

УДК 532.516.013.4:532.546+536.24

**НЕСТАЦИОНАРНАЯ КОНВЕКЦИЯ РЭЛЕЯ–ДАРСИ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ
С ОКОЛОКРИТИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТЬЮ**

© 2011 г.

Е.Б. Соболева

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва

soboleva@ipmnet.ru

Поступила в редакцию 15.06.2011

Рассматривается пористая среда, заполненная жидкостью с параметрами вблизи термодинамической критической точки. Исследуются небуссиновские эффекты в развитии конвекции Рэлея–Дарси (горизонтальный пористый слой, нагреваемый снизу). Начальная температура настолько близка к критической, что профиль плотности жидкости нелинейный, а термодинамические коэффициенты меняются по пространству в несколько раз.

Ключевые слова: пористая среда, естественная конвекция, термодинамическая критическая точка, численное моделирование.

Выполняется численное моделирование динамики и теплопереноса в твердом неподвижном скелете, заполненном жидкостью, на основе уравнений движения и энергии пористой среды и уравнения состояния Ван-дер-Ваальса жидкой фазы. Фазы находятся в локальном тепловом равновесии, сопротивление скелета линейно зависит от скорости фильтрации, пористость и проницаемость постоянны. Базовая система уравнений приведена в [1–3].

При приближении к критической точке коэффициенты теплового расширения α_p и изотермической сжимаемости χ_T , теплоемкость при постоянном давлении c_p неограниченно возрастают, что определяется уравнением состояния. Используется уравнение Ван-дер-Ваальса

$$P = \frac{\rho T}{1 - 1/3\rho} - 9/8\rho^2,$$

которое дает качественно верные зависимости роста термодинамических величин.

Рассматривается горизонтальный пористый слой длиной 80 см и высотой 10 см; пористость $\phi = 0.4$. Твердая фаза – вещество типа песка, жидкая фаза – вещество CO_2 . В начальный момент температура T_i постоянна (рис. 1а, кривая 1), жидкость неподвижна и стратифицирована в поле силы тяжести (увеличивается книзу под действием собственного веса). В центральном сечении слоя плотность жидкости критическая: $\rho = \rho_c$. Индексами i и c отмечены начальные и критические условия. Считается, что T_i лишь на 14.785 мК выше критической температуры, что соответствует безразмер-

ному «расстоянию» до критической точки

$$\varepsilon_i = (T_i - T_c)/T_c = 4.86112 \cdot 10^{-5}.$$

При таком близком подходе к критической температуре сжимаемость χ_T столь велика, что профиль плотности ρ оказывается нелинейным даже в небольших лабораторных масштабах. Аналитическое решение для ρ в статических условиях при действии массовой силы в газе Ван-дер-Ваальса получено в [4]; оно представляет собой трансцендентное уравнение, из которого зависимость $\rho = \rho(x, y, z)$ (x, y, z – координаты) можно найти численно (рис. 1б, кривая 1). В центральной зоне, где условия наиболее близки к критическим, градиент плотности и значения коэффициента α_p максимальны (рис. 1б, в, кривые 1). На рис. 1 все переменные безразмерные; ρ_c – масштаб плотности, $1/T_c$ – масштаб коэффициента α_p .

Жидкая фаза на границах проскальзывает. Температура T_i верхней границы не меняется, боковые границы теплоизолированы; на нижней границе температура линейно увеличивается в течение времени $t_h = 34.4$ с и к концу нагрева возрастает на величину $\Theta = 3.46$ мК.

Интегрирование базовой системы уравнений выполнено численно конечно-разностным методом с использованием алгоритма типа SIMPLE на равномерной разнесенной сетке 401×51 и 641×81 . Числа Прандтля Pt и Рэлея–Дарси Rd^* (индекс s указывает на влияние стратификации) заметно меняются поперек слоя из-за переменных физических свойств, и у (i) нижней границы, (ii) в центре и у (iii) верхней границы имеют значения:

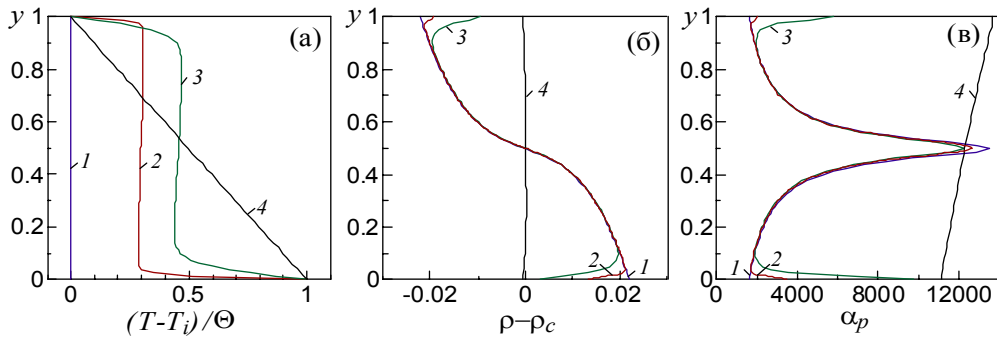


Рис. 1. Зависимости температуры, плотности и коэффициента теплового расширения в моменты времени: $t = 0$ (кривая 1); $t = 45.2$ с (кривая 2); $t = 452$ с (кривая 3); $t = 1.08 \cdot 10^6$ с (кривая 4)

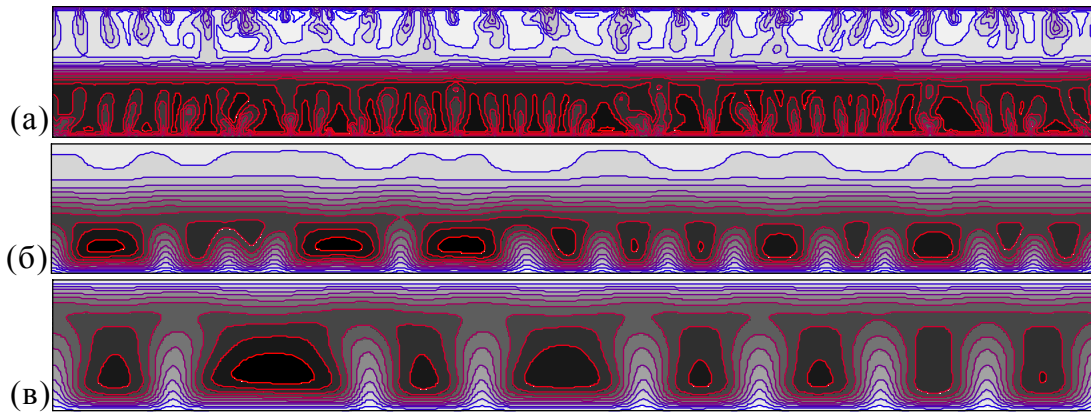


Рис. 2. Поле плотности в моменты времени: $t = 1.14 \cdot 10^4$ с (а); $t = 1.20 \cdot 10^5$ с (б); $t = 1.08 \cdot 10^6$ с (в)

(i) $Ra^s = 34.7$, $Pr = 36.6$; (ii) $Ra^s = 40.7$, $Pr = 39.6$; (iii) $Ra^s = 48.7$, $Pr = 43.2$. При подводе тепла к нижней границе на начальных этапах в жидкости происходит адиабатический нагрев, свойственный сильно сжимаемым средам и названный «поршневым» эффектом [5]; благодаря ему центральная зона быстро прогревается, а у нижней и верхней границ формируются температурные пограничные слои (рис. 1а, кривые 2, 3). Со временем пограничные слои теряют устойчивость и в них развивается конвективное движение: термики поднимаются вверх от нижней границы и опускаются вниз от верхней, но не пересекают центральную линию (рис. 2а). Такая картина напоминает поведение двухслойной системы, состоящей из двух жидких слоев разной плотности, причем конвекция развивается в каждом слое независимо друг от друга. Со временем движение в верхней части подавляется, а термики из нижней половины увеличиваются в размерах и проникают вверх (рис. 2б, в). При этом конвективное движение останавливается, не доходя до верхней границы из-за влияния стратификации плотности. Развитие конвекции способствует выравниванию полей термодина-

мических величин, со временем изменения этих величин поперек слоя становятся равномерными (рис. 1а–в, кривые 4).

В заключение следует заметить, что это первый результат численного моделирования конвекции в околокритической жидкой фазе настолько близко к критической точке, что стратификация плотности нелинейна, а физические свойства существенно меняются. Дальнейшие работы в этом направлении предполагают исследование объемных небуссиновских эффектов с использованием трехмерных численных кодов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант №09-01-00117.

Список литературы

1. Soboleva E. B. // Annals of the New York Academy of Sciences. 2009. V. 1161. P. 117–234.
2. Соболева Е.Б. // Изв. РАН. МЖГ. 2008. №2. С. 57–69.
3. Soboleva E.B. // Cornell University Library. 2010. E-Print Archive. ArXiv: 1001.4139v1: <http://arxiv.org/abs/1001.4139>.

4. Соболева Е.Б., Крюков И.А. Препринт №624. М., ИПМех РАН. 1998. 52 с.

5. Onuki A., Hao H., Ferrell R.A. // Phys. Rev. A. 1990. V. 41, No 4. P. 2256–2259.

**UNSTEADY RAYLEIGH-DARCY CONVECTION
IN A POROUS MEDIUM FILLED WITH A NEAR-CRITICAL FLUID**

Е.Б. Соболева

Porous media saturated with substances with the parameters near the thermodynamical critical point known as near- or supercritical fluids are considered. As they approach the critical point, the specific heat at constant pressure and the compressibility grow unboundedly, leading to significant peculiarities in hydrodynamic and thermal behavior. Numerical simulation of dynamics and heat transfer in a horizontal porous layer heated from below is carried out. A near-critical fluid is modeled as van der Waals gas. Initially, conditions are isothermal, a fluid phase is at rest and stratified in the gravity field, so that the density profile is non-linear. When heating starts, a fluid phase becomes moving. Non-Boussinesq effects in development of Rayleigh–Darcy convection are investigated..

Keywords: porous medium, natural convection, thermodynamical critical point, numerical simulation.