

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ 2D КОНВЕКЦИИ В НАКЛОННЫХ ПОРИСТЫХ СЛОЯХ

Миндубаев М.Г. – Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург

Аннотация. Проведено численное исследование на конвективную устойчивость проницаемого слоя пористой среды, помещенного в непроницаемый массив. Показано, что учёт конечной проводимости вмещающего массива приводит к понижению устойчивости. Получены оценки критического числа Рэлея для наклонного и вертикального проницаемых слоев для аспектного отношения 10:1.

Свободная тепловая конвекция в пористой среде, конвективная устойчивость.

RESULTS OF NUMERICAL MODELING 2D CONVECTION IN AN INCLINED POROUS LAYERS

Abstract. A numerical study on the stability of the convective layer permeable porous medium placed in an impenetrable array. It was found that the inclusion of the finite conductivity of the containing array leads to a decrease in stability. We obtain estimates of the critical Rayleigh number for inclined and vertical permeable layers for an aspect ratio of 10:1.

Free thermal convection in a porous medium, convective stability.

Введение

Многие процессы, происходящие в земной коре, связаны с гидротермальной конвекцией в трещиновато-пористых зонах. Известно (Любимова и др., 1973), что над нефтяными и газовыми месторождениями образуются аномалии теплового потока. При этом над центральной частью формируется положительная аномалия, а приблизительно над контуром, охватывающим месторождение, наблюдается депрессия теплового потока (Тараненко и др., 2000). В работе (Лопатников, 1995) показано, что конвективные движения грунтовых вод в проницаемых слоях коры, вызванные естественным температурным градиентом, могут обеспечить механизм вторичной миграции углеводородов от нефтематеринских толщ в области нефтескопления. В работе (Мальковский, Пэк, 1997) рассмотрены условия возникновения свободной конвекции в вертикальном разломе. Задача о возникновении конвекции в двух гидродинамически связанных тонких вертикальных разломах, окружённых непроницаемым массивом горных пород, рассмотрена в работе (Рамазанов, 2003). В работе (Лопатников, 1995) получено условие возникновения конвекции для наклонного слоя.

В предыдущих работах (Хачай, Мин-

дубаев, 2012; Миндубаев, 2014) нами рассматривались 3D модели в горизонтальном слое пористой среды насыщенной флюидом при различных числах Рэлея. Показано, что в зависимости от значения числа Рэлея реализуются различные пространственные структуры и тепловые потоки.

В настоящей работе на примере 2D слоя пористой и проницаемой среды, насыщенной однокомпонентной жидкостью, проводятся численные оценки условий возникновения свободной тепловой конвекции в зависимости от ориентации слоя. Последовательно рассматриваются горизонтальный, вертикальный и наклонный слои (угол наклона 45°). Внутри основного объёма находится область, проницаемость которой значительно выше, чем в окружающем массиве. Таким образом, окружающий массив принимается непроницаемым для жидкости. Пористость, теплопроводность, температуропроводность и другие параметры аномальной области и окружающего массива близки между собой.

Модель и уравнения

Обычно исследование конвективной устойчивости проводится для горизонтального слоя для изотермических горизонтальных границ и рассматриваются условия возникновения конвекции при подог-

реве снизу. Как только сочетания условий подогрева обеспечивают значения безразмерного числа Рэлея выше его критического значения, $Ra > Ra_{cr}$, в системе наряду с кондуктивным механизмом переноса тепла появляется новый механизм теплопередачи – конвективный тепло-массоперенос в пористой среде.

Система безразмерных уравнений свободной тепловой конвекции в пористой среде для несжимаемой жидкости в проницаемой области имеет вид (Гершуни, Жуховицкий, 1972):

$$\mathbf{u} = -\nabla p + Ra T \mathbf{1}_z \quad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla^2 T, \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (3)$$

где $Ra = \alpha g H^2 AK / \nu \kappa_{ef}$ – модифицированное число Рэлея для пористой среды; $\mathbf{u} = \eta \mathbf{v}$ – скорость Дарси фильтрации флюида в пористой среде; η – пористость среды; \mathbf{v} – скорость частиц флюида в порах; p – давление; T – температура; α – коэффициент теплового расширения флюида; g – ускорение свободного падения.

В качестве единиц принято: для единицы длины – толщина проницаемого слоя H с проницаемостью K_1 , для скорости фильтрации – κ_{ef} / H , времени – bH^2 / κ_{ef} , температуры – $A \cdot H$, давления – $\rho_0 \nu \kappa_{ef} / K$, где κ_{ef} – эффективный коэффициент теплопроводности среды, $b = (\rho c_p)_c / (\rho c_p)_f$ – отношение теплоёмкостей среды и флюида, A – градиент температуры, ν – кинематическая вязкость флюида.

Будем считать, что во вмещающей непроницаемой области течение отсутствует. Соответствующее уравнение для распространения тепла в этой области:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla^2 T. \quad (4)$$

Примем, что нижняя и верхняя границы вмещающей области являются изотермическими. На боковых границах принимаются условия отсутствия потока тепла

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0.$$

Для компонент скорости примем:

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial z}, \quad v = -\frac{\partial \psi}{\partial x},$$

где ψ – функция тока. На границах для ψ принято:

$$\frac{\partial \psi}{\partial z} = \psi = 0 \quad \text{на вертикальных границах,}$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial x} = \psi = 0 \quad \text{на горизонтальных границах.}$$

Применяя к уравнению (1) операцию rot и учитывая граничные условия, получаем систему уравнений свободной тепловой конвекции во внутренней области в переменных (ψ, T)

$$\nabla^2 \psi = -Ra \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (5.1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial z} = \nabla^2 T. \quad (5.2)$$

Для численного решения уравнений (4) и (5.2) применялась неявная разностная схема. Для решения уравнения (5.1) использовалась схема последовательной верхней релаксации. Пространственный шаг дискретизации составлял 1/30.

Результаты численного моделирования

Для бесконечного горизонтального слоя с изотермическими границами критическое число Рэлея составляет $Ra_{cr} = 4\pi^2$ (Horton, Rogers, 1945; Lapwood, 1948).

В работе (Дементьев, Любимов, 2008) рассматривается устойчивость горизонтального слоя, находящегося между двумя бесконечными полупространствами различной теплопроводности. Показано, что при уменьшении теплопроводностей граничных массивов устойчивость равновесия монотонно понижается, и для случая теплоизолированных границ Ra_{cr} составляет значение порядка 12.

Для горизонтально ориентированного слоя за единицу длины, как определено выше, принята толщина слоя H . При

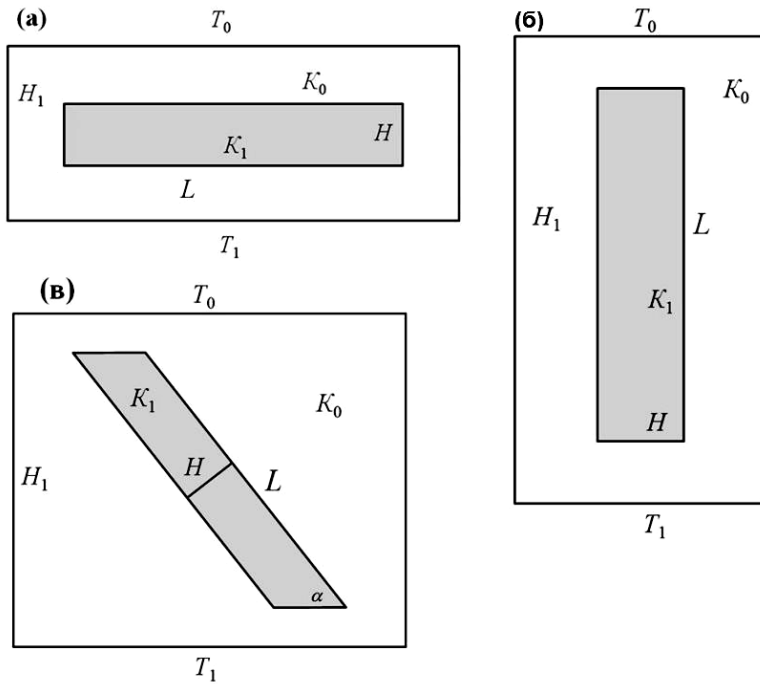


Рис. 1. Модели проницаемого слоя (проницаемость K_1), в котором реализуется свободная тепловая конвекция, помещённого в непроницаемый массив (проницаемость K_0), в зависимости от ориентации: (а) – горизонтальный; (б) – вертикальный; (в) – наклонный. H – толщина слоя, L – длина слоя

численных расчётах для безразмерных значений температуры на верхней границе принято $T_0=0$, на нижней – $T_1=H_1/H$, где H_1 – вертикальные размеры рассматриваемой области (рис. 1).

При численных расчётах для проницаемой области принято аспектное отношение $\lambda=L/H=10$, где L – длина слоя. Область, где реализуется конвекция, находится в средней части вмещающего массива. Поэтому мощности над и под рассматриваемой областью равны. Получено, что при $H_1/H=3$ критическое число Рэлея Ra_{cr} имеет значение порядка 28. При увеличении этого отношения устойчивость немного уменьшается (при $H_1/H=5$ критическое число $Ra_{cr} \approx 27$). Это согласуется с результатами работы (Дементьев, Любимов, 2008) о понижении устойчивости для горизонтального слоя пористой среды, ограниченного непроницаемыми массивами конечной теплопроводности. Эти результаты соответствуют и полученным для горизон-

тального слоя однородной жидкости (Гершуни, Жуховицкий, 1972). В проницаемом слое реализуется валиковая структура конвекции (рис. 2).

Для исследования вертикального слоя принята модель, подобная рассмотренной для горизонтального слоя. За единицу длины принята ширина слоя H . Для температуры на нижней горизонтальной границе вмещающего массива принято $T_1=H_1/H$ и ноль на верхней границе. Аспектное отношение так же, как и для горизонтального слоя принято $\lambda=L/H=10$ (см. рис. 1б).

Иная модель рассмотрена в работе (Бобров, Лопатников, 2001). В ней рассматривается вертикальный проницаемый слой, заключённый в непроницаемый куб. В этой модели за единицу длины приняты размеры куба, поэтому температура в области меняется от единицы на нижней границе до нуля на верхней.

Для вертикального слоя получено критическое число Рэлея Ra_{cr} порядка 10,5.

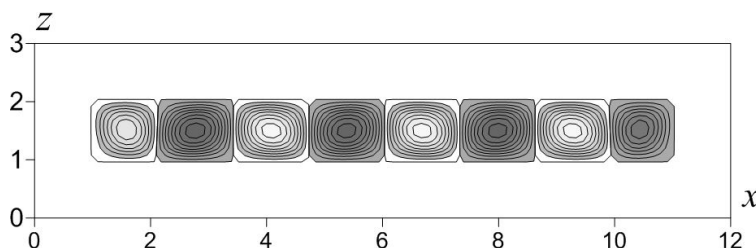


Рис. 2. Горизонтальный слой. Распределение функции тока ψ . По x и z безразмерные размеры области заданы в единицах толщины слоя H

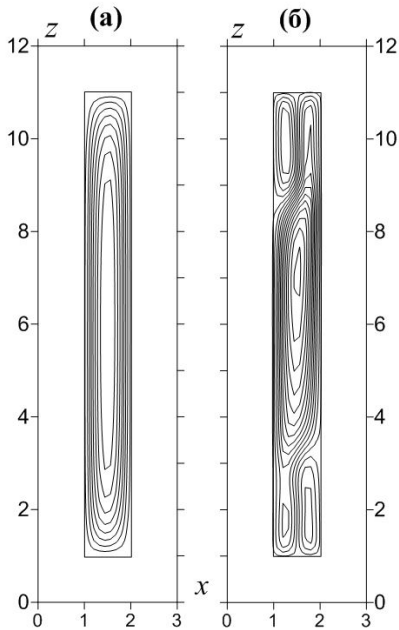


Рис. 3. Вертикальный слой. Распределение функции тока ψ : (а) – $Ra=11$; (б) – $Ra=50$

При этом при небольшой закритичности реализуется одноячейная структура конвекции (рис. 3а). Для конвекции с высокой закритичностью $Ra=50$ – структура более сложная (рис. 3б).

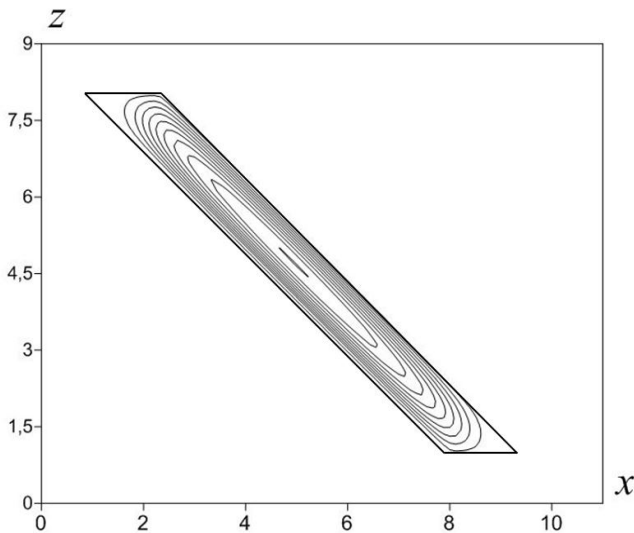


Рис. 4. Наклонный слой. Распределение функции тока ψ

Для наклонного слоя рассматривался случай с углом наклона $\alpha=45^\circ$.

Полученное в результате численного моделирования критическое число Рэлея

Ra_{cr} для этого случая составляет порядка 21. Это значение является промежуточным между случаями с горизонтальным и вертикальным расположением проницаемого слоя. При этом реализуется одноячейная структура конвекции (рис. 4).

Заключение

На примере численного моделирования проведено исследование свободной тепловой конвекции пористого слоя, помещённого в непроницаемый массив в зависимости от ориентации.

Полученные оценки подтверждают результаты (Дементьев, Любимов, 2008) о понижении устойчивости горизонтального слоя, окружённого массивами конечной теплопроводности. Для рассмотренного в данной работе случая наклона слоя на 45° отмечено снижение устойчивости. Ещё меньший порог устойчивости получен для вертикального слоя.

Таким образом, наряду с такими параметрами как градиент температуры и проницаемость заметную роль на устойчивость и развитие конвекции в трещиновато-пористых областях земной коры оказывает и пространственная ориентация слоя. Что является дополнительным фактором для развития и реализации гидротермальной конвекции.

Литература

Бобров А.М., Лопатников С.Л. Развитие гидротермальной конвекции в вертикальной проницаемой зоне, заключённой в трёхмерный непроницаемый теплопроводный массив // Физика Земли. 2001. № 3. С. 63–70.

Дементьев О. Н., Любимов Д. В. Возникновение конвекции в горизонтальном плоском слое пористой среды // Вестник Челябинского государственного университета. 2008. №. 6. С. 130–135.

Гершуни Г. З., Жуховицкий Е. М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости // М.: Недра, 1972. 392 с.

Лопатников С.Л. Тепловая конвекция и образование месторождений нефти. // ДАН. 1995. № 4. С. 541–543.

Любимова Е.А., Власов В.К., Оснач А.И.

Тепловые потоки из недр Земли в зависимости от внутренних параметров. Тепловые потоки из недр и верхней мантии. М.: Наука, 1973. С. 7–18.

Мальковский В.И., Пэк А.А. Условия развития тепловой конвекции однофазного флюида в вертикальном разломе // Петрология. 1997. Т. 7. № 4. С. 428–434.

Миндубаев М.Г. 3D модели свободной конвекции пористой среде и её влияние на оценки геотермического потока // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: Материалы 41-й сессии Международного семинара им. Д.Г. Успенского. Екатеринбург, 2014. 308 с.

Рамазанов М.М. Конвективная устойчивость жидкости в двух гидродинамически связанных вертикальных разломах // Физика Земли. 2003. № 12. С. 57–63.

Тараненко Е.И., Безбородов Р.С., Хакимов М.Ю. Тепловой эффект формирования залежей нефти и газа // Геология нефти и газа. 2000. № 2. С. 56–58.

Хачай Ю.В., Миндубаев М.Г. О влиянии свободной конвекции в 3D-структуре пористой среды на экспериментальные оценки геотермического потока // Мониторинг. Наука и технологии. 2012. № 4(13). С. 6–11.

Horton C.W., Rogers F.T., Convection currents in a porous medium // J. Appl. Phys. 1945. V. 16. P. 367.

Lapwood E. R. Convection of a fluid in a porous medium // Proc. Camb. Phil. Soc. 1948. V. 44. № 4. P. 508–521.