompson P.A., Robbins M.O.* Simulation of contact-line motion: Slip and the dynamic contact angle // *Phys. Rev. Lett.* 1989. V. 63. P.766.
- Washburn E.W.* The dynamics of capillary flow // *Phys. Rev.* 1921. V. 17. P.273–283.
- Yazzan S.K., Bentsen R.G., Trivedi J.J.* Theoretical development of a novel equation for dynamic spontaneous imbibition with variable inlet saturation and interfacial coupling effects // *Transport in Porous Media*. 2011. V. 86. P.705–717.

Сведения об авторе

БАРАБАНОВ Вячеслав Леонидович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН. 119333, Москва, ул. Губкина, д. 3, ИПНГ РАН, тел. (499) 135-7221. E-mail: vlbarabanov@mail.ru

EMPIRICAL PARAMETERS FOR THE MODEL OF COUNTERCURRENT CAPILLARY IMBIBITION IN ROCKS

V.L. Barabanov

Institute of Oil and Gas Research RAS, Moscow, Russia

Abstract. The review was carried out of the theoretical models of countercurrent capillary flow of porous media and its experimental tests. The results of the new experiments are discussed. The permeability of test kерна ranges between several D to several hundreds D . The characteristic feature of our experiments was their relatively long duration with regard to traditional tests. It was shown that after rapid decrease of imbibition rate and reaching apparent constant saturation level, imbibition rate increased again and reached the second maximum. The curves of the saturations dependence on time were approximated by power and semi-logarithmic functions. The empirical parameters of these functions were obtained and compared to petrophysical properties of the rocks.

Keywords: rocks, countercurrent imbibitions, capillarity effects, permeability, porosity, laboratory experiments.