

Научная статья

Возникновение и нелинейные режимы конвекции бинарных смесей в многослойных системах, имитирующих синклинали геологические складки

И.С. Шубенков, Т.П. Любимова

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Российская Федерация

Работа посвящена изучению трёхмерных режимов конвекции бинарных смесей в системах пористых слоёв, имеющих изгиб, имитирующий синклинали геологические складки, находящиеся под действием геотермального градиента температуры. Пористости слоёв считаются одинаковыми, а проницаемости различными. В качестве жидкости, насыщающей пористую среду, рассматривается смесь тетралина и додекана, взятых в равных долях. Компоненты смеси являются представителями групп углеводородов, встречающихся в нефтяных месторождениях. Сначала оценивается линейная устойчивость механического равновесия бинарной смеси в наклонном пористом слое, насыщенном жидкостью, в поле силы тяжести под действием строго вертикального градиента температуры. Найденный порог конвекции сравнивается с результатом, полученным для нелинейно устойчивой системы. В трёхмерных нелинейных расчётах трёхслойной системы проницаемости всех слоёв варьируются, при этом проницаемости внешних слоёв одинаковы и всегда меньше проницаемости внутреннего слоя. Установлено, что при проницаемости внутреннего слоя, значительно превышающей проницаемости внешних слоёв, течение присутствует во всех слоях, но в большей степени локализуется во внутреннем слое. При достаточно близких проницаемостях внешних слоёв и внутреннего слоя, течение локализуется около внешних границ складки даже в том случае, когда внутренний слой более проницаемый, чем внешние. С ростом надкритичности в первоначально плоскопараллельном течении (в пределах каждого крыла складки) образуются продольные валы, и течение становится спиральным. Дальнейшее наращивание надкритичности приводит к преобладанию в течении составляющей продольных валов и к увеличению по длине крыла складки количества продольных валов (к росту их волнового числа).

Ключевые слова: тепловая конвекция, бинарная смесь, пористая среда, многослойная система, наклонный слой, вертикальный градиент температуры, математическое моделирование, ANSYS Fluent

Получение: 04.11.2025 / *Публикация онлайн:* 04.04.2026

УДК 532.5

1. Введение

Геологические структуры представляют собой слоистые образования горных пород, отличающихся пористостью и проницаемостью. Если слои горных пород подвергаются пластической деформации, они сминаются в складки. Складка называется антиклинальной (антиклиналь), если изгиб слоев обращен выпуклостью вверх (в ядре залегают более древние слои, на крыльях — более молодые) и синклинали, выпуклой вниз [1, 2].

Такие насыщенные жидкостями слоистые системы становятся естественными подземными резервуарами для природных конвективных процессов [3–6]. Одним из часто используемых способов моделирования неоднородных пористых сред является рассмотрение системы слоев, имеющих разные значения пористости и проницаемости, причем в каждом отдельном слое эти свойства считаются однородными [7–12].

Решение подобных задач требует знания топографических и геологических данных и часто проводится в пренебрежении тепловой конвекцией или в предположении однокомпонентности жидкости [8, 10, 13, 14]. Однако жидкости и газы, насыщающие пористые среды, имеют, как правило, сложный состав. Это приводит к необходимости учёта эффектов диффузии, термодиффузии и другого [15–17].

Тепловая конвекция в наклонных пористых слоях, насыщенных жидкостями, обычно исследуется в тех случаях, когда границы слоя поддерживаются при постоянных разных температурах и механическое равновесие невозможно. При любых сколь угодно малых перепадах температуры всегда имеется стационарное течение, которое становится неустойчивым при достижении температурным градиентом определённого значения, наряду с основным возникает вторичное течение.

Авторами [18, 19] изучалось возникновение и развитие тепловой конвекции в наклонном пористом слое, насыщенном жидкостью, в поле силы тяжести при строго вертикальном градиенте температуры. Установлено, что при любом угле наклона слоя продольные валы (конвективные валы с осями, направленными вдоль слоя и перпендикулярными оси, относительно которой имеет место наклон слоя) выказывают себя как наиболее опасный тип возмущений. Для углов наклона слоя $\alpha < 45^\circ$ критические возмущения являются длинноволновыми, а для $\alpha > 45^\circ$ — ячеистыми. Двумерные возмущения (валы с осями, параллельными оси, относительно которой имеет место наклон слоя) в системе также возможны, но они не самые опасные.

В работе [20] с учётом эффекта Соре исследовалась трёхмерная конвекция бинарной смеси в трёхслойной пористой системе, имитирующей антиклинальную геологическую складку, под действием вертикального геотермического температурного градиента. Пористости слоёв считались одинаковыми, а проницаемости различались. В рамках линейного анализа устойчивости обнаружено, что при любом угле наклона слоя наиболее опасны ячеистые продольные валы. Нелинейные расчёты показали, что при малых проницаемостях всех слоёв возникающее течение имеет длинноволновой характер. С увеличением проницаемости среднего слоя течение в плоскости крыльев геологической складки принимает вид ячеистых продольных валов, что соответствует

результатам линейного анализа устойчивости. Течение локализуется в среднем слое и существенно влияет на поле концентрации примеси.

Настоящая работа является продолжением и расширением исследования системы пористых слоёв, имитирующих антиклинальную складку [20]. Рассматривается синклиальная складка и, в отличие от [20], где проницаемости внешних слоёв предполагались меньшими порогового значения, следовательно, конвективное движение не проникало в эти слои, во внимание принимается более широкий диапазон отношений проницаемостей слоёв, в том числе близкие проницаемости, когда конвекция становится возможной во всех трёх слоях.

2. Постановка задачи

Рассматривается индуцированная эффектом Соре конвекция бинарной смеси тетралина (50%) и додекана (50%) в пористой среде. Данные вещества являются типичными представителями углеводородов, содержащихся в нефти. Предполагается, что вязкость и коэффициенты переноса постоянны. Влияние барродиффузии и диффузионной теплопроводности не учитывается. За примесь принимается более лёгкий компонент тетралин, а за растворитель — более тяжёлый додекан. Считается, что плотность смеси ρ линейно зависит от её температуры T и концентрации примеси C :

$$\rho = \rho_0(1 - \beta_T(T - T_0) - \beta_C(C - C_0)). \quad (1)$$

Здесь $\beta_T = -\frac{1}{\rho_0} \left. \frac{\partial \rho}{\partial T} \right|_C$ — коэффициент теплового расширения; $\beta_C = -\frac{1}{\rho_0} \left. \frac{\partial \rho}{\partial C} \right|_T$ — коэффициент концентрационного расширения; ρ_0 и T_0 , C_0 — соответственно, средние значения плотности и температуры смеси и концентрации примеси.

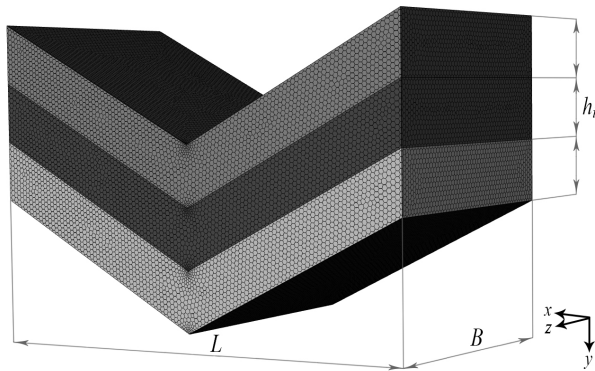


Рис. 1. Модель синклиальной складки

Смесь заполняет полость, представляющую собой систему из трёх слоёв одинаковой толщины $h_i = 25$ м, имеющую излом в центральной части и имитирующей синклиальную геологическую складку (Рис. 1). Длина расчётной области $L = 200$ м, ширина $B = 100$ м. Такие размеры характерны для пластов, содержащих углеводороды. При указанных геометрических размерах угол складки (угол между наклонными плоскостями) равен примерно 152° . Геометрия и граничные условия аналогичны тем, что использовались в работе [20].

Моделирование проводится в рамках уравнений Дарси–Буссинеска [15] с учётом эффекта термодиффузии:

$$0 = -\frac{1}{\rho_0} \nabla P_i - \frac{\nu}{K_i} \mathbf{V}_i - \mathbf{g}(\beta_T(T_i - T_0) + \beta_C(C_i - C_0)), \quad (2)$$

$$(\rho c)^* \frac{\partial T_i}{\partial t} + (\rho c)_f \mathbf{V}_i \cdot \nabla T_i = \lambda^* \nabla^2 T_i, \quad (3)$$

$$\varepsilon^* \frac{\partial C_i}{\partial t} + \mathbf{V}_i \cdot \nabla C_i = D^* \nabla^2 C_i + C_0(1 - C_0) D_T^* \nabla^2 T_i, \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{V}_i = 0. \quad (5)$$

Здесь \mathbf{V} — вектор скорости фильтрации; P — давление; \mathbf{g} — вектор ускорения свободного падения; t — время; K_i — проницаемость i -го слоя; ν — кинематическая вязкость смеси; λ^* и $(\rho c)^*$ — эффективные теплопроводность и теплоёмкость пористой среды; $(\rho c)_f$ и ε^* — теплоёмкость и пористость смеси; $D^* = D/\tau^2$ и $D_T^* = D_T/\tau^2$ — коэффициенты молекулярной диффузии и термодиффузии смеси в пористой среде; τ — коэффициент извилистости пористой среды [21, 22]. Индекс $i = 1, 2, 3$ обозначает номер слоя (сверху вниз).

Рассматривается нагрев снизу с градиентом температуры $A = 3 \cdot 10^{-2}$ К/м (что отвечает среднему геотермальному градиенту [23]). Используемое в расчётах значение $T_0 = 353.5$ К является средней температурой на глубине залегания нефти $2 \cdot 10^3$ м при среднем геотермальном градиенте.

На границах Γ расчётной области ставятся условия:

- на всех внешних границах имеет место непротекание и отсутствие диффузионного потока вещества;
- на верхней и нижней гранях (индексы T и B) температура соответствует строго вертикальному геотермальному градиенту;
- на вертикальных гранях отсутствует поток тепла;
- на границах между слоями (индексы 1 и 2) давление, температура и концентрация, а также нормальные компоненты теплового и диффузионного потоков вещества и нормальные проекции вектора скорости непрерывны;

$$x=0; L: \mathbf{V}_i \cdot \mathbf{n}=0, \frac{\partial T_i}{\partial n}=0, \frac{\partial C_i}{\partial n}=0, \tag{6}$$

$$z=0; B: \mathbf{V}_i \cdot \mathbf{n}=0, \frac{\partial T_i}{\partial n}=0, \frac{\partial C_i}{\partial n}=0, \tag{7}$$

$$y=y_{\Gamma_T}: \mathbf{V}_1 \cdot \mathbf{n}=0, T_1=T_0+Ay, \frac{\partial(C_1-\Theta T_1)}{\partial n}=0, \tag{8}$$

$$y=y_{\Gamma_B}: \mathbf{V}_3 \cdot \mathbf{n}=0, T_3=T_0+Ay, \frac{\partial(C_3-\Theta T_3)}{\partial n}=0, \tag{9}$$

$$y=y_{\Gamma_1}: P_1=P_2, \mathbf{V}_1 \cdot \mathbf{n}=\mathbf{V}_2 \cdot \mathbf{n}, \frac{\partial T_1}{\partial n}=\frac{\partial T_2}{\partial n}, T_1=T_2, \frac{\partial(C_1-\Theta T_1)}{\partial n}=\frac{\partial(C_2-\Theta T_2)}{\partial n}, C_1=C_2, \tag{10}$$

$$y=y_{\Gamma_2}: P_2=P_3, \mathbf{V}_2 \cdot \mathbf{n}=\mathbf{V}_3 \cdot \mathbf{n}, \frac{\partial T_2}{\partial n}=\frac{\partial T_3}{\partial n}, T_2=T_3, \frac{\partial(C_2-\Theta T_2)}{\partial n}=\frac{\partial(C_3-\Theta T_3)}{\partial n}, C_2=C_3. \tag{11}$$

Здесь \mathbf{n} — единичный вектор нормали, $\Theta = \psi(\beta_T/\beta_C)$, где $\psi = C_0(C_0 - 1)\beta_C D_T / (\beta_T D)$.

Считается, что в начальный момент времени жидкость неподвижна, концентрация примеси в полости однородна, температура линейно зависит от вертикальной координаты.

3. Параметры и численная реализация

Физические свойства смеси тетралина (50%) и додекана (50%) представлены в таблице. Важно отметить, что исследования тепло- и массопереноса в пористых средах [21, 22] выявили необходимость корректировки результирующих коэффициентов диффузии и термодиффузии. Далее при моделировании использовались значения $D^* = 2.81 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$, $D_T^* = 2.6 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/(\text{сК})$. Этим значениям соответствуют следующие величины безразмерных параметров: отношение разделения $\psi = 0.694$, число Льюиса $Le = \chi/D = 150$, где χ — коэффициент температуропроводности.

Таблица. Физические и тепловые параметры смеси тетралина (50%) и додекана (50%)

$\rho_0, \text{кг/м}^3$	$\nu, \text{м}^2/\text{с}$	$\chi, \text{м}^2/\text{с}$	$\beta_T, 1/\text{К}$	β_C	$D, \text{м}^2/\text{с}$	$D_T, \text{м}^2/(\text{сК})$
840.70	$1.81 \cdot 10^{-6}$	$9.70 \cdot 10^{-8}$	$8.95 \cdot 10^{-4}$	0.270	$6.46 \cdot 10^{-10}$	$5.94 \cdot 10^{-12}$

Значения пористости для всех слоёв принимались равными 0.1. Проницаемости верхнего и нижнего слоёв считались одинаковыми и всегда меньшими, чем проницаемость внутреннего слоя. Расчёты проводились для значений проницаемостей слоёв, находящихся в диапазоне от $2 \cdot 10^{-11}$ до 10^{-14} м^2 . Такие свойства среды характерны, например, для мелкозернистого песка, глинистых песков, алевролитов, микротрещиноватых известняков, песчаника, сланцев [24–27].

Вычисления осуществлялись в программном пакете ANSYS Fluent, реализующем метод конечных объёмов. Применялась пространственная сетка с ячейкой типа многоугольника (poly-hexahedron), имеющей размер ребра от 0.5 до 2.0 м. Пространственная дискретизация выполнялась на основе схемы MUSCL (Monotone Upstream-Centered Schemes for Conservation Laws) второго порядка. На каждом временном шаге использовался критерий сходимости для компонент скорости: абсолютные невязки должны быть меньше 10^{-3} (для уравнения энергии — меньше 10^{-6}). Моделирование проведено до времен порядка $10^4 - 10^5$ лет с шагом по времени 10^7 с (0.317 года).

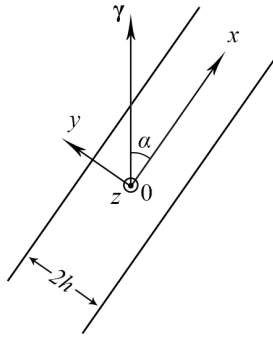
В условиях строго вертикального геотермального градиента температуры в рассматриваемой системе может реализоваться состояние, в котором конвективное движение отсутствует. Для определения условий устойчивости этого состояния решалась упрощённая задача — исследовалась линейная устойчивость бесконвективного состояния системы, представляющей собой бесконечно-протяжённый наклонный слой пористой среды, насыщенной бинарной жидкостью, с учётом эффекта Соре при строго вертикальном градиенте температуры.

4. Линейная задача: постановка и метод решения

Рассмотрим бесконечный горизонтальный слой толщиной $2h$ пористой среды, насыщенный бинарной смесью и наклонённый под углом α к вертикали (Рис. 2). Система находится в поле силы тяжести. Предполагаем, что верхняя и нижняя границы системы непроницаемые, твёрдые и идеально теплопроводные. На границах системы задаём распределение температуры, соответствующее её строго вертикальному градиенту.

Считаем, что плотность смеси, согласно уравнению (1), линейно зависит от температуры и концентрации примеси. Задачу будем решать с помощью уравнений свободной конвекции бинарной жидкости в пористой среде с учётом эффекта Соре: (2)–(5).

С целью перехода к безразмерным величинам (с индексом ND) для длины, скорости, времени, давления, температуры и концентрации введём следующие масштабы: $y = h \cdot y_{ND}$, $V = \frac{a}{h} \cdot V_{ND}$, $t = \frac{h^2(\rho c)^*}{\lambda^*} \cdot t_{ND}$, $P = \frac{\rho_0 a v}{K} \cdot P_{ND}$, $T = Ah \cdot T_{ND}$, $C = C_0(C_0 - 1)AhD_T(D)^{-1} \cdot C_{ND}$. Здесь $a = \lambda^*/(\rho c)_f$ — эффективная температуропроводность.



Система уравнений (2)–(5) в безразмерной форме приобретает вид:

$$0 = -\nabla P - \mathbf{V} + \text{Ra}(T + \psi C)\boldsymbol{\gamma}, \tag{12}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla T = \nabla^2 T, \tag{13}$$

$$\varepsilon \frac{\partial C}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla C = \text{Le}^{-1}(\nabla^2 C - \nabla^2 T), \tag{14}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0, \tag{15}$$

Рис. 2. Расчётная схема линейной задачи где $\text{Ra} = \frac{Kg\beta_T h^2 A}{av}$ — аналог числа Рэлея для пористой среды (далее будем называть его просто «число Рэлея»), ψ — введённое выше безразмерное отношение разделения, A — значение вертикального градиента температуры, $\varepsilon = \varepsilon^* \frac{(\rho c)_f}{(\rho c)^*}$ — нормированная пористость, $\boldsymbol{\gamma}$ — единичный вектор, направленный вверх.

На границах системы ставим условие непроницаемости, задаём распределение температуры, соответствующее строго вертикальному градиенту температуры в слое и считаем выполненным условие отсутствия потока примеси. Эти условия в безразмерной форме выглядят так:

$$-1 \leq y \leq 1: \quad V_y = 0, \quad T = -A(x - x_0)\cos\alpha - A(y - y_0)\sin\alpha, \quad \frac{\partial C}{\partial y} - \frac{\partial T}{\partial y} = 0. \tag{16}$$

Рассматриваемая задача имеет решение, соответствующее бесконвективному состоянию:

$$\tilde{V} = 0, \quad \nabla \tilde{T} = -\boldsymbol{\gamma}, \quad \nabla \tilde{C} = -\boldsymbol{\gamma}, \quad \nabla \tilde{P} = \text{Ra}(T_0 + \psi C_0)\boldsymbol{\gamma}. \tag{17}$$

Проведём линейное исследование устойчивости состояния (17). Для этого представим все поля в виде сумм полей основного состояния и малого возмущения:

$$V = \tilde{V} + V', \quad T = \tilde{T} + T', \quad C = \tilde{C} + C', \quad P = \tilde{P} + P'. \tag{18}$$

Подставим эти выражения в уравнения (12)–(15) и выполним линеаризацию по возмущениям. Выразим поле скорости через его компоненты во всех уравнениях и запишем уравнение движения (12) в виде проекции на оси координат. Исключим V_x, V_z и P из полученных уравнений и введём нормальные возмущения, периодические в направлениях осей x и z (запишем их в комплексной форме):

$$\begin{aligned} V' &= \varphi(y)e^{i(k_x x + k_z z)}, \\ T' &= \theta(y)e^{i(k_x x + k_z z)}, \\ C' &= \xi(y)e^{i(k_x x + k_z z)}, \end{aligned}$$

k_x, k_z — волновые числа в направлениях x и z соответственно.

В результате приходим к системе уравнений для амплитуд возмущений компоненты скорости — $\varphi(y)$, температуры — $\theta(y)$, и концентрации — $\xi(y)$. Для удобства введём новую функцию: $\eta = \xi - \theta$, являющуюся комбинацией возмущений концентрации и температуры. Тогда система уравнений для амплитуд φ, θ, η принимает вид:

$$\Delta\varphi + i\zeta k \text{Ra} \cos\alpha \cdot [\theta'(\psi+1) + \psi \cdot \eta'] + k^2 \text{Ra} \sin\alpha \cdot [\theta(\psi+1) + \psi \cdot \eta] = 0, \tag{19}$$

$$\Delta\theta + \varphi \sin\alpha + i \frac{\zeta}{k} \varphi' \cos\alpha + (1 - \zeta^2) \text{Ra} \cos^2\alpha [\theta(\psi+1) + \psi \cdot \eta] = 0, \tag{20}$$

$$\Delta\eta + \text{Le} \varphi \sin\alpha + i \text{Le} \frac{\zeta}{k} \varphi' \cos\alpha + \text{Le}(1 - \zeta^2) \text{Ra} \cos^2\alpha [\theta(\psi+1) + \psi \cdot \eta] = 0, \tag{21}$$

где $k^2 = k_x^2 + k_z^2$, $\Delta = \partial_{yy}^2 - k^2$, $\zeta = k_x/k$ — параметр трёхмерности.

Граничные условия для φ, θ, η выглядят так:

$$y = \pm 1: \quad \varphi = 0, \quad \theta = 0, \quad \frac{\partial \eta}{\partial y} = 0. \tag{22}$$

Далее задачу, описываемую системой уравнений (19)–(21) с граничными условиями (22), будем решать численно. Для этого построим фундаментальную систему решений, состоящую из шести дифференциальных уравнений первого порядка, для реализации которой применим метод Рунге–Кутты 5-го порядка. Поиск нуля определителя

матрицы фундаментальной системы решений осуществим методом секущих. Подробную информацию о процедуре решения можно найти в работе [28].

5. Оценка критического числа Рэлея

В отличие от распространённой линейной модели, в которой нефтеносные пласты имеют вид бесконечно протяжённых слоёв, рассматриваемая в данной работе геометрия является более сложной. Поэтому к линейной модели прибегнем только для первоначальной оценки критического числа Рэлея, а основное внимание уделим исследованию нелинейной динамики системы.

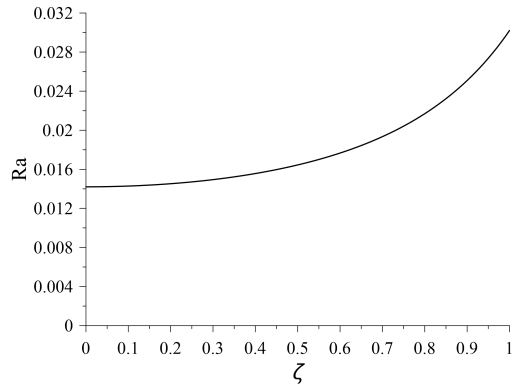


Рис. 3. Зависимость критического Ra от ζ при $\alpha = 76^\circ$, $\psi = 0.694$

Оценим критическое число Рэлея для внутреннего слоя в предположении, что конвекция не проникает во внешние слои (например, в случае их существенно меньшей проницаемости). Расчёты при числе Льюиса $Le = 150$ и значении отношения разделения $\psi = 0.694$, соответствующем смеси тетралина (50%) и додекана (50%), дают критическое число Рэлея $Ra = 0.0142$, причём наиболее опасными являются возмущения при $\zeta = 0$ (продольные валы), а наименее опасными — при $\zeta = 1$ (плоские возмущения) (Рис. 3). Этому числу Рэлея отвечает значение проницаемости, при котором становится возможной конвекция во внешних слоях, равное $K = 6.02 \cdot 10^{-16} \text{ м}^2$. При нелинейном же исследовании системы конвекция, как оказалось, начинает возбуждаться при проницаемости порядка $K \approx 10^{-15} \text{ м}^2$.

6. Трёхмерные нелинейные расчёты

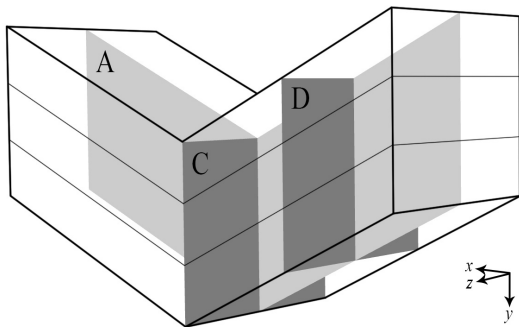


Рис. 4. Плоскости, в которых приводятся результаты нелинейных расчётов

Ниже представлены данные нелинейных расчётов в программном пакете ANSYS Fluent для синклинальной складки с разными проницаемостями слоёв. Проницаемости внешних слоёв устанавливались одинаковыми. Размерные параметры системы соответствовали смеси тетралина (50%) и додекана (50%) (см. Табл. в разделе 3). На рисунке 4 представлены плоскости, в которых далее будут приведены поля, полученные с двойной точностью по нелинейной модели для задачи в нестационарной постановке. Плоскости располагаются следующим образом:

- А рассекает складку пополам перпендикулярно оси z ;
- С отделяет левое крыло складки от правого и перпендикулярна оси x ;
- D находится по середине правого крыла и перпендикулярна оси x .

Пример 1. Сначала исследуем течение в слоях с малыми проницаемостями и, соответственно, небольшими надкритичностями (то есть вблизи порога конвекции): $K_{in} = 10^{-13} \text{ м}^2$ во внутреннем слое, $K_{ex} = 10^{-14} \text{ м}^2$ во внешних слоях. Для такого соотношения проницаемостей ($K_p = K_{in}/K_{ex} = 10$) имеет место крупномасштабное плоскопараллельное течение, в большей степени сконцентрированное в центральном слое, однако захватывающее и менее проницаемые внешние слои (см. Рис. 5–7). Движение жидкости вдоль оси z отсутствует. Течение заметно искривляет изолинии концентрации примеси в плоскости А (Рис. 7).

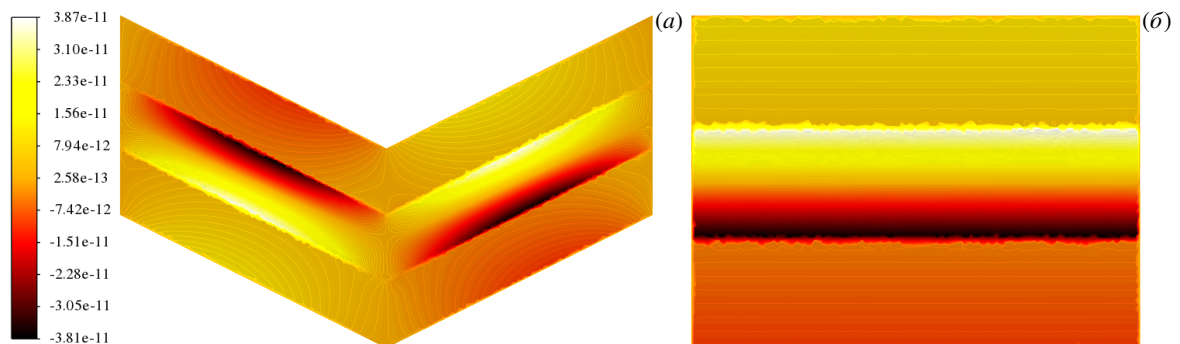


Рис. 5. Поля компоненты скорости V_x [м/с] при $K_p = K_{in}/K_{ex} = 10$ в плоскостях А (а) и D (б)

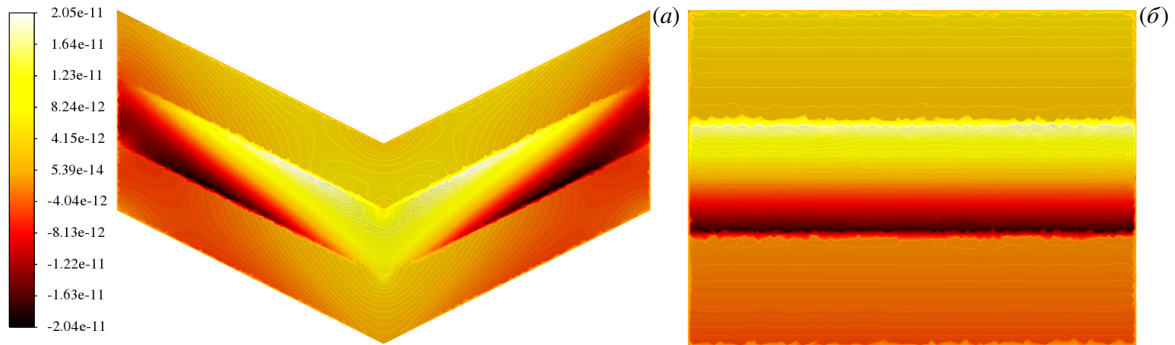


Рис. 6. Поля компоненты скорости V_y [м/с] при $K_p = K_{in}/K_{ex} = 10$ в плоскостях А (а) и D (б)

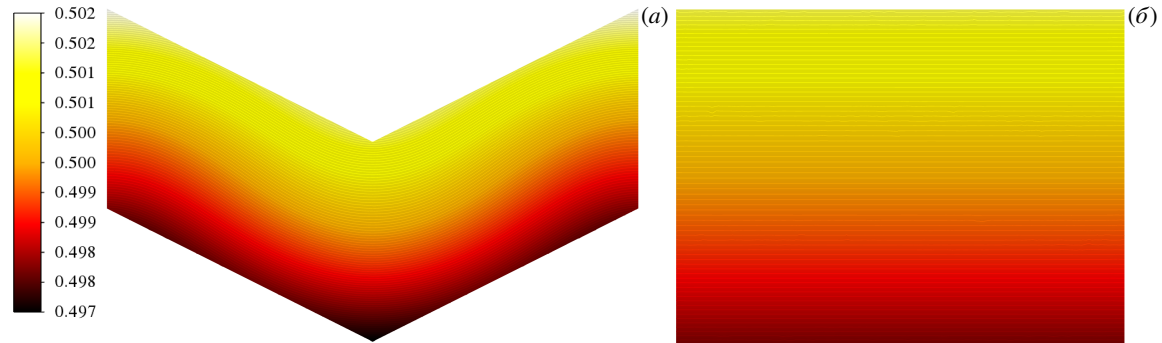


Рис. 7. Поля концентрации примеси при $K_p = K_{in}/K_{ex} = 10$ в плоскостях А (а) и D (б)

Пример 2. Посмотрим, как система отреагирует на уменьшение в 2 раза проницаемости внутреннего слоя, то есть $K_{in} = 5 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2$, $K_{ex} = 10^{-14} \text{ м}^2$, $K_p = 5$. Это делает проницаемости внешних и внутреннего слоёв более близкими, но ожидаемо ведёт к снижению общей интенсивности конвекции. При таких параметрах наблюдается течение, качественно аналогичное течению из Примера 1, однако при этом потоки жидкости в менее проницаемых внешних слоях становятся более интенсивными по сравнению с потоками внутреннего слоя. Из-за общего уменьшения интенсивности течения изолинии поля концентрации примеси искажаются меньше. В этом случае распределение концентрации приближается к своему линейному вертикальному градиенту.

Пример 3. Далее, ещё уменьшим проницаемость внутреннего слоя так, чтобы она стала лишь в 2 раза выше проницаемости внешних слоёв ($K_{in} = 2 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2$, $K_{ex} = 10^{-14} \text{ м}^2$, $K_p = 2$). Как видно из рисунков 8–10, основное течение жидкости происходит во внешних слоях, хотя они менее проницаемы, чем внутренний. Это связано с тем, что течение в пределах каждого крыла складки превращается в крупномасштабное, в отличие от Примеров 1 и 2: один конвективный вал занимает все слои крыла. При этом наиболее интенсивно течение ведёт себя возле верхних и нижних границ складки. Однако в целом интенсивность течения снова снижается из-за уменьшения проницаемости внутреннего слоя. Вследствие этого изолинии поля концентрации примеси (Рис. 10) искажаются ещё меньше, чем в Примере 2.

Пример 4. Проверим, как будет сказываться на течении увеличение на порядок проницаемости всех слоёв по сравнению с Примером 1: $K_{in} = 10^{-12} \text{ м}^2$, $K_{ex} = 10^{-13} \text{ м}^2$. В этом случае по-прежнему $K_p = 10$ и, как и в Примерах 1 и 2, наблюдается крупномасштабное плоскопараллельное течение, в большей степени сконцентрированное в центральном слое, но захватывающее также менее проницаемые внешние слои. Однако, в отличие от случаев с меньшими проницаемостями слоёв (Примеры 1 и 2), течение становится более интенсивным,

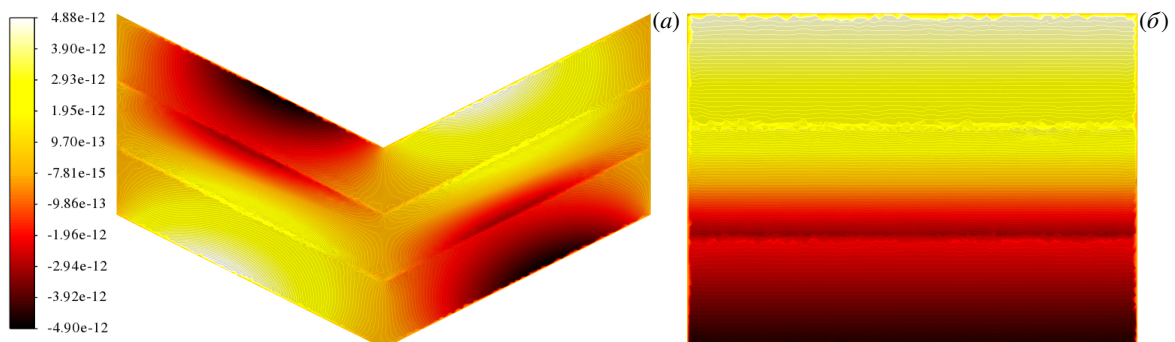


Рис. 8. Поля компоненты скорости V_x [м/с] при $K_p = K_{in}/K_{ex} = 2$ в плоскостях А (а) и D (б)

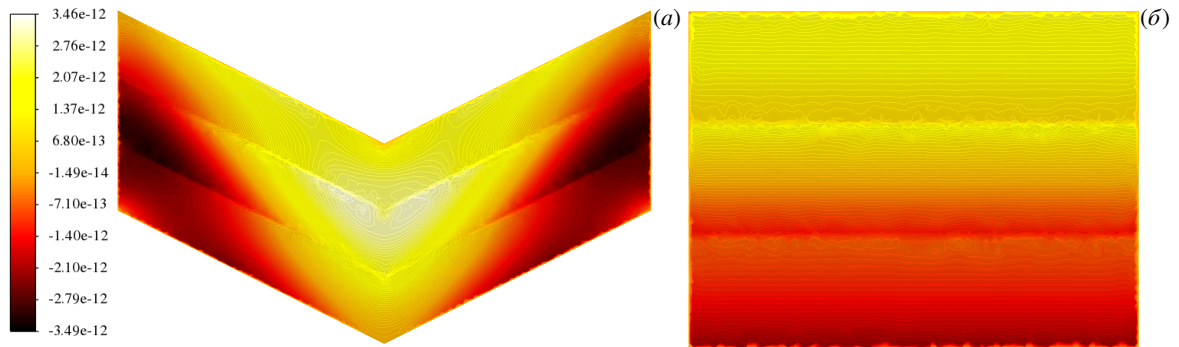


Рис. 9. Поля компоненты скорости V_y [м/с] при $K_p = K_{in}/K_{ex} = 2$ в плоскостях А (а) и D (б)

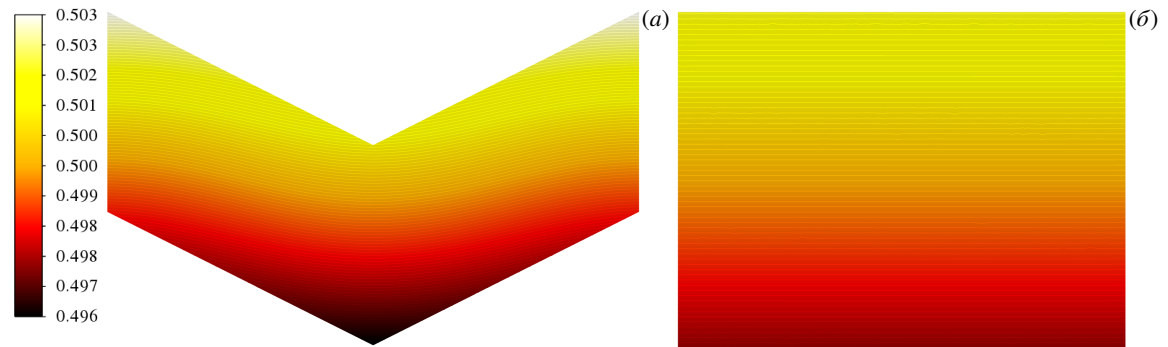


Рис. 10. Поля концентрации примеси при $K_p = K_{in}/K_{ex} = 2$ в плоскостях А (а) и D (б)

а пики интенсивности его скорости вдоль оси y смещаются к центру и краям складки. Для системы с меньшими K_p (с близкими проницаемостями всех слоёв) наблюдается качественно аналогичное поведение относительно уже рассмотренных выше Примеров 1–3. Исключением в Примере 4 является лишь то, что за счёт возросшей интенсивности течения теперь изолинии поля концентрации деформируются еще заметнее (Рис. 11).

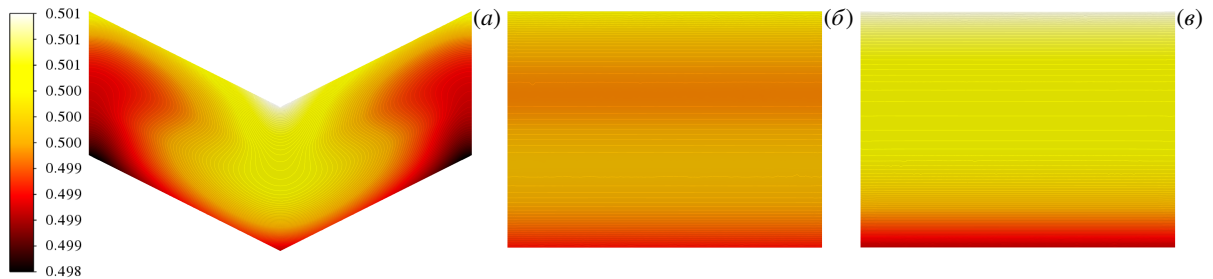


Рис. 11. Поля концентрации примеси при $K_p = K_{in}/K_{ex} = 10$ в плоскостях А (а), D (б) и С (в)

Пример 5. Относительно Примера 4 увеличим проницаемости внешних слоёв на порядок: $K_{ex} = 10^{-12} \text{ м}^2$, а проницаемость внутреннего слоя возьмём в 5 раз большей, по сравнению с ними: $K_{in} = 5 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$, то есть $K_p = 5$. Как видно из рисунков 12–15, наблюдается крупномасштабное плоскопараллельное течение с наложенными на

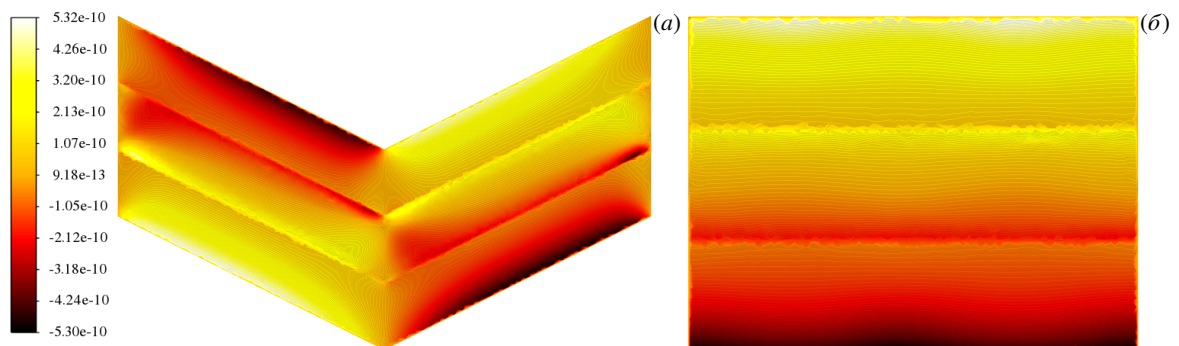


Рис. 12. Поля компоненты скорости V_x [м/с] при $K_p = K_{in}/K_{ex} = 5$ в плоскостях А (а) и D (б)

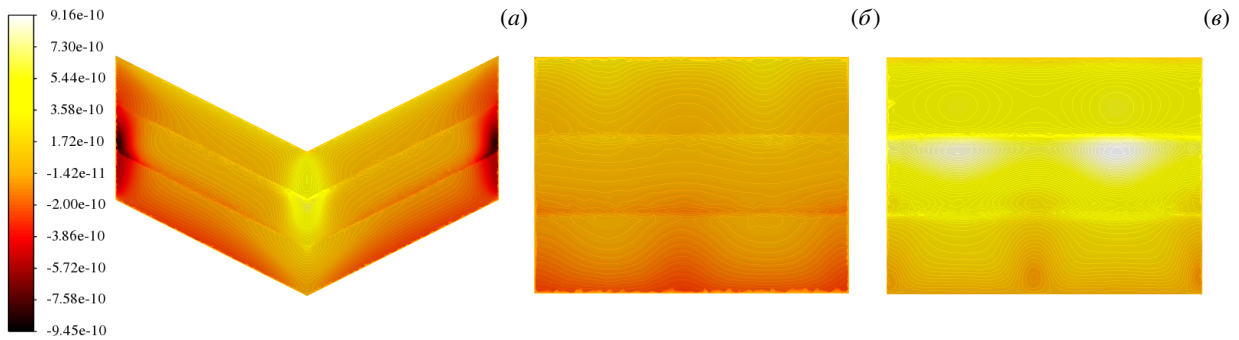


Рис. 13. Поля компоненты скорости V_y [м/с] при $K_p = K_{in}/K_{ex} = 5$ в плоскостях А (а) и D (б)

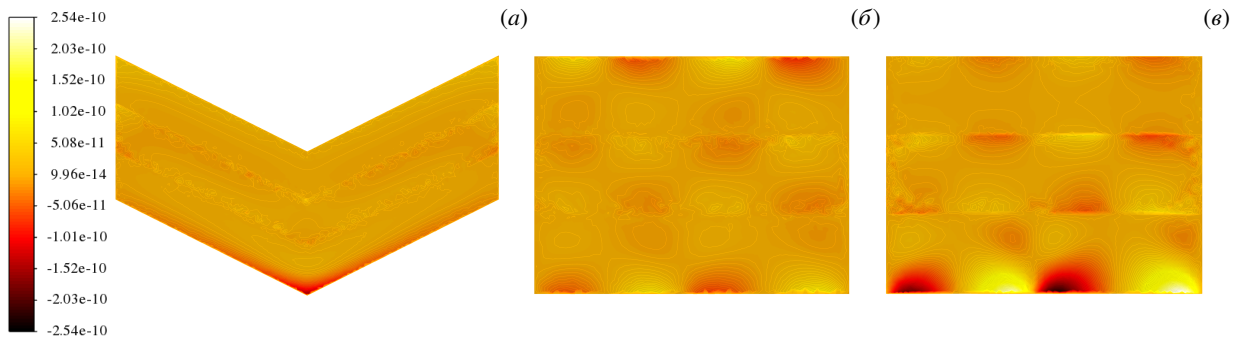


Рис. 14. Поля компоненты скорости V_z [м/с] при $K_p = 5$ в плоскостях А (а), D (б) и С (е)

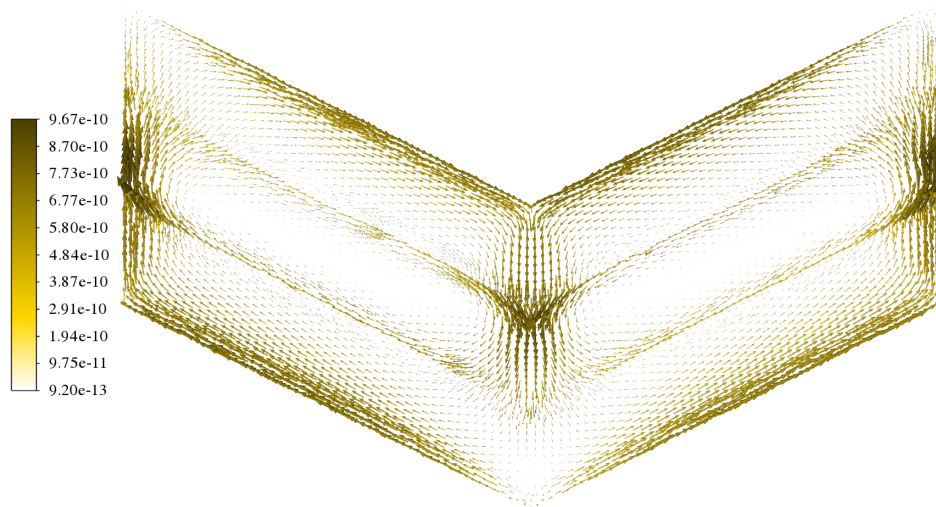


Рис. 15. Векторное поле скорости V [м/с] в плоскости А при $K_p = 5$

него продольными валами (течение с четырёхвихревой структурой). Скорость движения жидкости вдоль оси z теперь ненулевая, а имеет место трёхмерное течение. Основное движение жидкости происходит во внешних слоях, несмотря на то, что они менее проницаемы, чем внутренний. Примечательно, что при более проницаемых всех слоях, образующих складку, подобным образом зоны интенсивности течения перераспределяются при более высоких значениях K_p . Течение вдоль оси x ведёт себя наиболее интенсивно вблизи верхних и нижних границ складки, а течение вдоль оси y — на торцах складки и в её центре. За счёт влияния продольных валов изолинии поля концентрации примеси сильно искривляются (Рис. 16), причём как в плоскости А, так и в плоскостях D и С.

Пример 6. Увеличим проницаемость внутреннего слоя в 10 раз, а внешних слоёв в 5 раз, по сравнению с Примером 5: $K_{in} = 5 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$, $K_{ex} = 5 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$, $K_p = 10$. При этом течение является крупномасштабным с наложенными на него продольными валами (с пятивихревой структурой) (Рис. 17), причём основной вклад в движение жидкости вносят продольные валы. Во всём объёме течение интенсивное, однако выделяются зоны его локализации у торцов и около центра складки. Изолинии поля концентрации (Рис. 18) искривляются ещё сильнее, чем в Примере 5. При проницаемости внешних слоёв $K_{ex} = 5 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$ и меньших K_p (при близких проницаемостях всех слоёв) наблюдается поведение системы, качественно аналогичное рассмотренным выше случаям.

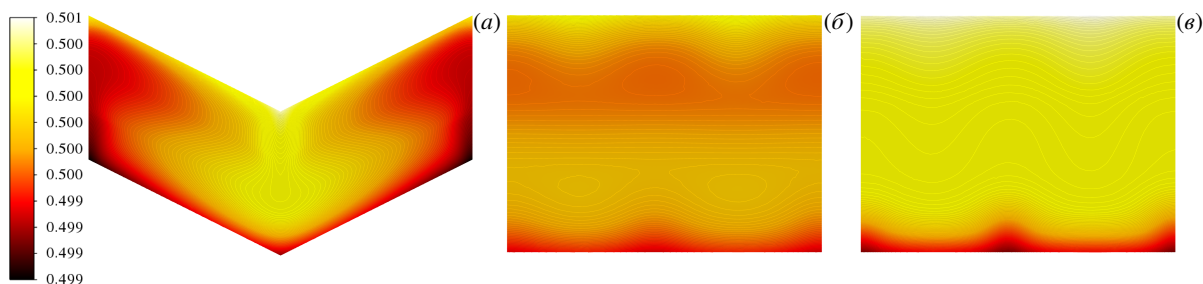


Рис. 16. Поля концентрации примеси при $K_p = 5$ в плоскостях А (а), D (б) и С (в)

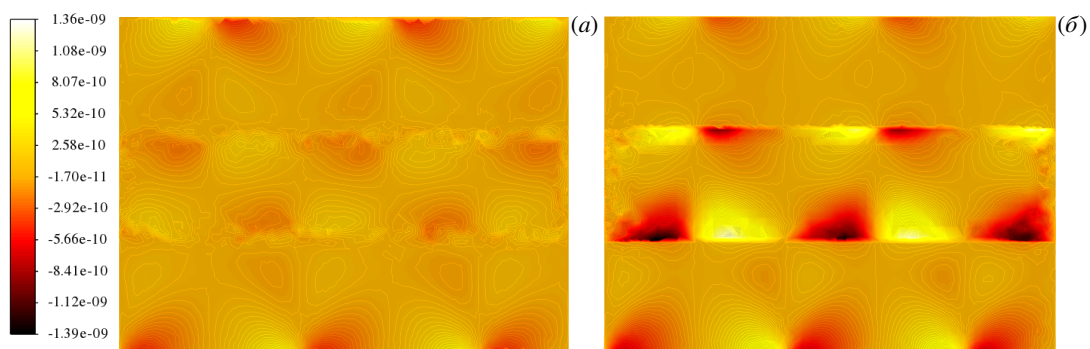


Рис. 17. Поля компоненты скорости V_z [м/с] при $K_p = 10$ в плоскостях D (а) и С (б)

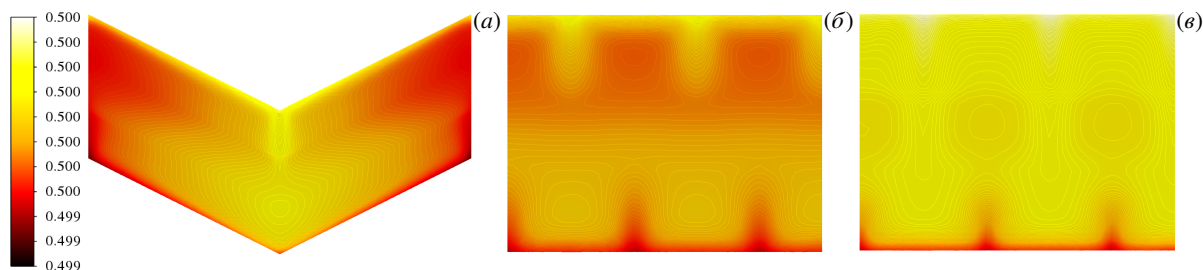


Рис. 18. Поля концентрации примеси при $K_p = 10$ в плоскостях А (а), D (б) и С (в)

Таким образом, порог конвекции, полученный в нелинейных расчётах, оказывается близким к порогу конвекции, выявленному при линейном анализе устойчивости, выполненном в разделе 5.

7. Заключение

В результате нелинейного трёхмерного моделирования установлено:

- при значительно более высокой относительно внешних слоёв проницаемости внутреннего слоя течение локализуется во внутреннем слое;
- при достаточной близкой проницаемостях внешних и внутреннего слоя основное течение переходит на внешние слои и концентрируется около стенок складки даже при том, что внутренний слой остаётся более проницаемым, чем внешние;
- с ростом надкритичности в первоначально плоскопараллельном течении (в пределах каждого крыла складки) начинает появляться составляющая течения вида продольных валов, и течение становится спиральным;
- с дальнейшим увеличением надкритичности составляющая продольных валов в течении начинает преобладать, количество продольных валов в пределах крыла складки растёт (для продольных валов их волновое число становится больше);
- появление продольной составляющей конвективного течения оказывает значительное влияние на распределение концентрации примеси по складке;
- в геологической складке синклинального вида имеют место структуры течения, качественно аналогичные структурам, характерным для антиклинальной складки, за исключением распределения по складке концентрации примеси.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта, финансируемого Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-15-2024-535 от 23 апреля 2024 г.).

Литература

1. *Billings M.P.* Structural geology. Prentice-Hall Inc., 1972. 606 p.
2. *Мухайлов А.Е.* Структурная геология и геологическое картирование. М.: Недра, 1984. 464 с.
3. *Szulczewski M.L., Hesse M.A., Juanes R.* Carbon dioxide dissolution in structural and stratigraphic traps // *Journal of Fluid Mechanics*. 2013. Vol. 736. P. 287–315. DOI: 10.1017/jfm.2013.511
4. *Simmons C.T., Bauer-Gottwein P., Graf T., et al.* Variable density groundwater flow: from modelling to applications // *Groundwater Modelling in Arid and Semi-Arid Areas* / ed. by H. Wheeler, S. Mathias, X. Li. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. P. 87–118. DOI: 10.1017/CB09780511760280.008
5. *Baghooee H., Montel F., Galliero G., Yan W., Shapiro A.* A new approach to thermal segregation in petroleum reservoirs: Algorithm and case studies // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2021. Vol. 201. 108367. DOI: 10.1016/j.petrol.2021.108367
6. *Parameswari K., Mudgal B.V.* Assessment of contaminant migration in an unconfined aquifer around an open dumping yard: Perungudi a case study // *Environmental Earth Sciences*. 2015. Vol. 74, no. 7. P. 6111–6122. DOI: 10.1007/s12665-015-4634-x
7. *Hewitt D.R., Neufeld J.A., Lister J.R.* High Rayleigh number convection in a porous medium containing a thin low-permeability layer // *Journal of Fluid Mechanics*. 2014. Vol. 756. P. 844–869. DOI: 10.1017/jfm.2014.478
8. *Zech A., Zehner B., Kolditz O., Attinger S.* Impact of heterogeneous permeability distribution on the groundwater flow systems of a small sedimentary basin // *Journal of Hydrology*. 2016. Vol. 532. P. 90–101. DOI: 10.1016/j.jhydro1.2015.11.030
9. *Salibindla A.K.R., Subedi R., Shen V.C., Masuk A.U.M., Ni R.* Dissolution-driven convection in a heterogeneous porous medium // *Journal of Fluid Mechanics*. 2018. Vol. 857. P. 61–79. DOI: 10.1017/jfm.2018.732
10. *Soboleva E.B.* Density-driven convection in an inhomogeneous geothermal reservoir // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018. Vol. 127. P. 784–798. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.08.019
11. *Zubova N.A., Lyubimova T.P.* Convection of ternary mixture in anisotropic porous medium // *29th Russian Conference on Mathematical Modelling in Natural Sciences*. Vol. 2371. 2021. 050013. DOI: 10.1063/5.0059568
12. *Зубова Н.А., Любимова Т.П.* Нелинейные режимы конвекции трехкомпонентной смеси в двухслойной пористой среде // *Вычислительная механика сплошных сред*. 2021. Т. 14, № 1. С. 110–121. DOI: 10.7242/1999-6691/2021.14.1.10
13. *Barbier E.* Geothermal energy technology and current status: an overview // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2002. Vol. 6. P. 3–65. DOI: 10.1016/S1364-0321(02)00002-3
14. *Kocberber S., Collins R.E.* Impact of Reservoir Heterogeneity on Initial Distributions of Hydrocarbons // *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. 1990. P. 175–201. DOI: 10.2118/20547-MS
15. *Schmitt R.W.* Double Diffusion in Oceanography // *Annual Review of Fluid Mechanics*. 1994. Vol. 26. P. 255–285. DOI: 10.1146/annurev.fl.26.010194.001351
16. *Pedersen K.S., Hjermstad H.P.* Modeling of Compositional Variation with Depth for Five North Sea Reservoirs // *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. 2015. DOI: 10.2118/175085-ms
17. *Collell J., Galliero G., Vermorel R., Ungerer P., Yiannourakou M., Montel F., Pujol M.* Transport of Multicomponent Hydrocarbon Mixtures in Shale Organic Matter by Molecular Simulations // *The Journal of Physical Chemistry C*. 2015. Vol. 119, no. 39. P. 22587–22595. DOI: 10.1021/acs.jpcc.5b07242
18. *Lyubimova T.P., Muratov I.D., Shubenkov I.S.* Onset and nonlinear regimes of convection in an inclined porous layer subject to a vertical temperature gradient // *Physics of Fluids*. 2022. Vol. 34. 094114. DOI: 10.1063/5.0104575
19. *Shubenkov I., Lyubimova T., Sadilov E.* Three-Dimensional Convection in an Inclined Porous Layer Subjected to a Vertical Temperature Gradient // *Fluid Dynamics & Materials Processing*. 2024. Vol. 20, no. 9. P. 1957–1970. DOI: 10.32604/fdmp.2024.050167
20. *Lyubimova T., Shubenkov I., Ozhgibesova N.* Soret-Induced Convection in a Layered Porous Medium Simulating an Anticlinal Geological Fold Under the Action of a Geothermal Temperature Gradient // *Heat Transfer*. 2025. Vol. 54. P. 2251–2264. DOI: 10.1002/htj.23289
21. *Platten J.K., Costesque P.* The Soret Coefficient in Porous Media // *Journal of Porous Media*. 2004. Vol. 7, no. 4. P. 317–330. DOI: 10.1615/JPorMedia.v7.i4.60
22. *Yasnou V., Mialdun A., Melnikov D., Shevtsova V.* Role of a layer of porous medium in the thermodiffusion dynamics of a liquid mixture // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019. Vol. 143. 118480. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118480
23. *Алхасов А.Б.* Возобновляемые источники энергии. М.: Физматлит, 2012. 256 с.
24. *Forster S., Bobertz B., Bohling B.* Permeability of Sands in the Coastal Areas of the Southern Baltic Sea: Mapping a Grain-size Related Sediment Property // *Aquatic Geochemistry*. 2003. Vol. 9. P. 171–190. DOI: 10.1023/B:AQUA.0000022953.52275.8b
25. *Iscan A.G., Kok M.V.* Porosity and Permeability Determinations in Sandstone and Limestone Rocks Using Thin Section Analysis Approach // *Energy Sources, Part A*. 2009. Vol. 31. P. 568–575. DOI: 10.1080/15567030802463984
26. *Справочник (кадастр) физических свойств горных пород/под ред. Н.В. Мельникова, М.М. Протождяконова, В.В. Ржевского.* М.: Недра, 1975. 279 с.

27. Добрынин В.М., Вендельштейн Б.Ю., Кожевников Д.А. Петрофизика (физика горных пород). М.: Нефть и газ, 2004. 368 с.
28. Лобов Н.И., Любимов Д.В., Любимова Т.П. Решение задач на ЭВМ. Пермь: Пермский гос. ун-т, 2007. 82 с.

Сведения об авторах:

Шубенков Иван Сергеевич (корр.), мнс, Институт механики сплошных сред УрО РАН (ИМСС УрО РАН), 614018, г. Пермь, ул. Академика Королёва, д. 1; e-mail: ShubenkovIS@yandex.ru; ORCID: 0000-0001-9682-9531

Любимова Татьяна Петровна, дфмн, проф., зав. лаб., ИМСС УрО РАН; e-mail: lyubimovata@mail.ru; ORCID: 0000-0002-8212-2890

Research article

The onset and evolution of nonlinear convective regimes of binary mixtures in multilayer systems simulating synclinal geological folds

I.S. Shubenkov, T.P. Lyubimova

Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Perm, Russian Federation

This paper studies three-dimensional convective regimes of a binary mixture in a system of three porous bent layers, simulating a synclinal geological fold under the influence of a geothermal temperature gradient. The layers are assumed to have identical porosities and different permeabilities. A mixture of tetralin and dodecane taken in equal proportions is considered as the fluid saturating the porous medium. The components of the mixture represent the groups of hydrocarbons found in oil fields. The numerical study is performed to evaluate the linear stability of the mechanical equilibrium of a binary mixture in the inclined porous layer saturated with liquid in a gravity field under the influence of a strictly vertical temperature gradient. The convection threshold found is compared with the threshold obtained for the system with non-linear stability. In three-dimensional nonlinear calculations for a three-layer mixture, the permeabilities of all three layers are varied. Here it is assumed that the permeabilities of the outer layers are identical and always lower than the permeability of the inner layer. It was found that when the permeability of the inner layer is much higher than the permeabilities of the outer layers, the flow is localized in the inner layer. When the permeabilities of the outer and inner layers are sufficiently close, the flow is localized near the outer boundaries of the fold, even if the inner layer is more permeable than the outer layers. As the supercriticality increases, the formation of longitudinal rolls is observed in the initially plane-parallel flow (within each fold limb), and the flow becomes spiral. A further increase in supercriticality leads to a predominance of the longitudinal roll component in the flow and an increase in the number of longitudinal rolls along the fold limb (increase in the wave number of longitudinal rolls).

Keywords: thermal convection, binary mixture, porous media, multilayer system, inclined layer, vertical temperature gradient, mathematical modeling, ANSYS Fluent

Received: 04.11.2025 / *Published online:* 04.04.2026

Acknowledgements

The work was carried out as part of a major scientific project funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Agreement No. 075-15-2024-535 dated April 23, 2024).

References

1. Billings M.P. Structural geology. Prentice-Hall Inc., 1972. 606 p.
2. Mikhaylov A.E. Strukturnaya geologiya i geologicheskoye kartirovaniye. Moscow: Nedra, 1984. 464 p.
3. Szulczewski M.L., Hesse M.A., Juanes R. Carbon dioxide dissolution in structural and stratigraphic traps. *Journal of Fluid Mechanics*. 2013. Vol. 736. P. 287–315. DOI: 10.1017/jfm.2013.511
4. Simmons C.T., Bauer-Gottwein P., Graf T., et al. Variable density groundwater flow: from modelling to applications. *Groundwater Modelling in Arid and Semi-Arid Areas* / ed. by H. Wheeler, S. Mathias, X. Li. Cambridge University Press, 2010. P. 87–118. DOI: 10.1017/CB09780511760280.008
5. Baghoee H., Montel F., Galliero G., Yan W., Shapiro A. A new approach to thermal segregation in petroleum reservoirs: Algorithm and case studies. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2021. Vol. 201. 108367. DOI: 10.1016/j.petrol.2021.108367
6. Parameswari K., Mudgal B.V. Assessment of contaminant migration in an unconfined aquifer around an open dumping yard: Perungudi a case study. *Environmental Earth Sciences*. 2015. Vol. 74, no. 7. P. 6111–6122. DOI: 10.1007/s12665-015-4634-x
7. Hewitt D.R., Neufeld J.A., Lister J.R. High Rayleigh number convection in a porous medium containing a thin low-permeability layer. *Journal of Fluid Mechanics*. 2014. Vol. 756. P. 844–869. DOI: 10.1017/jfm.2014.478
8. Zech A., Zehner B., Kolditz O., Attinger S. Impact of heterogeneous permeability distribution on the groundwater flow systems of a small sedimentary basin. *Journal of Hydrology*. 2016. Vol. 532. P. 90–101. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.11.030

9. *Salibindla A.K.R., Subedi R., Shen V.C., Masuk A.U.M., Ni R.* Dissolution-driven convection in a heterogeneous porous medium. *Journal of Fluid Mechanics*. 2018. Vol. 857. P. 61–79. DOI: 10.1017/jfm.2018.732
10. *Soboleva E.B.* Density-driven convection in an inhomogeneous geothermal reservoir. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018. Vol. 127. P. 784–798. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.08.019
11. *Zubova N.A., Lyubimova T.P.* Convection of ternary mixture in anisotropic porous medium. 29th Russian Conference on Mathematical Modelling in Natural Sciences. Vol. 2371. 2021. 050013. DOI: 10.1063/5.0059568
12. *Zubova N.A., Lyubimova T.P.* Nonlinear convection regimes of a ternary mixture in a two-layer porous medium. *Computational Continuum Mechanics*. 2021. Vol. 14, no. 1. P. 110–121. DOI: 10.7242/1999-6691/2021.14.1.10
13. *Barbier E.* Geothermal energy technology and current status: an overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2002. Vol. 6. P. 3–65. DOI: 10.1016/S1364-0321(02)00002-3
14. *Kocberber S., Collins R.E.* Impact of Reservoir Heterogeneity on Initial Distributions of Hydrocarbons. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. 1990. P. 175–201. DOI: 10.2118/20547-MS
15. *Schmitt R.W.* Double Diffusion in Oceanography. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 1994. Vol. 26. P. 255–285. DOI: 10.1146/annurev.fl.26.010194.001351
16. *Pedersen K.S., Hjermstad H.P.* Modeling of Compositional Variation with Depth for Five North Sea Reservoirs. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. 2015. DOI: 10.2118/175085-ms
17. *Collell J., Galliero G., Vermorel R., Ungerer P., Yiannourakou M., Montel F., Pujol M.* Transport of Multicomponent Hydrocarbon Mixtures in Shale Organic Matter by Molecular Simulations. *The Journal of Physical Chemistry C*. 2015. Vol. 119, no. 39. P. 22587–22595. DOI: 10.1021/acs.jpcc.5b07242
18. *Lyubimova T.P., Muratov I.D., Shubenkov I.S.* Onset and nonlinear regimes of convection in an inclined porous layer subject to a vertical temperature gradient. *Physics of Fluids*. 2022. Vol. 34. 094114. DOI: 10.1063/5.0104575
19. *Shubenkov I., Lyubimova T., Sadilov E.* Three-Dimensional Convection in an Inclined Porous Layer Subjected to a Vertical Temperature Gradient. *Fluid Dynamics & Materials Processing*. 2024. Vol. 20, no. 9. P. 1957–1970. DOI: 10.32604/fdmp.2024.050167
20. *Lyubimova T., Shubenkov I., Ozhgibesova N.* Soret-Induced Convection in a Layered Porous Medium Simulating an Anticlinal Geological Fold Under the Action of a Geothermal Temperature Gradient. *Heat Transfer*. 2025. Vol. 54. P. 2251–2264. DOI: 10.1002/htj.23289
21. *Platten J.K., Costeseque P.* The Soret Coefficient in Porous Media. *Journal of Porous Media*. 2004. Vol. 7, no. 4. P. 317–330. DOI: 10.1615/JPorMedia.v7.i4.60
22. *Yasnou V., Mialdun A., Melnikov D., Shevtsova V.* Role of a layer of porous medium in the thermodiffusion dynamics of a liquid mixture. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019. Vol. 143. 118480. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118480
23. *Alkhasov A.B.* *Vozobnovlyayemye istochniki energii*. Moscow: Fizmatlit, 2012. 256 p.
24. *Forster S., Bobertz B., Bohling B.* Permeability of Sands in the Coastal Areas of the Southern Baltic Sea: Mapping a Grain-size Related Sediment Property. *Aquatic Geochemistry*. 2003. Vol. 9. P. 171–190. DOI: 10.1023/B:AQUA.0000022953.52275.8b
25. *Iscan A.G., Kok M.V.* Porosity and Permeability Determinations in Sandstone and Limestone Rocks Using Thin Section Analysis Approach. *Energy Sources, Part A*. 2009. Vol. 31. P. 568–575. DOI: 10.1080/15567030802463984
26. *Spravochnik (kadastr) fizicheskikh svoystv gornykh porod* / ed. by N.V. Melnikov, V.V. Rzhnevsky, M.M. Protodyakonov. Moscow: Nedra, 1975. 279 p.
27. *Dobrynin M.V., Wendelstein B.Y., Kozhevnikov D.A.* *Petrofizika (fizika gornykh porod)*. Moscow: Federal State Budgetary Institution Oil, Gas Publishing House of the Russian State University of Oil, Gas named I.M. Gubkin, 2004. 368 p.
28. *Lobov N.I., Lyubimov D.V., Lyubimova T.P.* *Resheniye zadach na EVM*. Perm: Perm University, 2007. 82 p.