

УДК 532.546

© 1991 г.

А. Л. БАЛАШОВ

НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ ВЗАИМНОМ ВЫТЕСНЕНИИ ДВУХ ГАЗОВ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

Исследованию процессов смешивающегося вытеснения флюидов в природных пластах в настоящее время уделяется достаточное внимание в связи с необходимостью обоснования различных технологий, используемых при разработке нефтяных и нефтегазоконденсатных месторождений [1–6 и др.]. В силу сложности полной системы гидротермодинамических уравнений, описывающей процесс многофазной многокомпонентной неизотермической фильтрации, при проведении исследований авторы прибегают к тем или иным допущениям в зависимости от условий течения смеси и от характеристик пористой среды.

В указанных выше работах рассматриваются однонаправленные процессы изотермического течения в рамках модели несжимаемой жидкости. Применение активных методов воздействия на газовую и газоконденсатную залежь (сайклинг-процесс), а также создание и эксплуатация подземных газохранилищ в водоносных пластах могут быть связаны с использованием неуглеводородных газов в качестве вытесняющих агентов. При этом сжимаемость компонентов смеси может существенно влиять на характеристики смешивающегося вытеснения.

В настоящей работе рассмотрен циклический двунаправленный процесс изотермического течения бинарной однофазной сжимаемой смеси газов в пористой среде, сопровождающийся диффузионно-дисперсионным массообменом. На основе уравнений многофазной многокомпонентной изотермической фильтрации получена и исследована система двух нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных с нелинейными краевыми условиями, соответствующими заданию постоянного темпа закачки или отбора газа из пласта. Предложен численный алгоритм решения полученной краевой задачи.

1. Постановка задачи. В горизонтальный пласт, первоначально содержащий неуглеводородный газ, производится закачка углеводородного газа. Для скорости фильтрации смеси газов предполагается справедливым обобщенный закон Дарси, при этом вязкость смеси зависит от вязкостей и от концентраций компонентов. Пористая среда считается недеформируемой и изотропной, компоненты смеси — калорически совершенными газами, адсорбция компонентов на стенках поровых каналов и бародиффузия между компонентами не учитываются. Система уравнений изотермической фильтрации бинарной однофазной сжимаемой смеси газов в декартовой системе координат x, y, z при указанных предположениях представляется в следующем виде [3, 7]:

$$m \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{W}) = 0 \quad (1.1)$$

$$\rho \left(m \frac{\partial c_i}{\partial t} + \mathbf{W} \nabla c_i \right) + \operatorname{div} \mathbf{J}_i = 0 \quad (1.2)$$

$$\mathbf{J}_i = -\rho D_{i2} \nabla c_i \quad (1.3)$$

$$(c_1 + c_2 = 1, \mathbf{J}_1 + \mathbf{J}_2 = 0, i = 1, 2)$$

$$\mathbf{W} = -\frac{k}{\mu} (\nabla P - \rho \mathbf{g}) \quad (1.4)$$

$$P = \rho RT \left(\frac{c_1}{M_1} + \frac{c_2}{M_2} \right) \quad (1.5)$$

Здесь t — время, m — пористость среды, k — абсолютная проницаемость пласта, T — пластовая температура, R — универсальная газовая постоянная; ρ — плотность, P — давление, W — скорость фильтрации смеси; \mathbf{g} — вектор ускорения свободного падения; M_i , c_i , J_i ($i=1, 2$) — соответственно молярная масса, массовая концентрация, массовый диффузионный поток i -го компонента (индекс $i=1$ относится к характеристикам углеводородного компонента, $i=2$ — неуглеводородного). Для вязкости смеси μ справедливо соотношение [8]

$$\ln \mu = \omega_1 \ln \mu_1 + \omega_2 \ln \mu_2 \quad (1.6)$$

$$\omega_i = \frac{c_i}{M_i} \left(\frac{c_1}{M_1} + \frac{c_2}{M_2} \right) \quad (1.7)$$

где μ_i , ω_i ($i=1, 2$) — соответственно коэффициенты динамической вязкости компонентов, считающиеся постоянными, и молярные доли компонентов в смеси.

Задача решается для случая одномерного фильтрационного потока (прямолинейно-параллельного или плоскорадиального), при этом коэффициент бинарной диффузии D_{12} представляется в виде [4]

$$D_{12} = m\beta D_m + \lambda W \quad (1.8)$$

где β , λ — коэффициент извилистости и параметр продольного рассеивания пористой среды, которые считаются постоянными. Коэффициент молекулярной диффузии D_m имеет вид [9]

$$D_m = D_1^{\omega_2} D_2^{\omega_1}, \quad 0 < \omega_1 < 1, \quad 0 < \omega_2 < 1 \quad (1.9)$$

где D_i ($i=1, 2$) — постоянные коэффициенты молекулярной диффузии компонентов в смесях с малой концентрацией соответствующего компонента (при $\omega_1=1$, $\omega_2=0$ или $\omega_2=1$, $\omega_1=0$ коэффициент молекулярной диффузии вырождается в коэффициент самодиффузии соответствующего компонента). С учетом соотношений Стокса — Эйнштейна [9] выражение (1.9) принимает вид

$$D_m = D_1 \left(\frac{\mu_2}{\mu_1} \right)^{\omega_1} \quad (1.10)$$

Рассматриваемый циклический двунаправленный процесс течения разбивается на три этапа: закачка, нейтральный период (простой), отбор. Для каждого из этапов вводятся безразмерные переменные

$$r = x/L, \quad \tau = tV_0/L, \quad p = P/P_k \quad (1.11)$$

где L — характерный размер пласта; V_0 — характерная скорость закачки газа в пласт или отбора смеси газов из пласта соответственно на этапах закачки и отбора (на этапе простоя $V_0 = D_1/L$); P_k — начальное пластовое давление, равное невозмущенному давлению на бесконечности. Система уравнений (1.1) — (1.5) с учетом соотношений (1.6) — (1.11) преобразуется к виду

$$\frac{\partial p}{\partial \tau} = \frac{p}{c} \frac{\partial c}{\partial \tau} + \alpha_1 \frac{c}{r^n} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^n \frac{p}{c} \mu^0 \frac{\partial p}{\partial r} \right) \quad (1.12)$$

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = \alpha_1 \mu^0 \frac{\partial p}{\partial r} \frac{\partial c}{\partial r} + \frac{c}{r^n p} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^n \frac{p}{c} \mu^0 \left(\alpha_2 - \alpha_3 \frac{\partial p}{\partial r} \right) \frac{\partial c}{\partial r} \right) \quad (1.13)$$

$$\alpha_1 = \frac{kP_k}{m\mu_1 L V_0}, \quad \alpha_2 = \frac{\beta D_1 \mu_2}{V_0 L \mu_1}, \quad \alpha_3 = \frac{\text{sign } W \lambda k P_k}{m\mu_1 L^2 V_0}$$

$$M = \frac{M_1}{M_2 - M_1}, \quad c = c_1 + M, \quad \mu^0 = \left(\frac{\mu_1}{\mu_2} \right)^\delta, \quad \delta = M \left(\frac{M+1}{c} - 1 \right) \quad (1.14)$$

Здесь $n=0, 1$ соответственно для прямолинейно-параллельного и плоскорадиального течения; $\text{sign } W$ учитывает направление течения смеси: $\text{sign } W=1$ для этапов закачки и простоя и $\text{sign } W=-1$ для этапа отбора. Ниже будет описан случай плоскорадиальной фильтрации, так как для прямолинейно-параллельной все рассуждения проводятся аналогично. Для каждого из этапов решение задачи ищется в полубесконечной области $r>r_0$ ($r_0=x_0/L$, x_0 — радиус скважины) с соответствующими начальными и граничными условиями.

Для произвольного цикла закачки предполагаются известными начальные распределения давления $P_1(r)$ и концентрации $C_1(r)$ закачиваемого газа в пласте

$$p(r, 0) = P_1(r), \quad c(r, 0) = C_1(r)$$

В частности, для первой закачки имеем $P_1(r)=1$, $C_1(r)=M$.

Условия на бесконечности имеют вид

$$p(\infty, t) = 1, \quad c(\infty, t) = M$$

На скважине задается темп закачки газа, при этом массовый расход Q_m считается постоянным и положительным. С учетом выражения $Q_m = 2\pi r_0 r H W$ [H — толщина пласта] и предположения о том, что компоненты смеси являются калорически совершенными газами, получается условие на скважине для давления

$$r \frac{\partial p^2}{\partial r} \Big|_{r_0} = - \frac{Q_m \mu_1 P_0}{\pi H k \rho_0 P_k^2} = \gamma_1, \quad Q_m > 0 \quad (1.15)$$

где ρ_0 — плотность закачиваемого газа при атмосферном давлении P_0 . Условие на скважине для концентрации представляется в виде [4]

$$c(r_0, t) = 1 + M$$

При рассмотрении периода простоя начальные и граничные условия принимают вид

$$p(r, 0) = P_2(r), \quad p(\infty, t) = 1$$

$$c(r, 0) = C_2(r), \quad c(\infty, t) = M$$

$$\frac{\partial p}{\partial r} \Big|_{r_0} = 0, \quad \frac{\partial c}{\partial r} \Big|_{r_0} = 0 \quad (1.16)$$

где $P_2(r)$, $C_2(r)$ — известные функции распределения давления и концентрации, полученные на конец предшествующего периода закачки; условия (1.16) означают соответственно равенство нулю скорости фильтрации на скважине и отсутствие взаимных перетоков газов из скважины в пласт и наоборот.

На этапе отбора начально-краевые условия принимают вид

$$p(r, 0) = P_3(r), \quad p(\infty, t) = 1$$

$$c(r, 0) = C_3(r), \quad c(\infty, t) = M$$

$$\mu_0 \frac{r}{c} \frac{\partial p^2}{\partial r} \Big|_{r_0} = - \frac{Q_m \mu_1 R T}{\pi H k M M_2 P_k^2} = \gamma_2, \quad Q_m < 0 \quad (1.17)$$

$$\frac{\partial c}{\partial r} \Big|_{r_0} = 0 \quad (1.18)$$

где $P_3(r)$, $C_3(r)$ — известные функции распределения давления и концентрации, полученные на конец предшествующего периода простоя. Условие

(1.17) получается аналогично условию (1.15) с учетом соотношений (1.14), (1.5); условие (1.18) получается из соотношения на поверхности разрыва [4] и означает запрещение диффузионного обмена газов между скважиной и пластом.

2. Алгоритм решения. Для решения сформулированной задачи предлагается численный метод, который является модификацией известного метода расщепления по физическим процессам (SEQ-метода), используемого при решении задач многофазной фильтрации в [10, 11]. Дифференциальные уравнения аппроксимируются консервативной неявной конечно-разностной схемой, расчет по которой проводится методом итераций по каждому уравнению в отдельности и по системе в целом. На этапах закачки и отбора итерации ведутся одновременно по коэффициентам в уравнениях и по граничным условиям, которые описываются нелинейными разностными соотношениями.

Конечно-разностная система уравнений, аппроксимирующая систему (1.12), (1.13) с точностью $o(\theta + h^2)$, имеет вид

$$\frac{p_{i,j+1} - p_{i,j}}{\theta} = \left(\frac{p}{c} \right)_{i,j+1} \frac{c_{i,j+1} - c_{i,j}}{\theta} - \frac{\alpha_1}{h^2} \left(\frac{c}{r} \right)_{i,j+1} (\eta_{i+1/2,j+1}(p_{i+1,j+1} - p_{i,j+1}) - \eta_{i-1/2,j+1}(p_{i,j+1} - p_{i-1,j+1})) \quad (2.1)$$

$$\frac{c_{i,j+1} - c_{i,j}}{\theta} = \alpha_1 \mu_{i,j+1} \frac{p_{i+1,j+1} - p_{i-1,j+1}}{2h} \frac{c_{i+1,j+1} - c_{i-1,j+1}}{2h} + \frac{1}{h^2} \left(\frac{\mu^0}{\eta} \right)_{i,j+1} \times \quad (2.2)$$

$$\times \left(\left(\eta \left(\alpha_2 - \alpha_3 \frac{\partial p}{\partial r} \right) \right)_{i+1/2,j+1} (c_{i+1,j+1} - c_{i,j+1}) - \left(\eta \left(\alpha_2 - \alpha_3 \frac{\partial p}{\partial r} \right) \right)_{i-1/2,j+1} (c_{i,j+1} - c_{i-1,j+1}) \right)$$

$$\eta = r \frac{p}{c} \mu^0$$

Здесь θ — шаг по временной координате τ , h — по пространственной координате r ; $p_{i,j}$, $c_{i,j}$, $\mu_{i,j}$ — точечные аналоги функций p , c , μ^0 в узлах пространственно-временной сетки. В направлении r точки сетки нумеруются индексом i , в направлении τ — индексом j . Коэффициенты η в уравнении (2.1) и $\eta(\alpha_2 - \alpha_3 \partial p / \partial r)$ в уравнении (2.2) представляются в полупелых узлах сетки $(i \pm 1/2, j+1)$ в виде среднего значения соответствующих коэффициентов в целых узлах $(i+1, j+1)$, $(i, j+1)$ и $(i, j+1)$, $(i-1, j+1)$ соответственно. Граничные условия (1.15) и (1.17) соответственно для этапов закачки и отбора аппроксимируются со вторым порядком точности

$$p_{1,j+1}^2 - p_{0,j+1}^2 = 2\gamma \quad (2.3)$$

где $\gamma = \gamma_1$ для этапа закачки и $\gamma = \gamma_2 (c/\mu^0)^{1/2}$ для этапа отбора.

Полагая значения функции $c_{i,j+1}$ равными значениям $c_{i,j}$ с предыдущего временного слоя (на первом временном слое — начальным условиям) и «замораживая» их во всей области решения $r > r_0$, получаем из (2.1) нелинейное разностное уравнение относительно $p_{i,j+1}$, линеаризуем его и применяем метод простой итерации. В качестве начального приближения берем значения функции $p_{i,j+1}$ в коэффициентах уравнения (2.1) и на границе r_0 равными значениям $p_{i,j}$ с предыдущего временного слоя (на первом временном слое — из начальных условий). Эффективным методом решения полученного линейного уравнения является метод прогонки, причем на этапах закачки и отбора условие на границе для следующей итерации находится из соотношения (2.3)

$$p|_{r_0} = p_{0,j+1} = \sqrt{p_{1,j+1} - 2\gamma}$$

Итерационный процесс для уравнения (2.1) ведется до выполнения условия

$$\max_i |p_{i,j+1}^{v,s+1} - p_{i,j+1}^{v,s}| < \epsilon$$

где $\epsilon > 0$ — заранее заданная точность, s — номер итерации для уравнения (2.1), v — для системы в целом.

Далее, «заморозив» полученные при решении уравнения (2.1) значения функции $P_{i,j+1}^{v,s+1}$, переходим к решению уравнения (2.2) относительно $c_{i,j+1}$, следуя изложенной выше схеме, до выполнения условия

$$\max_i |c_{i,j+1}^{v,q+1} - c_{i,j+1}^{v,q}| < \epsilon$$

где q — номер итерации для уравнения (2.2).

Полученные в результате итераций по каждому уравнению в отдельности решения $P_{i,j+1}^{v,s+1}$ и $c_{i,j+1}^{v,q+1}$ берутся в качестве новых начальных приближений, и повторяется процедура, описанная выше, в результате чего получаются решения системы $P_{i,j+1}^{v+1,s+1}$ и $c_{i,j+1}^{v+1,q+1}$. Как только одновременно выполнены условия

$$\max_i |P_{i,j+1}^{v+1,s+1} - P_{i,j+1}^{v,s+1}| < \epsilon$$

$$\max_i |c_{i,j+1}^{v+1,q+1} - c_{i,j+1}^{v,q+1}| < \epsilon$$

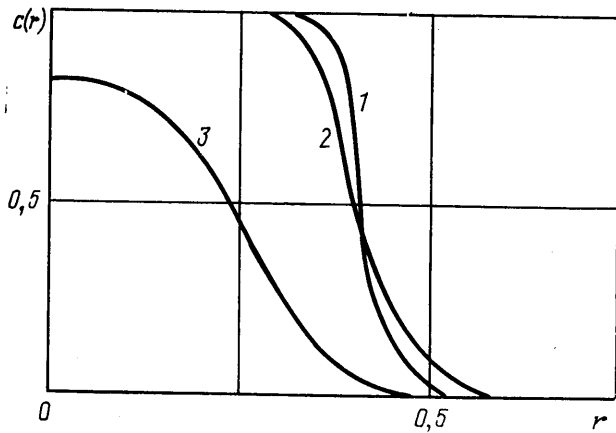
итерационный процесс для системы в целом заканчивается и совершается переход на следующий временной слой.

3. Результаты расчетов и выводы. Численное решение системы разностных уравнений (2.1), (2.2) для этапов закачки, простоя, отбора с соответствующими начально-краевыми условиями получено для смеси метан — азот при следующих значениях параметров пласта и компонентов смеси в пластовых условиях: $m=0,2$, $k=10^{-12}$ м², $H=10$ м, $P_k=5$ МПа, $T=50^\circ$ С, $\beta=0,7$, $\lambda=10^{-3}$ м, $D_1=10^{-5}$ м²/с, $\mu_1=1,27 \cdot 10^{-5}$ и $\mu_2=1,99 \cdot 10^{-5}$ Па·с. Объемный расход газа на скважине Q_0 на этапах закачки и отбора варьировался в диапазоне 10^5 — 10^6 м³/сут, при этом пластовое давление менялось в пределах от 4 до 6 МПа.

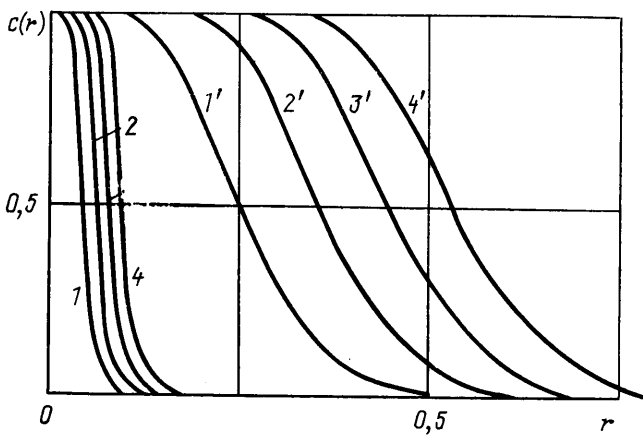
Вязкости компонентов μ_1 , μ_2 и отношение μ_1/μ_2 в указанных пределах изменения давления меняются незначительно [12], и их отклонения от соответствующих значений при давлении $P_k=5$ МПа составляют не более 1—2%. Поэтому для смеси метан — азот зависимостью вязкостей компонентов и смеси в целом от давления можно пренебречь и считать $\mu_1/\mu_2=0,6382$ во всей области решения $r > r_0$.

Более того, как показали результаты расчетов, проведенных для двунаправленного процесса вытеснения метаном азота и наоборот, вязкость смеси μ и коэффициент молекулярной диффузии D_m в этом случае можно считать не зависящими от концентраций компонентов в смеси и равными, например, средним значениям вязкостей компонентов μ_1 , μ_2 в пластовых условиях и коэффициентов молекулярной диффузии компонентов D_1 , D_2 соответственно. При этом отклонение решения, полученного при постоянной вязкости смеси, от решения, полученного при переменной вязкости, составляет доли процента. Для коэффициента молекулярной диффузии справедлив аналогичный вывод, что соответствует результатам исследований [9].

Результаты расчетов для случая плоскорадиальной фильтрации представлены на фиг. 1. Здесь кривая 1 соответствует распределению концентрации углеводородного компонента в пласте на момент окончания закачки, 2 — простоя, 3 — отбора, причем отбор смеси из пласта проводится до тех пор, пока концентрация метана на скважине составляет более 80%. Распределение концентрации, полученное в конце этапа закачки, существенно видоизменяется к концу этапа простоя лишь в случае, когда период простоя на два и более порядков превышает период закачки; на этапе от-



Фиг. 1



Фиг. 2

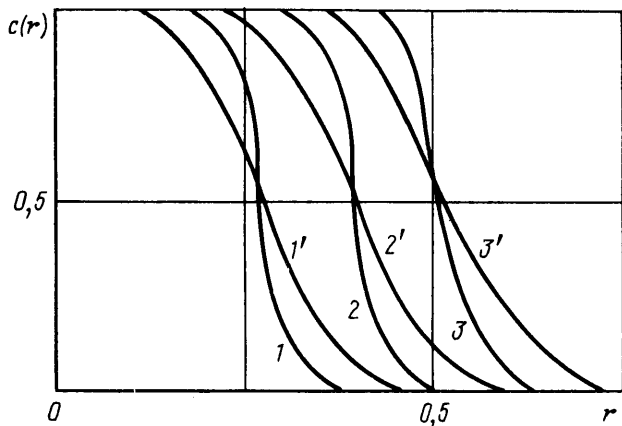
бора из пласта извлекается более 90% объема закачанного газа, причем концентрация азота в отобранной смеси составляет менее 5%. Сказанное выше позволяет сделать вывод о слабом перемешивании углеводородного и неуглеводородного компонентов при двунаправленной фильтрации в пористой среде.

С целью оценки влияния сжимаемости и неоднородности смеси на изменение профиля концентрации $c(r)$ на различных стадиях вытеснения рассмотрена модель несжимаемой однородной смеси с постоянной вязкостью при тех же начально-краевых условиях и параметрах пласта, что и выше. В этом случае уравнение фильтрационно-конвективной диффузии для плоскорадиального течения (в тех же безразмерных переменных, что и выше) принимает вид

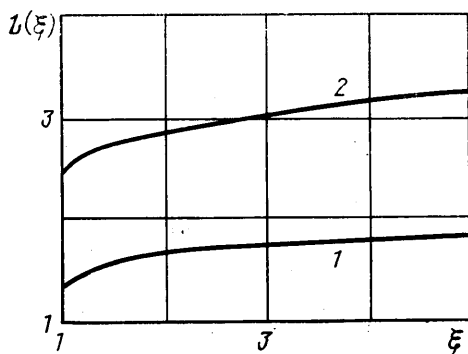
$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = -\frac{\alpha}{r} \frac{\partial c}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r D_{12} \frac{\partial c}{\partial r} \right) \quad (4.1)$$

$$\alpha = \frac{r_0}{m}, \quad D_{12} = \frac{\beta D_m}{LV_0} + \frac{\lambda \alpha}{Lr}$$

В работах [1, 2] представлены различные аналитические методы построения приближенных решений уравнения (4.1) при различных начально-краевых условиях. При этом коэффициент D_{12} либо считался пропорцио-



Фиг. 3



Фиг. 4

нальными скорости фильтрации смеси [1], либо осреднялся [2]. Однако даже при этих предположениях для D_{12} полученные решения, как отмечено в [1], достаточно сложны для практических расчетов.

В данной работе уравнение (4.1) с соответствующими начально-краевыми условиями решено численно с использованием консервативной неявной конечно-разностной схемы и проведено сравнение динамики изменения профиля концентрации $c(r)$ при различных временах вытеснения для сжимаемой и несжимаемой смесей газов.

Результаты расчетов для этапа закачки представлены на фиг. 2. Здесь показано, что при одинаковом темпе закачки скорость распространения закачиваемого компонента в пласте для модели сжимаемой смеси (кривые 1–4) значительно ниже, чем для несжимаемой (кривые 1'–4'). Для того чтобы в произвольной точке пласта значения концентраций сжимаемой и несжимаемой смесей совпадали и равнялись 0,5, необходимо, чтобы темп закачки для модели сжимаемой смеси был на порядок больше, чем для несжимаемой.

На фиг. 3 представлены результаты расчетов, проведенных при условии продвижения на одинаковое расстояние от скважины точек, значения концентраций в которых совпадают и равняются 0,5, для сжимаемой (кривые 1–3) и несжимаемой (кривые 1'–3') смесей соответственно. Формирование зоны смеси (имеется в виду ширина зоны между значениями концентрации: $0,1 < c < 0,9$) происходит в обоих случаях в начальный период вытеснения, а в дальнейшем размыв зоны смеси проходит крайне медленно,

однако полной стабилизации размера зоны не происходит, что подтверждается экспериментальными данными [2]. Кроме этого, можно утверждать, что зона смеси при учете сжимаемости компонентов размывается меньше. Результаты расчетов изменения длины зоны смеси l в зависимости от пройденного расстояния ξ представлены на фиг. 4. Здесь кривая 1 соответствует модели сжимаемой смеси газов, кривая 2 — несжимаемой.

Из результатов расчетов, проведенных для случая прямолинейно-параллельной фильтрации, следует, что полученное решение задачи при введенных допущениях хорошо согласуется с экспериментальными данными [13] в том, что при закачке размер зоны смеси l вследствие диффузионно-дисперсионных процессов увеличивается пропорционально ξ^n , причем показатель степени n изменяется в пределах от 0,35 до 0,5 в зависимости от скорости фильтрации смеси. Так, при уменьшении расхода на скважине с 10^6 до 10^5 м³/сут показатель степени n возрастает, стремясь к теоретическому значению $n=0,5$, полученному для модели однородной несжимаемой смеси [14].

В заключение автор выражает благодарность В. М. Максимова за постоянное внимание к работе и полезные обсуждения результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Николаевский В. Н., Бондарев Э. А., Миркин М. И. и др. Движение углеводородных смесей в пористой среде. М.: Недра, 1968. 190 с.
2. Забродин П. И., Раковский Н. Л., Розенберг М. Д. Вытеснение нефти из пласта растворителями. М.: Недра, 1968. 224 с.
3. Розенберг М. Д., Кундин С. А., Курбанов А. К. и др. Фильтрация газированной жидкости и других многокомпонентных смесей в нефтяных пластах. М.: Недра, 1969. 452 с.
4. Николаевский В. Н. Механика пористых и трещиноватых сред. М.: Недра, 1984. 232 с.
5. Баренблатт Г. И., Енгов В. М., Рыжик В. М. Движение жидкостей и газов в пористых пластах. М.: Недра, 1984. 208 с.
6. Енгов В. М., Зазовский А. Ф. Гидродинамика процессов повышения нефтеотдачи. М.: Недра, 1989. 232 с.
7. Гроот С. Р., де, Мазур П. Неравновесная термодинамика: Пер. с англ. М.: Мир, 1964. 456 с.
8. Гиршфельдер Дж., Кергисс Ч., Берд Р. Молекулярная теория газов и жидкостей. М.: Изд-во иностр. лит., 1961. 929 с.
9. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей: Справочное пособие. Л.: Химия, 1982. 592 с.
10. Коновалов А. Н. Задачи фильтрации многофазной несжимаемой жидкости. Новосибирск: Наука, 1988. 165 с.
11. Азиз Х., Сеттари Э. Математическое моделирование пластовых систем. Пер. с англ. М.: Недра, 1982. 407 с.
12. Гуревич Г. Р., Брусилковский А. И. Справочное пособие по расчету фазового состояния и свойств газоконденсатных смесей. М.: Недра, 1984. 264 с.
13. Бузинов С. Н., Пешкин М. А. Изменение зоны смеси двух газов при движении в пористой среде // Изв. АН СССР. МЖГ. 1979. № 4. С. 180–181.
14. Николаевский В. Н. Конвективная диффузия в пористых средах // ПММ. 1959. Т. 23. Вып. 6. С. 1042–1050.

Москва

Поступила в редакцию
14.XII.1990