

УДК 532.5

ОСРЕДНЕННЫЕ ВИБРОКОНВЕКТИВНЫЕ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В ДВУХСЛОЙНЫХ СИСТЕМАХ РАЗНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ПРИ НУЛЕВОЙ ГРАВИТАЦИИ

© 2020 г. Е. А. Колчанова*

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

**E-mail: kolchanovaea@gmail.com*

Поступила в редакцию 01.03.2020 г.

После доработки 12.03.2020 г.

Принята к публикации 12.03.2020 г.

Исследуется осредненная валиковая конвекция, возникающая под действием вибрации в двухслойной жидкостной системе с однородной пористой зоной разной проницаемости. Система совершает высокочастотные осцилляции поперечно вертикальному градиенту температуры в невесомости. Моделирование конвективной задачи проводится на основе метода осреднения. Определяются диапазоны частот вибрации и проницаемостей пористой зоны, характерные для коротковолновых и длинноволновых валов. При нулевой гравитации обнаружена резкая смена вида валов с ростом проницаемости, типичная для свободной тепловой конвекции в слоистых системах в обычных земных условиях. Найдено минимальное значение числа Дарси, ниже которого резкий переход от коротковолновой к длинноволновой конвекции с ростом частоты вибрации не происходит.

Ключевые слова: двухслойная система, пористая зона, разная проницаемость, продольные вибрации, предельное число Дарси

DOI: 10.31857/S0568528120050096

Тепловая конвекция в слоистых жидкостных системах, содержащих пористую зону в гравитационном поле, может возникать двумя способами: 1 – в виде длинноволновых валов, проникающих во все слои, 2 – в виде коротковолновых валов, формирующихся, главным образом, внутри жидкостных слоев без пористой зоны [1, 2]. Такое различие в поведении жидкости проявляется при изменении отношения толщин слоев, проницаемости пористой зоны. Смена типа валов также возможна под действием вертикальной высокочастотной вибрации [3], вызывающей осредненное валиковое течение в слоях. Однако порог возбуждения этих валов оказывается несколько выше, чем его значение в отсутствие вибрации.

В невесомости гравитационной конвекции нет. Течение здесь можно создать с помощью осредненной вибрационной силы в случае, когда система совершает колебания поперечно градиенту температуры. Эта ситуация для однослойных жидкостной и пористой систем подробно изучена в работах [4, 5]. В настоящем исследовании уделяется внимание особенностям термо-вибрационной конвекции в двухслойной системе, включающей пористую зону при нулевой гравитации. Изучается смена типа валов с ростом частоты вибрации и проницаемости этой зоны.

ТЕОРИЯ

В работе исследуется возникновение осредненного виброконвективного течения в двухслойной жидкостной системе, содержащей пористую зону и участвующей в продольных высокочастотных осцилляциях в условиях нулевой гравитации. Поперек слоев создается градиент температуры таким образом, что подогрев системы осуществляется снизу (рис. 1). Период вибрации $2\pi/\omega$ считается малым по сравнению с характерными временами распространения гидродинамических и тепловых возмущений в слоях, а ее амплитуда a – малой по сравнению с толщиной слоев [4, 5]. Пористая среда однородна и имеет пористость m , связанную с проницаемостью K формулой Кармана–Козени.

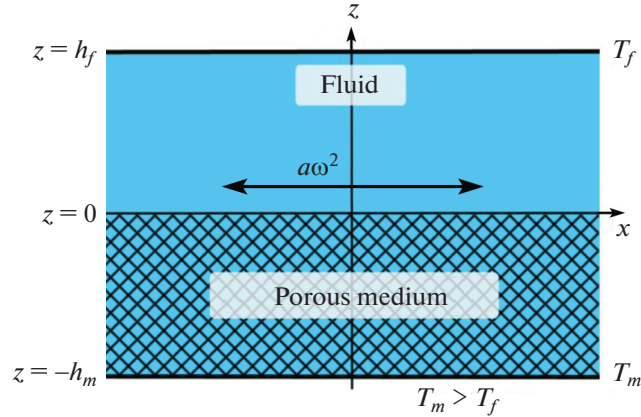


Рис. 1. Двухслойная система с пористой зоной осциллирует в поперечном градиенте температуры направлении в невесомости.

Уравнения осредненной термовибрационной конвекции несжимаемой жидкости приводятся в неинерциальной системе отсчета и получаются на основе метода осреднения. Этот метод был впервые применен для однослойных жидкостной и пористой систем в работах [4, 5]. Выпишем аналогичные уравнения для двухслойной системы “жидкость–пористая зона” с учетом безразмерных параметров в жидкостном слое

$$\frac{Da}{Pr_m} \left\{ \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + b(\mathbf{v}\nabla)\mathbf{v} \right\} = -\nabla p_f + Da\Delta\mathbf{v} + R_v(\mathbf{V}\nabla)(T\mathbf{n} - \mathbf{V}) \quad (1)$$

$$\frac{\kappa}{b} \frac{\partial T}{\partial t} + \kappa(\mathbf{v}\nabla)T = \Delta T, \quad \text{div } \mathbf{v} = 0 \quad (2)$$

$$\text{rot } \mathbf{V} = \nabla T \times \mathbf{n}, \quad \text{div } \mathbf{V} = 0 \quad (3)$$

в пористом слое

$$\frac{Da}{Pr_m} \left(\frac{1}{m} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \frac{1}{m^2} (\mathbf{u}\nabla)\mathbf{u} \right) = -\nabla p_m - \mathbf{u} + R_v(\mathbf{W}\nabla) \left(\vartheta \mathbf{n} - \frac{b}{m\delta} \mathbf{W} \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} + (\mathbf{u}\nabla)\vartheta = \Delta \vartheta, \quad \text{div } \mathbf{u} = 0 \quad (5)$$

$$\text{rot } \mathbf{W} = \nabla(\delta\vartheta) \times \mathbf{n}, \quad \text{div } \mathbf{W} = 0 \quad (6)$$

где введены переменные величины для осредненного течения в слое жидкости: \mathbf{v} – скорость жидкости, p_f – конвективная добавка к давлению, T – отклонение температуры от некоторого среднего значения, \mathbf{V} – соленоидальная часть вектора $T\mathbf{n}$, определяющая амплитуду пульсационной скорости жидкости. Аналогичным образом вводятся переменные величины в пористом слое \mathbf{u} , p_m , ϑ и \mathbf{W} , соответственно, только в уравнении движения (4) используется скорость фильтрации жидкости \mathbf{u} . Вектор $\mathbf{n} = (1, 0, 0)$ направлен по горизонтальной оси x , параллельной оси вибрации. Разницу в тепловых свойствах сред описывают такие параметры, как отношение теплопроводностей насыщенной пористой среды и жидкости κ и отношение теплоемкостей среды и жидкости b .

Верхняя и нижняя границы двухслойной системы являются твердыми и идеально теплопроводными. Граница раздела плоская и проницаемая для жидкости.

$$z = d: \quad \mathbf{v} = 0, \quad T = T_f \quad (7)$$

$$z = 0: \quad T = \vartheta, \quad \frac{\partial T}{\partial z} = \kappa \frac{\partial \vartheta}{\partial z}, \quad \mathbf{v}_z = \mathbf{u}_z, \quad \mathbf{v}_x = 0, \quad (8)$$

$$p_f + R_v \left\{ \mathbf{V}_z^2 - \frac{b}{m\delta} \mathbf{W}_z^2 \right\} = p_m, \quad \mathbf{V}_z = \mathbf{W}_z, \quad \delta \mathbf{V}_x = \mathbf{W}_x \quad (9)$$

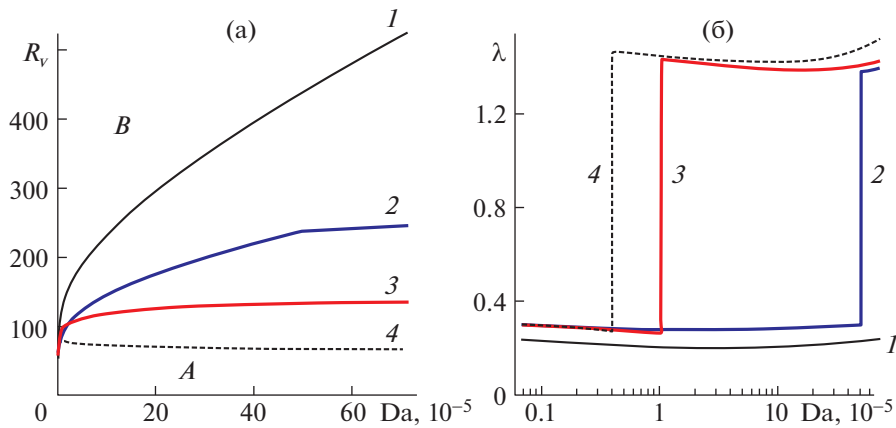


Рис. 2. Зависимости порогового числа Рэлея–Дарси (а) и длины волны (б) осредненных конвективных валов, формирующихся сразу после потери устойчивости основного пульсационного течения, от числа Дарси при разных частотах вибрации: $\Omega = 0.1, 0.5, 0.8, 10$ (1–4). Область А относится к основному пульсационному течению с нулевой средней скоростью, область В характеризует осредненное конвективное течение.

Безразмерные параметры в системе уравнений (1)–(6) и граничных условиях (7)–(9) – вибрационное число Рэлея–Дарси $R_v = (\beta_T a \omega \Delta T)^2 K / 2\nu_f \chi_{eff}$, число Прандтля $Pr_m = b\nu_f / \chi_{eff}$, число Дарси $Da = K/h_m^2$, отношение толщин жидкостного и пористого слоев $d = h_f/h_m$. В уравнениях и граничных условиях также содержится дополнительный параметр $\delta = \Omega^2 / [mb(1 + \Omega^2/m^2)]$, где Ω – безразмерная частота вибрации. Он определяет разницу в амплитудах касательных скоростей пульсаций жидкости в слоях и вблизи их границы раздела (см. формулу (8)).

Численное решение системы уравнений (1–6) с граничными условиями (7)–(9) получено на основе метода стрельбы. Выбраны параметры слоев, характерные для системы “вода–стеклянные сферы”. Находились пороговое число Рэлея–Дарси и длина волны осредненных конвективных валов, формирующихся непосредственно после потери устойчивости основного пульсационного течения. Основное течение представляло собой осциллирующее замкнутое плоскопараллельное течение с нулевой средней скоростью при вертикальном градиенте температуры. При превышении порогового числа Рэлея–Дарси на фоне высокочастотных пульсаций появлялись осредненные валы.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

На рис. 2а и рис. 2б показаны графики зависимости порогового числа Рэлея–Дарси и длины волны осредненных конвективных валов от числа Дарси при разных фиксированных значениях безразмерной частоты вибрации и отношении толщин слоев $d = 0.15$. При параметрах системы из области А на рис. 2а жидкость в среднем остается неподвижной на фоне быстро осциллирующего течения. При параметрах из области В на рис. 2а в слоях генерируется осредненное валиковое течение. Длина волны валов растет с ростом числа Дарси (рис. 2б). Последнее задает характер фильтрации жидкости в порах и по определению является безразмерной проницаемостью пористого слоя. Поэтому рост этого параметра сопровождается переходом от коротковолновых валов, локализуемых в слое жидкости над порами, к длинноволновым валам, проникающим в пористую среду (рис. 2б). Этот переход происходит резко, скачком, что является характерной особенностью свободной тепловой конвекции в слоистых системах, включающих несколько чередующихся слоев жидкости и пористой среды в гравитационном поле (синяя и красная сплошные линии и черная штриховая линия на рис. 2б) [1, 2]. Описанная особенность впервые выявлена автором в двухслойной системе, осциллирующей при нулевой гравитации.

На рис. 3 показана граница скачкообразного перехода от осредненных коротковолновых валов к длинноволновым валам. Этот переход наблюдается при увеличении частоты вибрации и проницаемости среды. Из рис. 3 видно, что имеется минимальное асимптотическое значение числа Дарси $Da_* \approx 4 \cdot 10^{-6}$, ниже которого переход от коротковолновой к длинноволновой конвекции вообще не происходит.

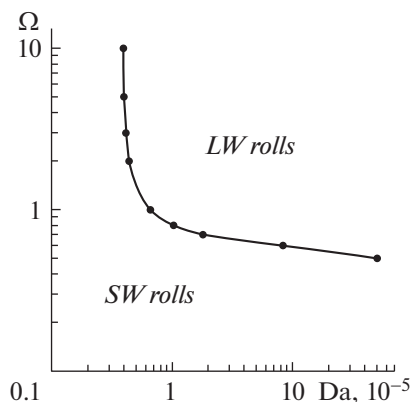


Рис. 3. Зависимость частоты вибрации от числа Дарси, определяющая границу между длинноволновыми (область *LW rolls*) и коротковолновыми осредненными валами (область *SW rolls*), образующимися сразу после потери устойчивости основного пульсационного течения.

Отметим, что в сравнении со свободной конвекцией в земных условиях порог возбуждения осредненного виброконвективного течения в невесомости может не только понижаться с ростом проницаемости, но и повышаться в зависимости от выбора частоты вибрации. При безразмерных частотах, больших 0.8, рост проницаемости обычным образом усиливает конвекцию. В противоположном случае возможно подавление конвекции с ростом числа Дарси (рис. 2а). Такое различие, на наш взгляд, связано со сложной зависимостью параметра δ , характеризующего разницу амплитуд касательных скоростей пульсаций на границе раздела слоев системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена задача о возбуждении осредненной термовибрационной конвекции при нулевой гравитации. Конвективные течения возникали на фоне высокочастотных осцилляций жидкости в двухслойной системе с пористой зоной различной проницаемости. Определены диапазоны частот продольной вибрации и проницаемостей пористой зоны, при которых происходит резкий переход от коротковолновых к длинноволновым конвективным валам. Найдено минимальное асимптотическое значение числа Дарси и показано, что ниже этого значения резкое изменение длины волны валов с ростом частоты осцилляций не наблюдается.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-71-00067).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hirata S.C., Goyeau B., Gobin D. Stability of thermosolutal natural convection in superposed fluid and porous layers // *Transport in Porous Media*. 2009. V. 78. P. 525–536.
2. Kolchanova E.A., Lyubimov D.V., Lyubimova T.P. The onset and nonlinear regimes of convection in a two-layer system of fluid and porous medium saturated by the fluid // *Transport in Porous Media*. 2013. V. 97. № 1. P. 25–42.
3. Любимов Д.В., Любимова Т.П., Муратов И.Д., Шишкина Е.А. Влияние вибраций на возникновение конвекции в системе горизонтального слоя чистой жидкости и слоя пористой среды, насыщенной жидкостью // *Изв. РАН. МЖГ*. 2008. № 5. С. 132–143.
4. Gershuni G.Z., Lyubimov D.V. *Thermal Vibrational Convection*. Wiley: N.Y. et al., 1998. 358 p.
5. Зеньковская С.М., Роговенко Т.Н. Фильтрационная конвекция в высокочастотном вибрационном поле // *Прикладная механика и техническая физика*. 1999. № 3. С. 22–29.