

УДК: 51-73 519.6

Численное исследование фильтрации газоконденсатной смеси в пористой среде

А. В. Волохова^{1,a}, Е. В. Земляная^{1,2,b}, В. В. Качалов³,
В. Н. Сокотущенко^{2,3}, В. С. Рихвицкий¹

¹Объединенный институт ядерных исследований,
Россия, 141980, г. Дубна, ул. Жолио Кюри, д. 6

²Государственный университет «Дубна»,
Россия, 141980, г. Дубна, ул. Университетская, д. 19

³Объединенный институт высоких температур РАН,
Россия, 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2

E-mail: ^a volokhova@jinr.ru, ^b elena@jinr.ru

Получено 20.12.2017, после доработки — 26.02.2018.

Принято к публикации 15.03.2018.

В последние десятилетия важное значение приобретает разработка методов повышения эффективности извлечения углеводородов в месторождениях с нетрадиционными запасами, содержащими в больших количествах газовый конденсат. Это делает актуальным развитие методов математического моделирования, реалистично описывающих процессы фильтрации газоконденсатной смеси в пористой среде.

В данной работе рассматривается математическая модель, описывающая динамику изменения давления, скорости и концентрации компонент двухкомпонентной двухфазовой смеси, поступающей в лабораторную модель пласта, заполненную пористым веществом с известными физико-химическими свойствами. Математическая модель описывается системой нелинейных пространственно-одномерных дифференциальных уравнений в частных производных с соответствующими начальными и граничными условиями. Лабораторные эксперименты показывают, что в течение конечного времени система стабилизируется, что дает основание перейти к стационарной постановке задачи.

Численное решение сформулированной системы обыкновенных дифференциальных уравнений реализовано в среде Maple на основе метода Рунге–Кутты с автоматическим выбором шага. Показано, что полученные на этой основе физические параметры двухкомпонентной газоконденсатной смеси из метана и н-бутана, характеризующие моделируемую систему в режиме стабилизации, хорошо согласуются с имеющимися экспериментальными данными.

Это подтверждает реалистичность выбранного подхода и обоснованность его дальнейшего развития и применения для компьютерного моделирования неравновесных физических процессов в газоконденсатных смесях в пористой среде с целью выработки в перспективе практических рекомендаций по увеличению извлекаемости углеводородного газоконденсата из природных месторождений. В работе представлена математическая постановка системы нелинейных уравнений в частных производных и соответствующей стационарной задачи, описан метод численного исследования, обсуждаются полученные численные результаты в сравнении с экспериментальными данными.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, газоконденсатная смесь, система нелинейных уравнений

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-08-01270А).

UDC: 51-73 519.6

Numerical investigation of the gas-condensate mixture flow in a porous medium

A. V. Volokhova^{1,a}, E. V. Zemlyanaya^{1,2,b}, V. V. Kachalov³,
V. N. Sokotushchenko^{2,3}, V. S. Rikhvitskiy¹

¹Joint Institute for Nuclear Research,
6 Joliot Curie st., Dubna, 141980, Russia

²State University “Dubna”,
19 Universitetskaia st., Dubna, 141980, Russia

³Joint Institution for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences,
13 Izhorskaia st., bld. 2, Moscow, 125412, Russia

E-mail: ^a volokhova@jinr.ru, ^b elena@jinr.ru

Received 20.12.2017, after completion — 26.02.2018.

Accepted for publication 15.03.2018.

In the last decades, the development of methods for increasing the efficiency of hydrocarbon extraction in fields with unconventional reserves containing large amounts of gas condensate is of great importance. This makes important the development of methods of mathematical modeling that realistically describe physical processes in a gas-condensate mixture in a porous medium.

In the paper, a mathematical model which describes the dynamics of the pressure, velocity and concentration of the components of a two-component two-phase mixture entering a laboratory model of plast filled with a porous substance with known physicochemical properties is considered. The mathematical model is based on a system of nonlinear spatially one-dimensional partial differential equations with the corresponding initial and boundary conditions. Laboratory experiments show that during a finite time the system stabilizes, what gives a basis to proceed to the stationary formulation of the problem.

The numerical solution of the formulated system of ordinary differential equations is realized in the Maple environment on the basis of the Runge–Kutta procedure. It is shown that the physical parameters of the gas-condensate mixture, which characterize the modeled system in the stabilization regime, obtained on this basis, are in good agreement with the available experimental data. This confirms the correctness of the chosen approach and the validity of its further application and development for computer modeling of physical processes in gas-condensate mixtures in a porous medium. The paper presents a mathematical formulation of the system of partial differential equations and of respective system stationary equations, describes the numerical approach, and discusses the numerical results obtained in comparison with experimental data.

Keywords: computer simulation, gas condensate mixture, system of nonlinear differential equations

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2018, vol. 10, no. 2, pp. 209–219 (Russian).

This work was supported by RFBR (grant no. 17-08-01270A).

Введение

В настоящее время значительная часть крупнейших газовых месторождений в России находится в стадии падающей добычи. В ближайшие десятилетия основной резерв наращивания сырьевой базы добывающих компаний во всем мире составят газоконденсатные и нефтегазоконденсатные месторождения, содержащие в больших количествах газовый конденсат, являющийся ценнейшим сырьем для нефтехимической промышленности [Склярова и др., 2014; Вяхирев и др., 2002; Зайченко и др., 2013]. Для процессов освоения и разработки месторождений с нетрадиционными запасами углеводородов, к которым относятся данные типы месторождений, необходимо знание базовых закономерностей, характеризующих процессы внутрискластовой фильтрации, включая в том числе такое характерное физическое явление, как выпадение конденсата в пласте в жидкой фазе, что существенно затрудняет добычу газа [Зайченко и др., 2009; Лобанова, Индруцкий, 2010; Лобанова, Индруцкий, 2012]. Интенсивные теоретические и экспериментальные исследования в этом направлении ведутся российскими и зарубежными научными группами (см. обзор [Григорьев и др., 2017] и цитируемую литературу). В частности, лабораторные эксперименты по моделированию фильтрации газоконденсатных смесей в пористой среде и по исследованию методов извлечения выпавшего конденсата проводятся на базе установки, входящей в состав экспериментального стенда Объединенного института высоких температур РАН [Зайченко и др., 2012]. В этой связи актуальной задачей является разработка обоснованных математических моделей и комплексов программ, обеспечивающих адекватное воспроизведение получаемых на подобных установках экспериментальных данных при расчетах гидродинамических и термодинамических характеристик фильтрации углеводородных смесей через пористую среду.

Моделированию процессов прохождения многокомпонентных газоконденсатных смесей через пористую среду посвящено очень большое число работ. Как правило, используется подход на базе классического закона Дарси и законов сохранения, подробно описанный как зарубежными (см., например, классическую работу [Aziz, Settary, 1979]), так и российскими авторами (см., например, [Пономарева, Мордвинов, 2009; Митлин, 1991]). В рамках этого подхода формулируются системы уравнений в частных производных с соответствующими начальными и граничными условиями. В основном это уравнения параболического типа, хотя в ряде работ используется математическая постановка задачи на основе гиперболических уравнений (например, [Булгакова и др., 2006]). Конкретный вид получаемой системы уравнений зависит от геометрии моделируемой системы (например, [Диль, Бубенчиков, 2013]) и способов учета таких факторов, как инерционные силы, фазовые переходы, автоколебательные процессы (см. [Качалов и др., 2014; Сокотущенко и др., 2016] и др.). Особенности учета этих и других физико-химических явлений подробно рассмотрены в обзоре [Григорьев и др., 2017]. В литературе имеются указания на соответствие получаемых в рамках вышеуказанного подхода численных результатов явлениям, наблюдаемым при реальной нефте- и газодобыче и на экспериментальных установках, моделирующих реальные пласты. Так, в [Булгакова и др., 2006] получена согласующаяся с опытными данными динамика перепадов давления и объема вытесненной нефти. В [Зайченко и др., 2012] приводятся измеренные на экспериментальной установке значения давления в разные моменты времени для трехкомпонентной газоконденсатной смеси, качественно согласующиеся с результатами численного моделирования на основе подхода, описанного в [Директор и др., 2000].

Цель данной работы состояла в численной проверке возможности количественного воспроизведения экспериментальных характеристик, полученных в [Vo, 2010], а именно данных по пространственному распределению относительных плотностей компонент двухфазной двухкомпонентной смеси. Отметим, что эксперименты в лабораторных условиях позволяют поставить на контроль процесс фильтрации на всем протяжении распространения газоконденсатного потока и изучать процессы, которые невозможно проследить при реальной нефте- и газодобыче. Таким

образом, появляется возможность новой постановки задачи, на решение которой и направлены наши исследования, — задачи фитирования данных экспериментального процесса теоретическим пространственно-временным распределением измеряемых величин. Особенности проведения лабораторного эксперимента позволяют ограничиться учетом зависимости только от некоторых параметров: например, температура образца постоянна, малые размеры образца делают несущественным влияние инерционных свойств вещества, а наблюдаемая в эксперименте стабилизация процесса позволяет вместо задачи в частных производных рассмотреть стационарную задачу. Все это упрощает численное исследование и тем самым делает более достоверным моделирование других измеряемых характеристик, что позволяет проанализировать влияние учитываемых параметров на моделируемый процесс.

В работе для изотермического случая в рамках классической модели на базе закона Дарси и условия неразрывности потоков, с учетом результатов лабораторных экспериментов, подтверждающих стабилизацию режима фильтрации, на основе исходных уравнений в частных производных формулируется стационарная постановка задачи относительно скоростей потоков и молярных плотностей газовой и жидкой составляющих. Показано, что полученные на основе численного решения этой системы расчетные характеристики согласуются с имеющимися экспериментальными данными по пространственному распределению относительных плотностей компонентов смеси в каждой из фаз.

Математическая постановка задачи

Система уравнений, описывающая фильтрацию двухфазной многокомпонентной газоконденсатной смеси через пористую среду с учетом закона Дарси и неразрывности потоков, имеет следующий вид [Лысов, Рыков, 2014; Директор и др., 2000; Басниев и др., 1993]:

$$\epsilon \rho_\alpha \frac{\partial}{\partial t} u_\alpha + \frac{\mu_\alpha}{\kappa} u_\alpha + \nabla P_\alpha = 0, \quad \rho_\alpha = \sum_i \rho_{\alpha i}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (m S_\alpha \rho_{\alpha i}) + \nabla \cdot (u_\alpha \rho_{\alpha i}) + V_{\alpha i} = 0. \quad (2)$$

Здесь индекс α характеризует принадлежность i -го компонента к газовой ($\alpha = g$) или жидкой ($\alpha = c$) фазе. При $\epsilon = 0$ имеем классический закон Дарси, при $\epsilon = 1$ — обобщенный закон Дарси с учетом инерционных сил, вклад которых становится существенным при больших скоростях движения.

Неизвестными величинами являются молярные плотности i -х компонентов в жидкой и газовой фазах $\rho_{\alpha i}$ ($\alpha = c, g$) и скорость u_α движения вещества в жидкой ($\alpha = c$) и газовой фазах ($\alpha = g$). P_α — давление α -фазы, $V_{\alpha i}$ — скорость межфазного перехода ($V_{ci} + V_{gi} = 0$), m — пористость, κ — проницаемость, μ_α — вязкость α -фазы, S_α — объемная доля вещества в α -фазе, рассчитываемая по формулам

$$S_c = \sum_i v_i \rho_{ci}, \quad S_g = 1 - S_c, \quad (3)$$

где v_i — молярный объем компонента в жидкой (несжимаемой) фазе. Выполняется очевидное условие:

$$S_c + S_g = 1. \quad (4)$$

Другое дополнительное условие связывает давление в жидкой и газовой фазах:

$$P_c - P_g = P_{\text{capillary}}, \quad (5)$$

где $P_{\text{capillary}}$ — капиллярное давление на границе c - и g -фаз.

Само давление газа как функция плотностей может вычисляться разными способами. В данной работе расчеты проводились на основе формулы идеального газа и на основе метода Пенга–Робинсона для ван-дер-ваальсовского давления.

Формула давления в модели *идеального газа* с учетом пористости среды имеет вид

$$P_g = \frac{RT \sum_k \rho_{gk}}{mS_g}, \quad (6)$$

где T — температура, R — газовая постоянная.

Согласно формуле *Пенга–Робинсона* давление для смеси газов вычисляется следующим образом [Лысов, Рыков, 2014]:

$$P_g = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{v(v+b) + b(v-b)}, \quad (7)$$

где v — молярный объем, a и b — параметры, вычисление которых в работе [Лысов, Рыков, 2014] сводится к решению кубического уравнения. В настоящей работе для расчета этих параметров используются полученные в явном виде выражения:

$$a = AR^2T^2, \quad (8)$$

$$b = BRT, \quad (9)$$

$$v = \frac{mS_g}{\sum_k \rho_{gk}}, \quad (10)$$

$$A = \sum_i \sum_{j>i} A_{ij} x_i x_j, \quad (11)$$

$$B = \sum_i B_i x_i, \quad (12)$$

$$x_i = \frac{\rho_{gi}}{\sum_k \rho_{gk}}, \quad (13)$$

$$A_{ij} = (1 - k_{ij})(A_i A_j)^{1/2}, \quad (14)$$

$$A_i = 0.457235529 \frac{P_i^r}{(T_i^r)^2} [m(\omega_i)(1 - (T_i^r)^{1/2}) + 1]^2, \quad (15)$$

$$B_i = 0.077796074 \frac{P_i^r}{T_i^r}, \quad (16)$$

$$m(\omega) = 0.37464 + 1.54226\omega - 0.02699\omega^2, \quad (17)$$

$$P_i^r = \frac{1}{P_i^c}, \quad (18)$$

$$T_i^r = \frac{T}{T_i^c}. \quad (19)$$

Скорость переноса i -го компонента газоконденсатной смеси через межфазную границу пропорциональна отклонению от состояния равновесия и определяется выражением [де Гроот, Мазур, 1964]

$$V_{gi} = -V_{ci} = \eta_i(\rho_{gi} - \tilde{K}_i \rho_{ci}), \quad (20)$$

где η_i — коэффициент межфазного переноса вещества, \tilde{K}_i — константа равновесия, вычисляемая по формулам [Лысов, Рыков, 2014]

$$\tilde{K}_i = K_i \frac{\sum_k \rho_{gk}}{\sum_k \rho_{ck}}, \quad K_i = \frac{P_i^c}{P_g} e^{5.372697(1+\omega_i)(1+T_i^c/T)}. \quad (21)$$

Здесь ω_i — ацентрический фактор i -го компонента, P_i^c и T_i^c — критические давление и температура.

Формулировка стационарной задачи

В лабораторных условиях обычно реализуется прохождение газоконденсатной смеси через трубчатую модель пласта с пористым веществом, что дает основание перейти к пространственно-одномерной задаче, учитывая только длину коллектора и пренебрегая его толщиной. Так, в эксперименте [Vo, 2010] исследуется одномерное течение двухкомпонентной газоконденсатной смеси из 85 мол. % метана ($i = 1$) и 15 мол. % н-бутана ($i = 2$). Трубчатая модель пласта заполнялась метаном при давлении, превышающем давление начала конденсации для выбранной двухкомпонентной смеси. Затем метан вытеснялся метан-бутановой смесью, находящейся в газовой фазе. При этом обнаруживается, что через несколько минут наблюдается стабилизация фазового состава метан-бутановой смеси на выходе из модели пласта. Поэтому можно ожидать совпадения численных результатов при решении вышеописанной системы уравнений для достаточно больших времен с результатами решения предельной стационарной задачи. Такое предельное стационарное решение не зависит от времени t , поэтому исходная система уравнений в частных производных превращается в систему обыкновенных пространственно-одномерных дифференциальных уравнений:

$$\frac{\mu_\alpha}{\kappa} u_\alpha = -\frac{\partial}{\partial x} P_\alpha, \quad (22)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} (u_\alpha \rho_{\alpha i}) + V_{\alpha i} = 0. \quad (23)$$

Решение системы (22)–(23) осуществляется численно на интервале $x = [0, L_{max}]$ в среде Maple с использованием метода Рунге–Кутты при заданных условиях в точке $x = 0$:

$$u_\alpha(0) = u_{\alpha 0}, \quad \rho_{\alpha i}(0) = \rho_{\alpha i}^0, \quad \alpha = c, g, \quad i = 1, 2.$$

Расчеты проводились на кластере HybriLIT в Лаборатории информационных технологий Объединенного института ядерных исследований.

Результаты численного исследования

Цель численного исследования состояла в проверке возможности воспроизведения экспериментальных результатов из работы [Vo, 2010] по распределению вдоль координаты x значений мольных долей плотностей i -х компонентов двухкомпонентной смеси $\text{CH}_4 + n\text{C}_4\text{H}_{10}$ в газовой и жидкой фазах в режиме стабилизации. Эти характеристики для каждого i -го компонента рассчитываются через решение системы (22)–(23) по формуле

$$C_{\alpha i}(x) = \frac{\rho_{\alpha i}(x)}{\sum_k \rho_{\alpha k}(x)}, \quad k = 1, 2. \quad (24)$$

Значения $\mu_{g,c}$ и констант из условий в точке $x = 0$ подгонялись под экспериментальные данные путем минимизации значения χ^2 , рассчитываемого по формуле

$$\chi^2 = \sum_{\Omega} (C_{(\text{эксп})\alpha i}(x_k) - C_{\alpha i}(x_k))^2. \quad (25)$$

Здесь Ω — весь набор имеющихся экспериментальных значений $C_{(\text{эксп})\alpha i}(x_k)$, измеренных в точках x_k , расположенных вдоль длины коллектора, равной 30 см.

Для условий в точке $x = 0$ использовались соотношения

$$\rho_{\alpha i}(0) = \rho_0 \bar{C}_i \bar{C}_{\alpha i}, \quad \bar{C}_{c i} = 1 - \bar{C}_{g i},$$

где \bar{C}_i — мольные доли i -х компонентов в смеси ($i = 1, 2$, $\bar{C}_1 + \bar{C}_2 = 1$). Таким образом, варьируемыми были параметры ρ_0 , \bar{C}_{g1} , \bar{C}_{g2} , u_{c0} , u_{g0} , μ_c , μ_g , η_1 , η_2 . Значения $L_{\max} = 0.3$ м, $m = 0.16$, $\kappa = 9 \cdot 10^{-15}$ м², $T = 294^\circ\text{K}$ зафиксированы согласно [Vo, 2010]. Значения других известных величин и ориентировочные начальные значения подгоняемых параметров взяты из [Баренблатт и др., 1984]. Расчеты проводились при $R = 8.31$ Дж/моль/К, $k_{12} = 0.01$ и физико-химических характеристиках компонентов C_{12} ($i = 1$) и nC_4H_{10} ($i = 2$), приведенных в таблице 1.

Таблица 1. Физико-химические характеристики компонентов газоконденсатной смеси $C_1 + nC_4$

i	Вещество	P_i^c , бар	T_i^c , К	ω_i	v_i , м ³ /моль	\bar{C}_i
1	CH ₄	46.042	190.6	0.013	0.0000385	0.85
2	nC ₄ H ₁₀	37.47	419.5	0.196	0.0000965	0.15

В результате минимизации были получены значения варьируемых параметров $\rho_0 = 2762$ моль/м³, $\bar{C}_{g1} = 0.109$, $\bar{C}_{g2} = 0.095$, $u_{c0} = 0.000045$ м/с, $u_{g0} = 0.000062$ м/с, $\mu_g = 9.096 \cdot 10^{-8}$, $\mu_c = 12.46 \cdot 10^{-8}$, $\eta_1 = 0.000621$, $\eta_2 = 0.000603$, обеспечивающие хорошее согласие с экспериментальными данными ($\chi^2 = 0.000123$).

Соответствующие расчетные кривые в сравнении с экспериментальными данными из [Vo, 2010] представлены на рис. 1, *a*. Треугольниками и квадратами показаны соответственно распределение мольной доли газовой фазы компонента nC_4H_{10} и распределение мольной доли его конденсата. Видно, что доля газовой составляющей существенно снижается в правой (выходной) части коллектора, в то время как доля конденсата близка к константе по всей длине коллектора.

На рис. 1, *b* показано распределение давления $P_g = P_c$ вдоль длины коллектора. Видно, что изменение давления в зависимости от координаты x очень слабое, заметное понижение давления происходит лишь в области L_{\max} . Расчеты на основе формулы давления (6) для идеального газа и на основе формулы Пенга – Роберсона (7) показали для используемого набора параметров практически совпадающие результаты, неразличимые на графике.

На рис. 2 представлены графики решения $\rho_{\alpha i}(x)$ системы уравнений (22)–(23) с найденными параметрами. Видно, что плотность жидкой фазы существенно возрастает в правой части интервала $[0, L_{\max}]$, соответствующей области выхода из модели пласта.

На рис. 3, *a* показан график скорости $u_g(x)$ движения вещества в газообразной фазе, а на рис. 3, *b* — зависимость $S_c(x)$, рассчитанная по формуле (3). Видно, что скорость газа мала, а доля жидкой фазы растет, приближаясь к 1 в области L_{\max} .

Отметим, что численное решение исходной системы в частных производных для пространственно-одномерного случая с использованием решения стационарной задачи (22)–(23) в качестве начального условия показало, что данное решение не меняется со временем, тем самым подтвердив корректность найденного статического состояния.

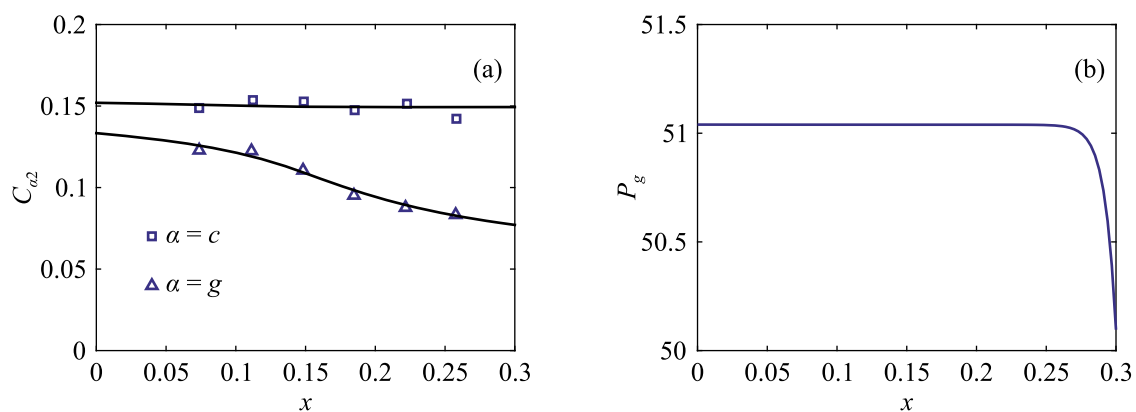


Рис. 1. (a) Расчетные кривые $C_{a2}(x)$, $\alpha = c, g$ в сравнении с экспериментальными данными из [Vo, 2010]; (b) распределение давления P_g (в атм.) по координате x

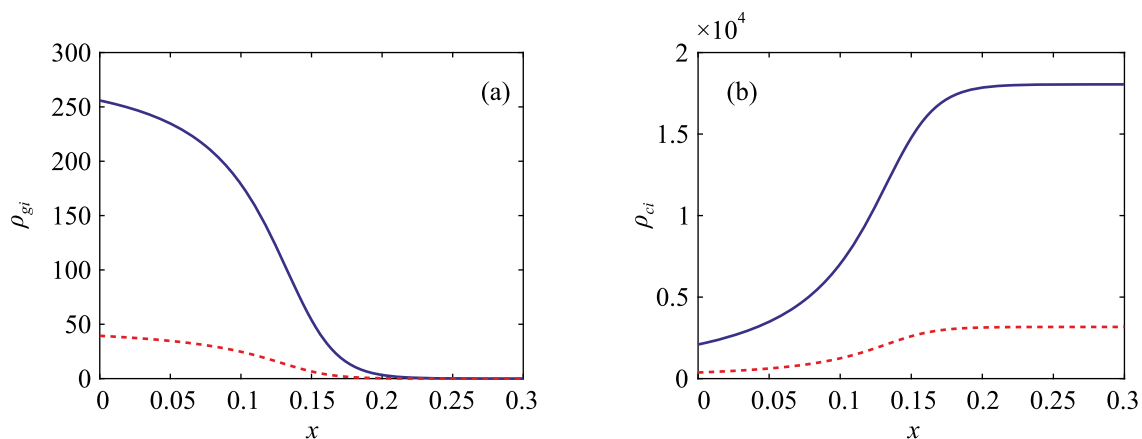


Рис. 2. Молярная плотность компонент (моль/м³) в газообразной фазе (a) и жидкой фазе (b) в зависимости от координаты x . Сплошные кривые соответствуют $i = 1$, штриховые — $i = 2$

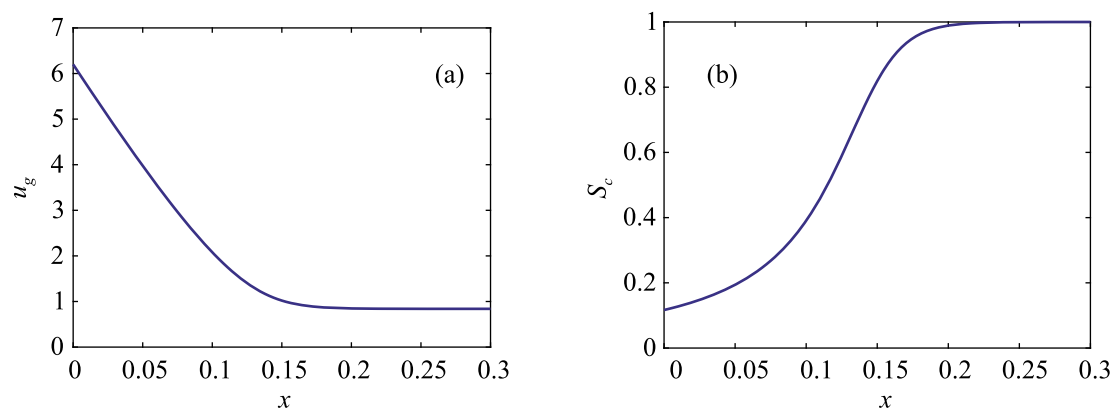


Рис. 3. Скорость движения (м/с) вещества в фазе конденсата $u_g(x)$ (a) и распределение объемной доли конденсата $S_c(x)$ вдоль длины коллектора (b)

Заключение

Показано, что решение стационарной задачи, сформулированной на основе системы уравнений, описывающей модель фильтрации многокомпонентной газоконденсатной смеси, позволяет воспроизвести экспериментальные данные по распределению относительной плотности газовой и жидкой фаз вдоль модели пласта, измеренные в режиме стабилизации. Разработанная Maple-программа может использоваться в численных исследованиях установившихся режимов двухфазных газоконденсатных смесей в пористой среде с целью анализа экспериментальных данных и, в перспективе, выработки на этой основе рекомендаций для повышения извлекаемости углеводородов в реальных условиях. Описанный в работе подход может рассматриваться как основа для дальнейшего развития модели, включая исследование динамических процессов в пористой среде при фильтрации газоконденсатных смесей с фазовыми переходами, что, естественно, требует уже численного решения соответствующей системы уравнений в частных производных.

Список литературы (References)

- Баренблатт Г. И., Ентов В. М., Рыжик В. М. Движение жидкостей и газов в природных пластах. — М.: Недра, 1984. — 211 с.
Barenblatt G. I., Entov V. M., Ryzhik V. M. Motion of liquids and gases in natural planets. — Moscow: Nedra, 1984. — 211 p. (in Russian).
- Басниев К. С., Кочина И. Н., Максимов В. М. Подземная гидромеханика. — М.: Недра, 1993. — 416 с.
Basniev K. S., Kochina I. N., Maksimov V. M. Underground hydromechanics. — Moscow: Nedra, 1993. — 416 p. (in Russian).
- Булгакова Г. Т., Файзуллин Т. А., Жибер А. В. Неравновесная двухфазная фильтрация // Матем. моделирование. — 2006. — Т. 18, вып. 10. — С. 19–38.
Bulgakova G. T., Faizullin T. A., Zhiber A. V. Nonequilibrium two-phase filtration // *Matem. modeling.* — 2006. — Vol. 18, No. 10. — P. 19–38 (in Russian).
- Вяхирев Р. И., Гриценко А. И., Тер-Саркисов Р. М. Разработка и эксплуатация газовых месторождений. — М.: Недра, 2002. — 880 с.
Vyakhirev R. I., Gritsenko A. I., Ter-Sarkisov R. M. Development and operation of gas fields. — Moscow: Nedra, 2002. — 880 p. (in Russian).
- Григорьев Б. А., Качалов В. В., Пазюк Ю. В., Сокотущенко В. Н. Обзор работ по теории фильтрации углеводородных систем // Вести газовой науки. — 2017. — Т. 30, вып. 2. — С. 186–206.
Grigoriev B. A., Kachalov V. V., Pazyuk Yu. V., Sokotushchenko V. N. Review of the work on the theory of filtration hydrocarbon systems // *News of gas science.* — 2017. — Vol. 30, No. 2. — P. 186–206 (in Russian).
- де Гроот С., Мазур П. Неравновесная термодинамика. — М.: Мир, 1964. — 456 с.
De Groot S., Mazur P. Nonequilibrium thermodynamics. — Moscow: Mir, 1964. — 456 p. (in Russian).
- Диль Д. О., Бубенчиков А. М. Двухфазная фильтрация в трубе, заполненной пористым материалом // Вестник Томского государственного университета. Сер. Математика и механика. — 2013. — Вып. 5 (25). — С. 45–51.
Dil D. O., Bubenchikov A. M. Diphasic filtration in a pipe filled with porous material // *Bulletin of Tomsk State University. Ser. Mathematics and mechanics.* — 2013. — Iss. 5 (25). — P. 45–51 (in Russian).
- Директор Л. Б., Качалов В. В., Майков И. Л., Сквородько С. Н. Одномерная нестационарная модель двухфазной фильтрации газоконденсатной смеси // Препринт ОИВТ РАН. — Москва, 2000. — № 2.
Director L. B., Kachalov V. V., Maikov I. L., Skovorodko S. N. One-dimensional nonstationary model of two-phase filtration of a gas-condensate mixture // *Preprint OIVT RAS.* — Moscow, 2000. — No. 2 (in Russian).

- Зайченко В. М., Майков И. Л., Смолкин А. К., Сокол Г. Ф., Торчинский В. М.* Экспериментальная установка для моделирования двухфазного течения углеводородных смесей в пористых пластах // Приборы и техника эксперимента. — 2012. — Вып. 5. — С. 95–98.
Zaichenko V. M., Maikov I. L., Smolkin A. K., Sokol G. F., Torchinsky V. M. Experimental installation for simulating the two-phase flow of hydrocarbon mixtures in porous plastakh // Devices and technics of experiment. — 2012. — Iss. 5. — P. 95–98 (in Russian).
- Зайченко В. М., Майков И. Л., Торчинский В. М. и др.* Моделирование процессов фильтрации углеводородов в газоконденсатном пласте // Теплофизика высоких температур. — 2009. — Т. 47, вып. 5. — С. 701–706.
Zaichenko V. M., Maikov I. L., Torchinsky V. M. et al. Modeling of filtration processes hydrocarbons in a gas-condensate reservoir // Thermophysics of high temperatures. — 2009. — Vol. 47, No. 5. — P. 701–706 (in Russian).
- Зайченко В. М., Майков И. Л., Торчинский В. М.* Особенности фильтрации углеводородных смесей в пористых средах // Теплофизика высоких температур. — 2013. — Т. 51, вып. 6. — С. 855–863.
Zaichenko V. M., Maikov I. L., Torchinsky V. M. Features of filtration of hydrocarbon mixtures in porous media // Thermophysics of high temperatures. — 2013. — Vol. 51, No. 6. — P. 855–863 (in Russian).
- Качалов В. В., Майков И. Л., Молчанов Д. А., Торчинский В. М.* Газоконденсатная залежь как колебательная система осцилляторного типа // Вести газовой науки. — 2014. — Т. 18, вып. 2. — С. 106–112.
Kachalov V. V., Maikov I. L., Molchanov D. A., Torchinsky V. M. Gas condensate deposit as a oscillatory system of the oscillator type // Vesti gazovoy nauki. — 2014. — Vol. 18, No. 2. — P. 106–112 (in Russian).
- Лобанова О. А., Индрупский И. М.* Моделирование взаимовлияния гидро- и термодинамических процессов при фильтрации углеводородных систем // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. — 2010. — Вып. 10. — С. 19–23.
Lobanova O. A., Indrupsky I. M. Modeling the mutual influence of hydro- and thermodynamics processes in the filtration of hydrocarbon systems // Automation, telemechanization and communication in the oil industry. — 2010. — Iss. 10. — P. 19–23 (in Russian).
- Лобанова О. А., Индрупский И. М.* Неравновесность фазового поведения углеводородных систем: моделирование и масштабный эффект // Тезисы докладов IX Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России». Ч. 1. — 2012. — С. 96–97.
Lobanova O. A., Indrupsky I. M. Nonequilibrium of the phase behavior of hydrocarbon systems: modeling and scale effect // Abstracts of the IX All-Russian scientific and technical conference “Actual problems of development of the Russian oil and gas complex”. Part 1. — 2012. — P. 96–97 (in Russian).
- Лысов В. Г., Рыков Ю. Г.* О вычислении фазового равновесия в задачах многокомпонентной фильтрации // Препринт ИПМ им. М. В. Келдыша РАН. — Москва, 2014. — № 94.
Lysov V. G., Rykov Yu. G. On the calculation of phase equilibrium in multicomponent problems filtration // KIAM Preprint to them. M. V. Keldysh of the Russian Academy of Sciences. — Moscow, 2014. — No. 94 (in Russian).
- Митлин В. С.* Подземная гидромеханика сложных углеводородных смесей. — М.: ВИНТИ, 1991. — Т. 4. — С. 154–222.
Mitlin V. S. Underground hydromechanics of complex hydrocarbon mixtures. — Moscow: VINITI, 1991. — Vol. 4. — P. 154–222 (in Russian).
- Пономарева И. Н., Мордвинов В. А.* Подземная гидромеханика. — Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 2009. — 103 с.
Ponomareva I. N., Mordvinov V. A. Underground hydromechanics. — Perm: Perm. state. tech. un-t, 2009. — 103 p. (in Russian).
- Склярова З. П., Соколов Ф. С., Ткач В. С.* Характеристика сырьевой базы конденсата // Группы «Газпром». Вести газовой науки. — 2014. — Т. 18, вып. 2. — С. 4–14.
Sklyarova Z. P., Sokolov F. S., Tkach V. S. Characteristics of the raw materials base of condensate // Groups Gazprom. Conduct a gas science. — 2014. — Vol. 18, No. 2. — P. 4–14 (in Russian).

-
- Сокотущенко В. Н., Качалов В. В., Молчанов Д. А., Торчинский В. М.* Математическое моделирование процессов изотермической фильтрации газоконденсатной смеси при различных режимах течения // Вести газовой науки. — 2016. — Т. 28, вып. 4. — С. 37–40.
- Sokotushchenko V.N., Kachalov V.V., Molchanov D.A., Torchinsky V.M.* Mathematical modeling — the processes of isothermal filtration of a gas-condensate mixture under various conditions flow of flow // News of gas science. — 2016. — Vol. 28, No. 4. — P. 37–40 (in Russian).
- Aziz K., Settary A.* Petroleum reservoir simulation. — London: Applied Science Publishers Ltd., 1979. — 476 p.
- Vo H.X.* Composition Variation During Flow of Gas-Condensate Wells // A report submitted to the Department of energy resources engineering of Stanford University. — 2010. — 441 p.