

УДК 532.5
PACS 47.15.Cb, 47.56.+r, 47.55.P-

Возбуждение конвекции в слоях жидкости и насыщенной пористой среды в модулированном поле силы тяжести

Е. А. Колчанова^{a,b,c}

^a Институт механики сплошных сред УрО РАН
614013, Пермь, ул. Акад. Королёва, 1

^b Пермский государственный национальный исследовательский университет
614990, Пермь, ул. Букирева, 15

^c Пермский национальный исследовательский политехнический университет
614990, Пермь, Комсомольский пр., 29
email: ekaterina_shishk@mail.ru

Изучается влияние периодической модуляции ускорения силы тяжести на возникновение конвекции в подогреваемой снизу двухслойной системе горизонтальных слоев чистой жидкости и однородной пористой среды, насыщенной той же жидкостью. Линейная задача устойчивости механического равновесия жидкости в слоях решается численно с применением метода Галеркина и метода построения фундаментальной системы решений. Задается прямоугольная модуляция ускорения силы тяжести. Определены границы резонансных областей неустойчивости равновесия по отношению к возмущениям синхронного и субгармонического откликов системы на периодическое вибрационное воздействие при изменении амплитуды и частоты модуляции для различных длин волн критических возмущений. Найдена граница основной полосы неустойчивости по отношению к синхронным возмущениям. Показано, что амплитуда модуляции, соответствующая порогу возбуждения конвекции, сильно зависит от длины волны возмущений. Возмущения с меньшей длиной волны (коротковолновые возмущения), локализованные в слое жидкости, оказываются более подверженными влиянию модуляции поля тяжести, чем возмущения с большей длиной волны (длинноволновые возмущения), проникающие в пористый слой. Появление узких резонансных областей устойчивости с ростом интенсивности нагрева для коротковолновых возмущений происходит значительно раньше, чем для длинноволновых возмущений.

Ключевые слова: двухслойная система; пористая среда; модуляция поля тяжести; вибрации

Поступила в редакцию 22.10.2016; принята к опубликованию 03.11.2016

Convection excitation in layers of fluid and fluid-saturated porous medium in a modulated gravity field

E. A. Kolchanova^{a,b,c}

^a Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS
Acad. Koroleva St. 1, 614013, Perm

^b Perm State University
614990, Perm, Bukirev st., 15

^c Perm National Research Polytechnic University
614990, Perm, Komsomolsky prospekt, 29
email: ekaterina_shishk@mail.ru

The effect of periodic modulation of gravitational acceleration on convection excitation in a two-layer system that is heated from below and consists of a horizontal pure fluid layer and a homogeneous porous medium saturated with the same fluid is investigated. The linear stability problem for mechanical equilibrium of fluid in the layers is solved numerically by the Galerkin method and the shooting method. A rectangular modulation of gravitational acceleration is established. Boundaries for resonance regions of equilibrium instability with respect to perturbations of synchronous and subharmonic responses of the system to periodic vibrational actions are defined as modulation amplitude and frequency change for various critical perturbation wavelengths. A boundary of the main instability region with respect to synchronous perturbations is found. It is shown that the modulation amplitude corresponding to the threshold of convection excitation strongly depends on perturbation wavelength. Perturbations of shorter wavelength (short-wave perturbations) localized in the fluid layer are more susceptible to the gravity modulation effect than perturbations of larger wavelength (long-wave perturbations) penetrating the porous layer. The occurrence of narrow resonance stability regions as heat intensity increases for short-wave perturbations is much earlier than for long-wave perturbations.

Keywords: two-layer system; porous medium; gravity modulation; vibration

Received 22.10.2016; accepted 03.11.2016

doi: 10.17072/1994-3598-2016-3-22-31

1. Введение

Возникновение конвекции в слоях жидкости и насыщенной пористой среды связано с неоднородностями плотности жидкости, определяемыми неоднородностью нагрева. Изменение одного из параметров системы (градиента температуры, ускорения силы тяжести и др.) может повлиять на неоднородности плотности жидкости, а значит и на устойчивость ее механического равновесия. Одним из способов параметрического воздействия на равновесие в системе является вибрационное воздействие, эквивалентное модуляции ускорения силы тяжести. Обзор основных результатов исследований возникновения конвекции в слое однокомпонентной жидкости, находящегося в модулированном поле силы тяжести, приведен в [1, 2]. Влияние модуляции поля тяжести на возбуждение конвективного движения в слое пористой среды, насыщенной жидкостью, изучалось в [3–5]. Показано, что при наличии вибрации конечной частоты и амплитуды конвекция в слоях может возникать резонансным образом в некотором интервале частот. Определены границы устойчивости механического равновесия по отношению к возмущениям синхронного отклика на внешнее периодическое воздействие с периодом, равным периоду модуляции, и возмещениям субгармонического отклика, период которых в два раза больше периода модуляции. Найдены границы основной полосы неустойчивости равновесия по отношению к синхронным возмущениям, соответствующей значениям параметров задачи, при которых в статическом поле тяжести возбуждается релеевская тепловая конвекция. Получены узкие резонансные области устойчивости, появляющиеся с ростом интенсивности нагрева. Проведена аналогия между конвективной системой, подвергающейся пара-

метрическому воздействию, и маятником, точка подвеса которого совершает вертикальные колебания [1, 5].

В предельном случае вибраций высокой частоты и малой амплитуды, когда период вибраций много меньше характерных времен распространения тепловых и гидродинамических возмущений в слоях, неустойчивость определяется развитием возмущений синхронного отклика системы на внешнее периодическое воздействие. При этом влияние вертикальных вибраций приводит к стабилизации механического равновесия в слоях чистой жидкости [1, 2] и насыщенной пористой среды [6–8]. Стабилизирующее действие вертикальных поперечных вибраций также проявляется и при возникновении конвекции в слое бинарной жидкости при наличии эффекта *Core* [9]. Дестабилизирующий эффект возможен при наличии резонансных областей неустойчивости, когда вибрации имеют конечную частоту [10]. В неоднородно нагретой бинарной жидкости в статическом поле тяжести конвективное движение может возбуждаться колебательным образом. Наличие собственных колебаний в жидкости приводит в модулированном поле тяжести при определенных соотношениях частоты и амплитуды модуляции к развитию квазипериодических возмущений [10].

Особенностью задачи устойчивости механического равновесия в подогреваемых снизу системах слоев однокомпонентной жидкости и насыщенной пористой среды в статическом поле тяжести является наличие двух сред, движение жидкости в которых происходит по-разному. Скелет пористой среды препятствует движению жидкости в ней, что приводит к появлению двух минимумов нейтральной кривой устойчивости равновесия в системе слоев [11–15]. В определенном диапазоне значений параметров задачи наиболее опасными могут

стать возмущения с меньшей длиной волны (коротковолновые возмущения), ограниченные в пределах жидкого слоя, или возмущения с большей длиной волны (длинноволновые возмущения), охватывающие пористый и жидкий слои. Одним из способов влияния на конкуренцию этих двух типов возмущений является параметрическое воздействие.

В [16–19] изучалось влияние вертикальных высокочастотных вибраций на возбуждение конвективного движения в двухслойной системе однородная жидкость – пористая среда, насыщенная жидкостью. Показано, что ввиду различной роли инерционных эффектов в жидком и пористом слоях стабилизирующее действие вибраций более ярко выражено для коротковолновых возмущений равновесия по сравнению с длинноволновыми возмущениями, влияние вибраций на которые оказывается значительно слабее.

Действие переменного градиента температуры на устойчивость квазиравновесного состояния в двухслойной системе слоев однородной жидкости и насыщенной пористой среды в статическом поле тяжести исследовалось в [20, 21]. Определены резонансные области параметрической неустойчивости и основная полоса неустойчивости при изменении амплитуды и частоты модуляции и длины волны критических возмущений. Найдено, что коротковолновые возмущения равновесия оказываются наиболее чувствительными к периодической модуляции градиента температуры по сравнению с длинноволновыми возмущениями.

В настоящей работе изучается влияние периодической модуляции ускорения силы тяжести на возбуждение конвективного движения в двухслойной системе горизонтальных слоев однородной жидкости и пористой среды, насыщенной жидкостью, при наличии постоянного вертикального градиента температуры. Исследована устойчивость механического равновесия в системе для случая конечной частоты и амплитуды модуляции.

2. Уравнения и граничные условия

Рассмотрим подогреваемую снизу двухслойную систему, состоящую из горизонтального слоя чистой жидкости и слоя однородной пористой среды, насыщенной той же жидкостью, в поле силы тяжести (рис. 1). Система сверху и снизу ограничена твердыми непроницаемыми стенками и подвергается вертикальным вибрациям конечной частоты ω и амплитуды a .

Задача допускает равновесное решение, при котором отсутствует движение жидкости в слоях (жидкость колеблется вместе с полостью), а градиент температуры постоянен и вертикален в жидком слое $\nabla T_0 = -A_f \gamma$ и в пористом слое $\nabla \vartheta_0 = -A_m \gamma$, где γ – орт вертикальной оси [1–4, 22].

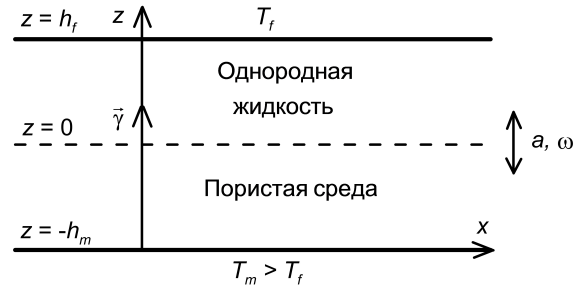


Рис. 1. Конфигурация двухслойной системы

Исследуем устойчивость механического равновесия жидкости и определим условия возникновения конвективного движения в описанной двухслойной системе. Конвекция в слоях жидкости и насыщенной пористой среды описывается в приближении Буссинеска [1]. Фильтрация жидкости в пористой среде изучается в рамках модели Дарси [22]. Считается, что пористая среда колеблется вместе с полостью, в которой находится двухслойная система. Уравнения движения, теплопроводности и непрерывности жидкости записываются в системе отсчета, связанной с полостью. В этом случае к статическому ускорению силы тяжести добавляется переменное вибрационное ускорение: $\mathbf{g} \rightarrow \mathbf{g}(1 + \eta F(t))$, где функция $F(t)$ задает периодический закон модуляции ускорения силы тяжести, а $\eta = a\omega^2/g$ – относительная амплитуда модуляции [1–4]. Уравнения конвекции для малых возмущений равновесия в жидком слое имеют вид

$$\frac{\varepsilon}{Pr_m} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = -\nabla p_f + \varepsilon \Delta \mathbf{v} + R_m (1 + \eta F(t)) T \gamma, \quad (2.1)$$

$$\frac{\kappa}{b} \frac{\partial T}{\partial t} - \kappa^2 (\mathbf{v} \cdot \gamma) = \Delta T, \quad \text{div } \mathbf{v} = 0, \quad (2.2)$$

в пористом слое

$$\frac{\varepsilon}{m Pr_m} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -\nabla p_m - \mathbf{u} + R_m (1 + \eta F(t)) \vartheta \gamma, \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} - (\mathbf{u} \cdot \gamma) = \Delta \vartheta, \quad \text{div } \mathbf{u} = 0. \quad (2.4)$$

На верхней и нижней твердых, изотермических границах выполняются соответственно условия прилипания и непроницаемости для возмущений скорости в жидком и пористом слоях и обращаются в нуль возмущения температуры:

$$\begin{aligned} z = d: \quad \mathbf{v} &= 0, \quad T = 0, \\ z = -1: \quad \mathbf{u} \cdot \gamma &= 0, \quad \vartheta = 0. \end{aligned} \quad (2.5)$$

На границе раздела слоев задаются условия непрерывности температуры, теплового потока, баланса нормальных напряжений, непрерывности вертикальных компонент скорости, а также условия равенства нулю горизонтальной компоненты скорости жидкости:

$$z = 0: T = \vartheta, \quad \frac{\partial T}{\partial z} = \kappa \frac{\partial \vartheta}{\partial z}, \quad (2.6)$$

$$p_f = p_m, \quad \mathbf{v}_z = \mathbf{u}_z, \quad \mathbf{v}_x = 0.$$

Поясним последнее условие $\mathbf{v}_x = 0$, которое было предложено в работе [11]. Считаем, что за счет малой проницаемости пористого слоя, такой, что средний размер пор оказывается много меньше толщины слоя: $\sqrt{K} \ll h_m$ [22], скорость фильтрации жидкости в пористом слое мала по сравнению со скоростью жидкости в жидком слое. Физически это означает, что при движении в пористой среде жидкость испытывает сопротивление пористого скелета. Таким образом, можно предположить, что горизонтальная компонента скорости жидкости при переходе через границу раздела жидкого и пористого слоев меняется скачком и равна нулю на границе раздела сред.

Система уравнений (2.1)–(2.4) и граничных условий (2.5)–(2.6) записана в безразмерной форме с учетом масштабов длины h_m , времени bh_m^2/χ_{eff} , температуры $A_m h_m$, скорости χ_{eff}/h_m и давления $\rho_f v_f \chi_{eff} / K$. Безразмерными параметрами задачи являются числа Релея $R_m = g\beta_T K h_m^2 A_m / (v_f \chi_{eff})$ и Прандтля $Pr_m = v_f / \chi_m$, число Дарси $\varepsilon = K / h_m^2$, отношение толщин жидкого и пористого слоев $d = h_f / h_m$, отношение теплоемкостей $b = (\rho C)_m / (\rho C)_f$ и теплопроводностей $\kappa = \kappa_m / \kappa_f$ насыщенной пористой среды и жидкости.

Здесь введены следующие обозначения: \mathbf{v} , \mathbf{u} – скорость жидкости в жидком слое и скорость фильтрации жидкости в пористом слое, p_f , p_m – давления в жидком и пористом слоях без учета гидростатической добавки, T , ϑ – отклонения температуры в каждом из слоев от их средних значений, ρ_f , v_f – плотность и кинематическая вязкость жидкости, β_T – тепловой коэффициент объемного расширения жидкости, m , K – пористость и проницаемость среды, χ_f , χ_m – температуропроводности в жидком и пористом слоях; $\chi_{eff} = b\chi_m$ – эффективная температуропроводность насыщенной жидкостью пористой среды.

Рассмотрим случай прямоугольной модуляции ускорения силы тяжести:

$$F(\tau) = \begin{cases} 1, & 0 < \tau \leq T/2 \\ -1, & T/2 \leq \tau < T \end{cases}$$

где $T = 2\pi/\Omega$ – период модуляции, а $\Omega = \omega K/v_f$ – безразмерная частота модуляции. Поскольку задача содержит малый параметр ε при производной по времени в уравнениях (2.1) и (2.3), для упрощения расчетов было проведено следующее преобразование: $t = \tau\varepsilon / Pr_m$.

Считая, что свойства жидкости не зависят от координат, исследуем периодические по x возмущения с волновым числом k , рассматриваемые в задачах, подобных задаче Релея-Бенара [1, 22]:

$$(\mathbf{v}, T, p_f, \mathbf{u}, \vartheta, p_m) = (\hat{\mathbf{v}}, \hat{T}, \hat{p}_f, \hat{\mathbf{u}}, \hat{\vartheta}, \hat{p}_m) e^{ikx}. \quad (2.7)$$

Полученная система уравнений (2.1)–(2.4) и граничных условий (2.5)–(2.6) с учетом (2.7) решалась численно.

3. Численный метод

Для решения задачи применялся метод Галеркина. Согласно этому методу все поля температуры, скорости и давления представлялись в виде произведения их временных и пространственных частей в каждом из слоев в виде: $\hat{G}(z, t) = \tilde{G}(z) \cdot G(t)$. В качестве базисных функций $\tilde{G}(z)$ применялись собственные функции, найденные численно с помощью метода построения фундаментальной системы решений в задаче без модуляции при $\eta = 0$ [23]. Из условий ортогональности невязки к каждой из функций $\tilde{G}(z)$ получались уравнения, содержащие величины, зависящие только от времени. Определялась граница устойчивости равновесия, соответствующая нейтральному периодическому решению, при котором возмущения равновесия не нарастают и не затухают. Расчеты проводились для однородной жидкости, поэтому изучались только возмущения синхронного (с периодом, равным периоду модуляции) и субгармонического (с периодом, вдвое большим периода модуляции) откликов системы на внешнее периодическое воздействие. Возмущения квазипериодического отклика возможны в случае бинарной жидкости, равновесие которой в отсутствие модуляции может теряться колебательным образом [10, 24].

В качестве двухслойной системы была выбрана система, состоящая из слоя воды и слоя пористой среды, насыщенной водой и представляющей собой систему упакованных стеклянных шаров. Пористая среда считалась однородной. Ее теплоемкость и теплопроводность определялись как среднее арифметическое коэффициентов, соответствующих каждой из фаз, составляющих среду (воде f и стеклу s) [22, 25]:

$$(\rho C)_m = m(\rho C)_f + (1-m)(\rho C)_s, \quad (3.1)$$

$$\kappa_m = m\kappa_f + (1-m)\kappa_s. \quad (3.2)$$

Средняя пористость m системы шаров задавалась равной 0.4 [22, 26–28]. Проницаемость оценивалась по формуле Кармана–Козени:

$$K = \frac{D^2 m^3}{180(1-m)^2},$$

где D – диаметр шаров [29, 30]. Отношение толщины пористого слоя h_m к диаметру шаров D равно 10. Безразмерные параметры для описанной двухслойной системы принимают следующие значения [25, 31]: $\kappa = 1.5$, $b = 0.7$, $Pr_m = 3.2$, $\varepsilon = 10^{-5}$.

4. Результаты

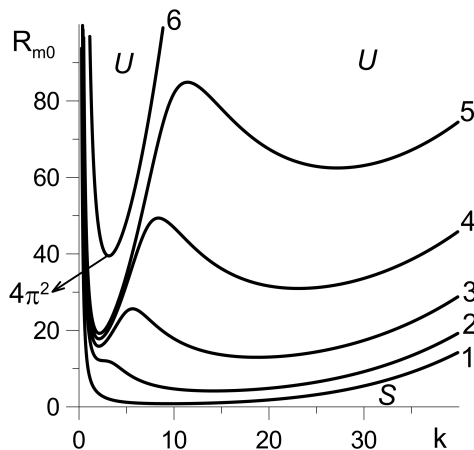


Рис. 2. Нейтральные кривые устойчивости равновесия в отсутствие модуляции при различных значениях отношения толщин слоев d : 1 – 0.30; 2 – 0.20; 3 – 0.15; 4 – 0.12; 5 – 0.10; 6 – 0. U – область неустойчивости, S – область устойчивости

В неоднородно нагретых системах слоев чистой жидкости и насыщенной пористой среды в статическом поле тяжести механическое равновесие теряется монотонным образом. При этом нейтральные кривые устойчивости имеют бимодальный характер (рис. 2) [11–15]. При изменении параметров системы (например, отношения толщин слоев) наиболее опасными могут стать возмущения с большим волновым числом (коротковолновые возмущения), локализованные, главным образом, в жидком слое (рис. 3, а), и возмущения с меньшим волновым числом (длинноволновые возмущения), проникающие в пористый слой (рис. 3, б). Коротковолновые возмущения реализуются в случае толстых жидких слоев (кривые 1–2, рис.2). Длинноволновые возмущения возникают при уменьшении относительной толщины жидкого

слоя (кривые 4–6, рис. 2). Для промежуточных значений отношения толщин слоев возможна конкуренция этих двух видов возмущений (кривая 3, рис. 2). В предельном случае нулевой толщины жидкого слоя ($d = 0$) получаем известные значения критических параметров, определенных аналитически для насыщенного жидкостью пористого слоя: $k_{\min} = \pi$, $R_{m \min} = 4\pi^2$ [22].

Исследуем влияние периодической модуляции ускорения силы тяжести на конкуренцию коротковолновых и длинноволновых возмущений при $d = 0.15$. На рис. 4 изображены карты устойчивости механического равновесия жидкости в слоях для данных двух типов возмущений при изменении приведенного числа Рейля R , зависящие от абсолютной амплитуды модуляции r и обратной частоты модуляции $1/\Omega$. Приведенное число Рейля представляет собой отношение числа Рейля при наличии модуляции R_m к статическому пороговому значению числа Рейля R_{m0} , полученного для критических возмущений в отсутствие модуляции: $R = R_m / R_{m0}$. Абсолютная амплитуда модуляции определяется соотношением: $r = \eta R$. При $0 < R < 1$, когда в статическом поле тяжести ($\eta = 0$) равновесие в двухслойной системе устойчиво, при наличии модуляции ($\eta \neq 0$) для рассмотренных значений волновых чисел наблюдаются резонансные области параметрической неустойчивости равновесия по отношению к возмущениям синхронного отклика системы на периодическое вибрационное воздействие с периодом, равным периоду модуляции (U_1 -области), и субгармонического отклика с периодом, вдвое большим периода модуляции (U_2 -области). Конвекция возбуждается резонансным образом и при $R = 0$ (рис. 4, а). Случай $R = 0$ относится к нулевому значению ускорения силы тяжести и определяет поведение системы в невесомости, когда имеется только вибрационное ускорение $a\omega^2$ и абсолютная амплитуда модуляции равна: $r = r_v / R_{m0}$, где $r_v = a\omega^2 \beta_T K h_m^2 A_m / (v_f \chi_{eff})$ [1].

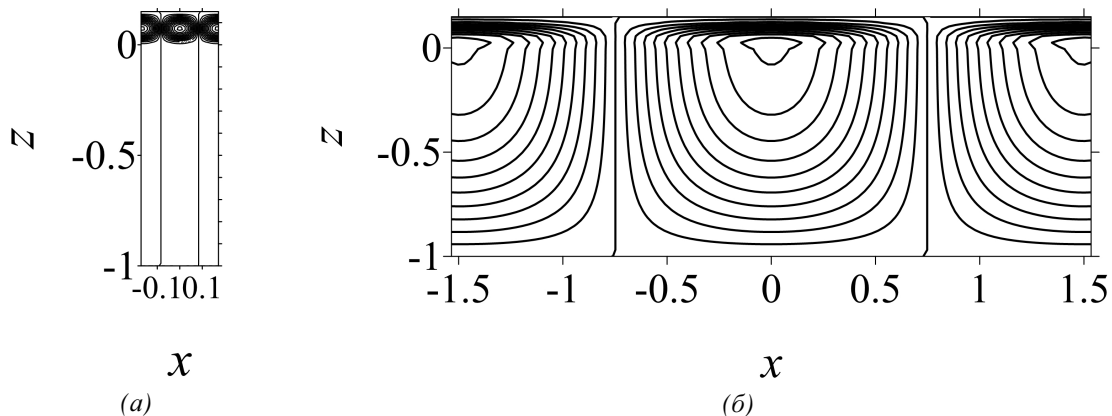
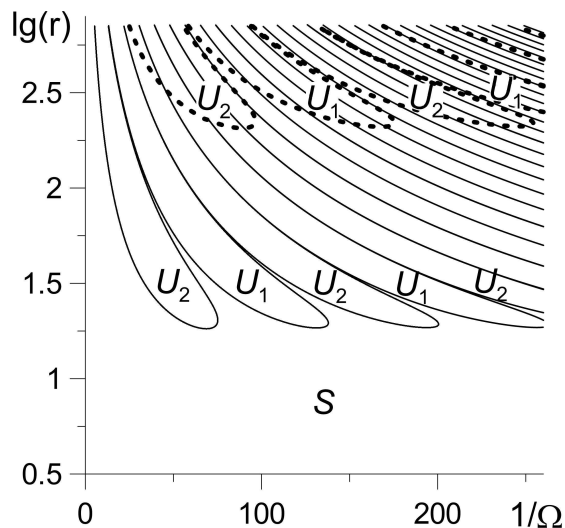
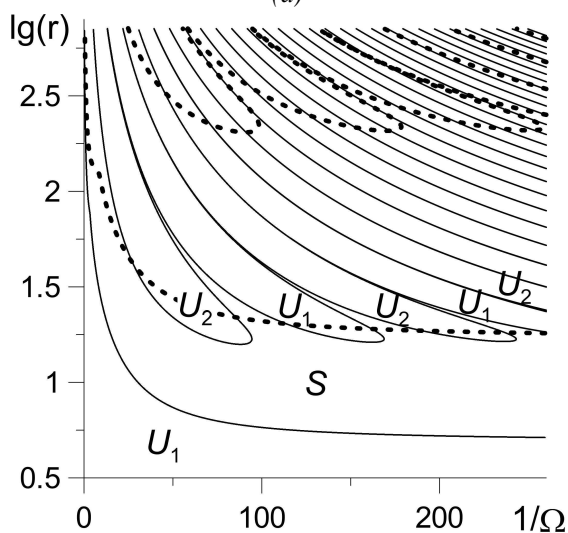


Рис. 3. Изолинии нормальной компоненты скорости в слоях жидкости и пористой среды в отсутствие модуляции при $d = 0.15$ для критических нейтральных возмущений с разным волновым числом k : а – 18.73; б – 2.10



(a)

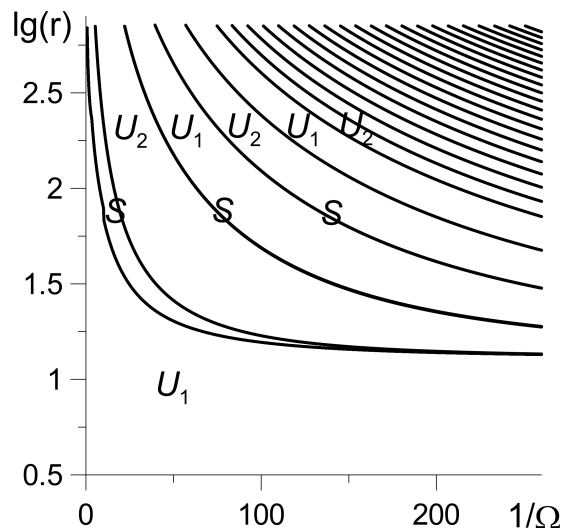


(б)

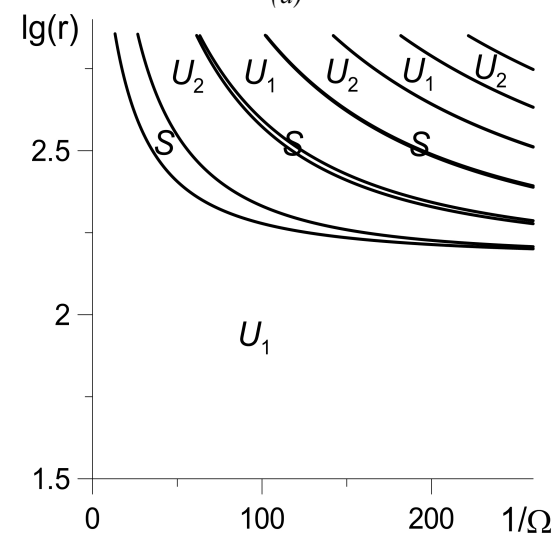
Рис. 4. Карты устойчивости равновесия при $d = 0.15$ для коротковолновых (сплошные линии при $k = 18.73$) и длинноволновых (штриховые линии при $k = 2.10$) возмущений при различных значениях приведенного числа Релея R : а – 0; б – 2. U_1 – области неустойчивости по отношению к синхронным возмущениям, U_2 – области неустойчивости по отношению к субгармоническим возмущениям, S – область устойчивости

При $R > 1$ в отсутствие модуляции ($\eta = 0$) в двухслойной системе реализуется неустойчивость, связанная с конвекцией, подобной конвекции Релея-Бенара [1, 11–15, 22]. В этом случае при включении модуляции ($\eta \neq 0$), помимо резонансных областей, появляется основная полоса неустойчивости по отношению к возмущениям синхронного отклика (U_1 -область), наблюдаемая при всех рассмотренных значениях частоты модуляции для малых значений r (рис. 4, б).

Резонансные области и основная полоса неустойчивости характерны для критических возму-



(a)



(б)

Рис. 5. Резонансные области устойчивости равновесия при $d = 0.15$ для разных типов возмущений: а – коротковолновых возмущений при $k = 18.73$ и $R = 8$; б – длинноволновых возмущений при $k = 2.10$ и $R = 80$. U_1 – области неустойчивости по отношению к синхронным возмущениям, U_2 – области неустойчивости по отношению к субгармоническим возмущениям, S – область устойчивости

щений различной длины волны. Из рис. 4 видно, что порог устойчивости равновесия довольно сильно зависит от длины волны критических возмущений: абсолютная амплитуда модуляции может меняться в десятки раз. Это может быть связано с тем, что вибрации оказывают большее влияние на коротковолновые возмущения по сравнению с длинноволновыми возмущениями ввиду различной роли инерционных эффектов в слоях жидкости и пористой среды [16–19]. В пористом слое эти эффекты выражены слабее, так как скелет пористой среды препятствует движению жидкости в ней. Таким

образом, при одном и том же значении частоты модуляции поля тяжести в случае длинноволновых возмущений, охватывающих пористый и жидкий слои, необходимо задать большую амплитуду модуляции, чем в случае коротковолновых возмущений, ограниченных в пределах жидкого слоя (рис. 4).

По той же причине узкие резонансные области устойчивости, образующиеся с ростом приведенного числа Релея R , для коротковолновых возмущений (рис. 5, *а*) возникают при значениях числа R , на порядок меньших его значений, полученных для длинноволновых возмущений равновесия (рис. 5, *б*). Отметим, что с ростом амплитуды r и обратной частоты модуляции $1/\Omega$ резонансные области устойчивости сужаются. При $1/\Omega > 50$ для коротковолновых возмущений и $1/\Omega > 150$ для длинноволновых возмущений в случае достаточно больших r кривые, описывающие границы этих областей, сливаются друг с другом (рис. 5).

5. Заключение

Рассмотрена линейная задача устойчивости механического равновесия в подогреваемой снизу двухслойной системе горизонтальных слоев чистой жидкости и однородной пористой среды, насыщенной жидкостью, в модулированном поле силы тяжести.

Проведено сравнение результатов, полученных для случая статического поля тяжести, с данными более ранних работ [11–15, 22]. Показано, что неустойчивость в системе связана с развитием двух видов возмущений: возмущений с меньшей длиной волны (коротковолновых возмущений), локализованных, в основном, в слое жидкости, и возмущений с большей длиной волны (длинноволновых возмущений), охватывающих оба слоя. Нейтральные кривые при этом имеют два минимума.

Изучено влияние модуляции ускорения силы тяжести на конкуренцию коротковолновых и длинноволновых возмущений равновесия. Для разных значений волновых чисел найдены резонансные области неустойчивости равновесия по отношению к возмущениям синхронного отклика на внешнее периодическое воздействие (с периодом, равным периоду модуляции) и субгармонического отклика (с периодом, вдвое большим периода модуляции) при изменении амплитуды и частоты модуляции. Исследованы возникновение и эволюция основной полосы неустойчивости и резонансных областей с ростом приведенного числа Релея, определяющего интенсивность нагрева в системе.

Показано, что порог устойчивости равновесия сильно зависит от длины волны критических возмущений. При одной той же частоте модуляции для возбуждения конвекции в слоях в виде возму-

щений, локализованных в жидком слое, требуется значительно меньшее значение амплитуды модуляции, чем в случае возмущений, проникающих в пористый слой. При этом с ростом интенсивности нагрева для коротковолновых возмущений узкие резонансные области устойчивости образуются при гораздо меньших значениях приведенного числа Релея, чем для длинноволновых возмущений. Это объясняется различной ролью инерционных эффектов в жидком и пористом слоях. При движении в пористой среде жидкость испытывает сопротивление пористого скелета, поэтому в пористом слое они выражены слабее, чем в слое жидкости [16–19], что определяет более сильное влияние модуляции поля тяжести (эквивалентной вибрационному воздействию конечной частоты и амплитуды) на коротковолновые возмущения по сравнению с длинноволновыми.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-31-60004 мол_а_дк.

Список литературы

1. Гершуни Г. З., Жуховицкий Е. М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. М.: Наука, 1972. 392 с.
2. Gershuni G. Z., Lyubimov D. V. Thermal Vibrational Convection. N.Y.: Wiley, 1998. 358 p.
3. Govender S. Stability of convection in a gravity modulated porous layer heated from below // Transport in Porous Media. 2004. Vol. 57. P. 113–123.
4. Govender S. Linear stability and convection in a gravity modulated porous layer heated from below: Transition from synchronous to subharmonic oscillations // Transport in Porous Media. 2005. Vol. 59. P. 227–238.
5. Govender S. An analogy between a gravity modulated porous layer heated from below and the inverted pendulum with an oscillating pivot point // Transport in Porous Media. 2007. Vol. 67. P. 323–328.
6. Зеньковская С. М. Действие высокочастотной вибрации на фильтрационную конвекцию // Прикладная механика и техническая физика. 1992. № 5. С. 83–88.
7. Зеньковская С. М., Роговенко Т. Н. Фильтрационная конвекция в высокочастотном вибрационном поле // Прикладная механика и техническая физика. 1999. № 3. С. 22–29.
8. Bardan G., Mojtabi A. On the Horton–Rogers–Lapwood convective instability with vertical vibration // Physics of Fluids. 2000. Vol. 12. P. 2723–2731.
9. Gershuni G. Z., Kolesnikov A. K., Legros J. C., Myznikova B. I. On the convective instability of a horizontal binary mixture layer with Soret effect

- under transversal high frequency vibration // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1999. Vol. 42, N. 3. P. 547–553.
10. *Muznikova B. I., Smorodin B. L.* Convective stability of a horizontal binary-mixture layer in a modulated external force field // *Fluid Dynamics*. 2001. N. 1. P. 1–10.
 11. *Любимов Д. В., Муратов И. Д.* О конвективной неустойчивости в слоистой системе // *Гидродинамика*. 1977. Т.10. С. 38–46.
 12. *Chen F., Chen C. F.* Onset of finger convection in a horizontal porous layer underlying a fluid layer. // *ASME Journal of Heat Transfer*. 1988. Vol. 110, N. 2. P. 403–409.
 13. *Любимов Д. В., Любимова Т. П., Муратов И. Д.* Конкуренция длинноволновой и коротковолновой неустойчивости в трехслойной системе // *Гидродинамика*. 2002. Т. 13. С. 121–127.
 14. *Lyubimov D. V., Lyubimova T. P., Muratov I. D.* Numerical study of the onset of convection in a horizontal fluid layer confined between two porous layers // *Advanced Problems in Thermal Convection: Proceedings of International Conference*. 2004. P. 105–109.
 15. *Kolchanova E., Lyubimov D., Lyubimova T.* 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. Vol. 97, N. 1. P. 25–42
 16. *Любимов Д. В., Любимова Т. П., Муратов И. Д.* Влияние вибраций на возбуждение конвекции в двухслойной системе пористая среда – однородная жидкость // *Гидродинамика*. 2004. Т. 14. С. 148–159.
 17. *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 // *Механика жидкости и газа*. 2008. № 5. С. 132–143.
 18. *Колчанова Е. А., Любимов Д. В., Любимова Т. П.* Влияние эффективной проницаемости среды на устойчивость двухслойной системы «однородная жидкость – пористая среда» в поле вибраций высокой частоты // *Вычислительная механика сплошных сред*. 2012. Т. 5. С. 225–232.
 19. *Lyubimov D., Kolchanova E., Lyubimova T.* Vibration effect on the nonlinear regimes of thermal convection in a two-layer system of fluid and saturated porous medium // *Transport in Porous Media*. 2015. Vol. 106. P. 237–257.
 20. *Колчанова Е. А., Колчанов Н. В.* Периодическая модуляция равновесного градиента температуры в слоях жидкости и насыщенной пористой среды // *Вычислительная механика сплошных сред*. 2015. Т. 8, № 2. С. 164–173.
 21. *Колчанова Е. А., Колчанов Н. В.* Возникновение конвекции в слоях жидкости и насыщенной пористой среды при периодической модуляции теплового потока // *Вестник Пермского университета. Серия: Физика*. 2015. Вып. 2. С. 25–32.
 22. *Nield D., Bejan A.* *Convection in Porous Media*. New York: Springer, 2013. 778 p.
 23. *Лобов Н. И., Любимов Д. В., Любимова Т. П.* Численные методы решения задач теории гидродинамической устойчивости: учеб. пособие. Пермь: Изд-во ПГУ, 2004. 101 с.
 24. *Сморodin Б. Л.* Конвекция бинарной смеси в условиях термодиффузии и переменного градиента температуры // *Прикладная механика и техническая физика*. 2002. Т. 43, № 2. С. 54–61.
 25. *Bejan A.* *Convection Heat Transfer*. New York: Wiley, 2013. 658 p.
 26. *Katto Y., Matsuoka T.* Criterion for onset of convective flow in a fluid in a porous medium // *International Journal of Heat Mass Transfer*. 1967. Vol. 10. P. 297–309.
 27. *Глухов А. Ф., Путин Г. Ф.* Экспериментальное исследование конвективных структур в насыщенной жидкостью пористой среде вблизи порога неустойчивости механического равновесия // *Гидродинамика*. 1999. Вып. 12. С. 104–119.
 28. *Глухов А. Ф., Любимов Д. В., Путин Г. Ф.* Конвективные движения в пористой среде вблизи порога неустойчивости // *Доклады Академии наук СССР*. 1978. Т. 236, № 3. С. 549–551.
 29. *Carman P. C.* Fluid flow through granular beds // *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*. 1937. Vol. 15. P. S32–S48.
 30. *Fand R. M., Kim B. Y. K., Lam A. C. C., Phan R. T.* Resistance to the flow of fluids through simple and complex porous media whose matrices are composed of randomly packed spheres // *Journal of Fluids Engineering*. 1987. Vol. 109. P. 268–273.
 31. *Prasad V.* Flow instabilities and heat transfer in fluid overlying horizontal porous layers // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 1993. Vol. 6. P. 135–146.

References

1. *Gershuni G. Z., Zhukhovitskii E. M.* *Convective stability of incompressible fluids*. Jerusalem: Keter Publishing House, 1976, 330 p.
2. *Gershuni G. Z., Lyubimov D. V.* *Thermal Vibrational Convection*. New York: Wiley, 1998. 358 p.
3. *Govender S.* Stability of convection in a gravity modulated porous layer heated from below. *Transport in Porous Media*, 2004, vol. 57, pp. 113–123.
4. *Govender S.* Linear stability and convection in a gravity modulated porous layer heated from below: Transition from synchronous to subharmonic oscillation

- lations. *Transport in Porous Media*, 2005, vol. 59, pp. 227–238.
5. Govender S. An analogy between a gravity modulated porous layer heated from below and the inverted pendulum with an oscillating pivot point. *Transport in Porous Media*. 2007, vol. 67, pp. 323–328.
 6. Zen'kovskaya S. M. Effect of high-frequency vibration on filtration convection. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1992, vol. 33, no. 5, pp. 691–695.
 7. Zen'kovskaya S. M., Rogovenko T. N. Filtration convection in a high-frequency vibration field. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1999, vol. 40, no. 3, pp. 379–385.
 8. Bardan G., Mojtabi A. On the Horton–Rogers–Lapwood convective instability with vertical vibration. *Physics of Fluids*, 2000, vol. 12, pp. 2723–2731.
 9. Gershuni G. Z., Kolesnikov A. K., Legros J. C., Myznikova B. I. On the convective instability of a horizontal binary mixture layer with Soret effect under transversal high frequency vibration. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1999, vol. 42, no. 3, pp. 547–553.
 10. Myznikova B. I., Smorodin B. L. Convective stability of a horizontal binary-mixture layer in a modulated external force field. *Fluid Dynamics*, 2001, no. 1, pp. 1–10.
 11. Lyubimov D. V., Muratov I. D. O konvektivnoi neustoiichivosti v sloistoi sisteme (On convective instability of layered system). *Gidrodinamika*, 1977, vol. 10, pp. 38–46. (In Russian)
 12. Chen F., Chen C. F. Onset of finger convection in a horizontal porous layer underlying a fluid layer. *ASME Journal of Heat Transfer*, 1988, vol. 110, no. 2, pp. 403–409.
 13. Lyubimov D. V., Lyubimova T. P., Muratov I. D. Konkurentsiya dlinnovolnnoi i korotkovolnnoi neustoiichivosti v trehsloynoi sisteme (Competition of longwave and shortwave instability in three-layer system). *Gidrodinamika*, 2002, vol. 13, pp. 121–127 (In Russian).
 14. Lyubimov D. V., Lyubimova T. P., Muratov I. D. Numerical study of the onset of convection in a horizontal fluid layer confined between two porous layers. *Proceedings of International Conference on Advanced Problems in Thermal Convection*, 2004, pp. 105–109.
 15. Kolchanova E., Lyubimov D., Lyubimova T. 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, vol. 97, no. 1, pp. 25–42.
 16. Lyubimov D. V., Lyubimova T. P., Muratov I. D. Vliyanie vibratsii na vozbulzhenie konvektivnoi v dvuhslonnoi sisteme poristoya sreda – odnorodnaya zhidkost' (Influence of vibrations on convection onset in a two-layer system “porous medium – homogeneous liquid”). *Gidrodinamika*, 2004, vol. 14, pp. 148–159. (In Russian)
 17. Lyubimov D., Lyubimova T., Muratov I., Shishkina E. Vibration effect on convection onset in a system consisting of a horizontal pure liquid layer and a layer of liquid saturated porous medium. *Fluid Dynamics*, 2008, vol. 43, no. 5, pp. 789–798.
 18. Kolchanova E. A., Lyubimov D. V., Lyubimova T. P. Influence of effective medium permeability on stability of a two-layer system “pure fluid–porous medium” under high-frequency vibrations. *Computational Continuum Mechanics*, 2012, vol. 5, no. 2, pp. 225–232 (In Russian).
 19. Lyubimov D., Kolchanova E., Lyubimova T. Vibration effect on the nonlinear regimes of thermal convection in a two-layer system of fluid and saturated porous medium. *Transport in Porous Media*, 2015, vol. 106, pp. 237–257.
 20. Kolchanova E. A., Kolchanov N. V. Periodic modulation of an equilibrium temperature gradient in a fluid layer and a saturated porous medium layer. *Computational continuum mechanics*, 2015, vol. 8, no. 2, pp. 164–173 (In Russian).
 21. Kolchanova E. A., Kolchanov N. V. Onset of convection in layers of fluid and porous media saturated under periodic heat flux modulation. *Bulletin of Perm University. Series: Physics*, 2015, no. 2, pp. 25–32 (In Russian).
 22. Nield D., Bejan A. *Convection in Porous Media*, USA: Springer, 2013, 778 p.
 23. Lobov N. I., Lyubimov D. V., Lyubimova T. P. *Chislennyye metody resheniya zadach teorii gidrodinamicheskoi ustoiichivosti* (Numerical methods of hydrodynamic instability: tutorial). Perm: Perm State University, 2004, 101 p.
 24. Smorodin B. L. Convection of a binary mixture under conditions of thermal diffusion and variable temperature gradient. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2002, vol. 43, no. 2, pp. 217–223.
 25. Bejan A. *Convection Heat Transfer*. New York: Wiley, 2013. 658 p.
 26. Katto Y., Matsuoka T. Criterion for onset of convective flow in a fluid in a porous medium. *International Journal of Heat Mass Transfer*, 1967, vol. 10, pp. 297–309.
 27. Glukhov A. F., Putin G. F. Eksperimental'noye issledovanie konvektivnykh struktur v nasichennoy zhidkost' u poristoi sredy vblizi poroga neustoiichivosti mekhanicheskogo ravnovesiya (Experimental study of convective structures in the saturated porous medium near the instability threshold). *Gidrodinamika*, 1999, vol. 12, pp. 104–119 (In Russian).
 28. Glukhov A. F., Lyubimov D. V., Putin G. F. Convective motions in a porous medium near the equilibrium instability threshold. *Soviet Physics, Doklady*. 1978, vol. 23, pp. 28–32.

29. Carman P. C. Fluid flow through granular beds. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, 1937, vol. 15, pp. S32–S48.
30. Fand R. M., Kim B. Y. K., Lam A. C. C., Phan R. T. Resistance to the flow of fluids through simple and complex porous media whose matrices are composed of randomly packed spheres. *Journal of Fluids Engineering*, 1987, vol. 109, pp. 268–273.
31. Prasad V. Flow instabilities and heat transfer in fluid overlying horizontal porous layers. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1993, vol. 6, pp. 135–146.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Колчанова Е. А. Возбуждение конвекции в слоях жидкости и насыщенной пористой среды в модулированном поле силы тяжести // Вестник Пермского университета. Физика. 2016. № 3 (34). С. 22–31. doi: 10.17072/1994-3598-2016-3-22-31

Please cite this article in English as:

Kolchanova E. A. Convection excitation in layers of fluid and fluid-saturated porous medium in a modulated gravity field // Bulletin of Perm University. Physics, 2016, no. 3 (34), pp. 22–31. doi: 10.17072/1994-3598-2016-3-22-31