

УДК 532.5.013.3
PACS 47.65.+a

Регулярные и хаотические электроконвективные колебания в слабопроводящих средах

Н. Н. Картавых, О. О. Некрасов

Пермский государственный национальный исследовательский университет
614990, Пермь, ул. Букирева, 15
email: kartavykh@psu.ru

На основе маломодовой модели электроконвекции исследована неустойчивость слабопроводящей жидкости в переменном электрическом поле горизонтального конденсатора при нагреве снизу. Рассматривается случай, когда основным механизмом зарядообразования является электрокондуктивный механизм, связанный с зависимостью электропроводности жидкости от температуры. Моделирование проведено с учетом конечного времени релаксации заряда для набора параметров задачи, соответствующих реальным жидкостям, используемым в электротехнике, например, для трансформаторного или конденсаторного масел. Установлено, что во всей области параметров неустойчивость наступает колебательным образом. На основе быстрого преобразования Фурье проведена классификация синхронных возмущений. На плоскости «электрический параметр – период внешнего поля» построена карта режимов периодических колебаний. Исследована зависимость интенсивности течений от амплитуды модуляции. Обнаружены области конкуренции различных типов возмущений с разными теплоточками.

Ключевые слова: слабопроводящая жидкость; переменное электрическое поле; маломодовая модель электроконвекции

Поступила в редакцию 28.09.2017; принята к опубликованию 16.11.2017

Regular and chaotic electroconvective oscillations in poorly conducting media

N. N. Kartavykh, O. O. Nekrasov

Perm State University, Bukireva St. 15, 614990, Perm
email: kartavykh@psu.ru

Instability of a poorly conducting is investigated. Fluid is placed in alternating electric field of a horizontal capacitor heating from below. Low-mode electroconvection model is used. We consider the situation, when electroconductive mechanism makes the main contribution. Electroconductive charge formation mechanism associates with the dependence of the electrical conductivity on the fluid temperature. The simulation is carried out, taking into account a finite charge relaxation time, for a set of problem parameters corresponding to real fluids used in electrical engineering, e.g. capacitor or transformer oils. It has been found that perturbations grow in an oscillatory manner over the entire range of parameters. The synchronous disturbances are classified using fast Fourier transform. The map of periodic oscillation modes has been obtained in the parameter plane “the electric parameter – the period of the external field”. The dependence of the flow intensity on the modula-

tion amplitude is investigated. The competition regions of perturbations different types with various heat flows are detected.

Keywords: poorly conducting fluid; alternating electric field; low-mode electroconvection model

Received 28.09.2017; accepted 16.11.2017

doi: 10.17072/1994-3598-2017-4-45-51

1. Введение

Известно, что переменное электрическое поле в зависимости от амплитуды и частоты может вызывать в электрогидродинамических системах колебательные и хаотические режимы движения [1–5]. Поведение жидкостей в электрическом поле сильно зависит от условий эксперимента, при которых главным источником заряда может выступать инжекционный, диэлектрофоретический или электрокондуктивный механизмы или их комбинация [6–8]. В настоящей работе исследуется случай, когда основным механизмом образования зарядов выступает электрокондуктивный механизм, связанный с зависимостью электропроводности среды от температуры [9–11]. Такая ситуация имеет место при рассмотрении слабопроводящих жидкостей, таких как конденсаторное и трансформаторное масла.

Переменные воздействия (тепловые или электромагнитные) могут существенно изменить пороги конвективной неустойчивости [12], повлиять на свойства нелинейных течений [13], обеспечить эффективный способ управления массо- и теплопереносом в различных технологических ситуациях. Зависимые от амплитуды и частоты переменные электрические поля представляют собой важный и удобный способ воздействия на свойства течений. Так, варьируя амплитуду и частоту внешнего поля, можно изменить характер течения.

2. Постановка задачи

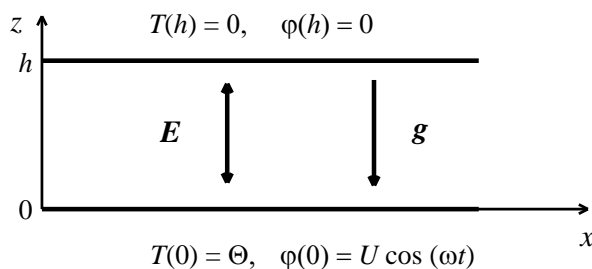


Рис. 1. Горизонтальный слой слабопроводящей жидкости. Геометрия задачи и система координат

Исследуется горизонтальный слой неоднородно нагретой вязкой несжимаемой слабопроводящей жидкости, находящейся в переменном вертикаль-

ном электрическом поле конденсатора напряженностью E и поле силы тяжести g (рис. 1).

На идеально тепло- и электропроводных пластинах конденсатора, расположенных при $z = 0, h$ (h – толщина слоя), выполняются условия для скорости, температуры и потенциала:

$$z = 0: \mathbf{V} = 0, T = \Theta, \varphi = U \cos(2\pi vt),$$

$$z = h: \mathbf{V} = 0, T = 0, \varphi = 0,$$

где Θ – разница температур между обкладками, U, ν – амплитуда и частота поля соответственно.

Рассматривается ситуация, когда основной вклад в образование заряда вносит электрокондуктивный механизм, связанный с зависимостью электропроводности среды от температуры $\sigma = \sigma_0(1 + \beta_\sigma T)$, где σ_0 – электропроводность при некотором среднем значении \bar{T} , от которого отсчитывается температура, а $\beta_\sigma = (1/\sigma_0) \cdot (\partial\sigma/\partial T)$ – температурный коэффициент электропроводности.

Введя безразмерные масштабы времени $\rho_0 h^2 / \eta$, расстояния h , скорости χ/h , температуры Θ , плотности заряда $\varepsilon U/h^2$, потенциала U , поля U/h и давления $\eta\chi/h^2$, где ρ_0 – плотность жидкости при температуре \bar{T} , η – коэффициент динамической вязкости, χ – коэффициент температуропроводности, ε – диэлектрическая проницаемость жидкости, систему уравнений электроконвекции слабопроводящей жидкости с учётом равновесного решения в безразмерной форме можно записать в виде [11]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \frac{1}{\text{Pr}} (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = \\ = -\nabla p + \Delta \mathbf{V} + \text{Ra} T \boldsymbol{\gamma} + \text{Ra}_\sigma \rho_e \boldsymbol{\gamma} \cos \cos(2\pi vt), \\ \text{Pr} \frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) T = \Delta T, \\ \text{div} \mathbf{V} = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{Pr}_e \frac{\partial \rho_e}{\partial t} + \frac{\text{Pr}_e}{\text{Pr}} (\mathbf{V} \cdot \nabla) \rho_e + \rho_e + \frac{\partial T}{\partial z} \cos(2\pi vt) = 0,$$

с граничными условиями:

$$z = 0: \mathbf{V} = 0, T = 1, \varphi = \cos(2\pi vt),$$

$$z = h: \mathbf{V} = 0, T = 0, \varphi = 0.$$

Здесь $\mathbf{V} = (u, v, w)$, p , T – поля скорости, давления и температуры, ρ_e – плотность свободных зарядов, γ – единичный вектор, направленный вверх $\gamma = (0, 0, 1)$, $\text{Pr} = \eta / (\chi \rho_0)$ – число Прандтля, $\text{Ra} = \rho_0 g \beta \Theta h^3 / (\eta \chi)$ – тепловое число Рэлея, $\text{Ra}_\sigma = \varepsilon U^2 \beta_\sigma \Theta / (\eta \chi)$ – электрический аналог числа Рэлея, $\text{Pr}_e = \varepsilon \eta / (h^2 \rho_0 \sigma_0)$ – электрическое число Прандтля.

Для решения системы (1) применялся метод Галеркина. Аппроксимировались поля функции тока ($w = \partial \psi / \partial x$, $u = -\partial \psi / \partial z$), температуры и плотности заряда:

$$\begin{aligned} \psi &= (A_1(t) \sin \pi z + A_2(t) \sin 2\pi z) \sin \pi k x, \\ \vartheta &= (B_1(t) \sin \pi z + B_2(t) \sin 2\pi z) \cos \pi k x + \\ &\quad + C(t) \sin 2\pi z, \\ \rho_e &= (D_1(t) \cos \pi z + D_2(t) \cos 2\pi z) \cos \pi k x + \\ &\quad + E(t) \cos 2\pi z, \end{aligned}$$

где k – волновое число, A_1 , A_2 , B_1 , B_2 , D_1 , D_2 , E , C – амплитуды различных пространственных мод.

После процедуры ортогонализации и перемасштабирования переменных была получена система из восьми нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{X} &= \text{Pr}(-X + rY - eT \cos 2\pi vt), \\ \dot{Y} &= -Y + X + XZ \\ \dot{Z} &= -bZ - XY \\ \dot{W} &= -dW + V \\ \dot{V} &= \text{Pr}(-dV + (rW + eS \cos 2\pi vt)/d) \quad (2) \\ \dot{S} &= -gS + XU - gY \cos 2\pi vt, \\ \dot{T} &= -gT - gW \cos 2\pi vt, \\ \dot{U} &= -gU - XS - 2gZ \cos 2\pi vt, \end{aligned}$$

где X , V – амплитуды пространственных гармоник функции тока, Y , Z , W – температуры, S , T , U – плотности заряда.

В системе (2) использованы следующие обозначения:

$$\begin{aligned} r &= \frac{\text{Ra}}{\text{Ra}_0}, \quad e = \frac{\text{Ra}_\sigma}{\text{Ra}_{\sigma_0}}, \\ \text{Ra}_0 &= \frac{\pi^4 (1+k^2)^3}{k^2}, \quad \text{Ra}_{\sigma_0} = \frac{3\pi^4 (1+k^2)^3}{8k^2}, \end{aligned}$$

$$b = \frac{4}{1+k^2}, \quad d = \frac{4+k^2}{1+k^2}, \quad g = \frac{\text{Pr}}{\pi^2 (1+k^2) \text{Pr}_e},$$

где Ra_0 , Ra_{σ_0} – критические числа, при которых начинается соответственно термогравитационная или электрокондуктивная конвекция.

Для решения системы (2) использовался численный метод Рунге-Кутты четвертого порядка точности. Для интегрирования уравнений в качестве начальных условий брались малые возмущения, также применялся метод продолжения по параметру. Интенсивность течений описывалась с помощью среднего по времени безразмерного теплового потока, приходящегося на единицу поверхности конденсатора (числа Нуссельта), который вводился следующим образом:

$$\text{Nu} = 1 - 2 \frac{1}{t_{\text{end}}} \int_0^{t_{\text{end}}} Z(t) dt.$$

Интегрирование проводилось по временному интервалу, соответствующему не менее ста периодам внешнего поля.

3. Результаты

В данной работе рассматривается случай подогрева снизу $r = 0.8$, численное моделирование проводилось при параметрах $\text{Pr} = 400$, $\text{Pr}_e = 30$, $k = 0.933$ [14].

В рамках конвективного движения слабопроводящей жидкости выделяется три типа синхронных колебаний, которые можно классифицировать по спектральному составу отклика динамической системы [5]. В работе анализируются Фурье-спектры временной эволюции сигнала для амплитуды X . Первый тип колебаний содержит в спектре только нечетные гармоники внешней частоты. Второй класс возмущений характеризуется наличием пиков, соответствующих четным комбинациям частоты внешнего воздействия. Третий тип колебательных движений является нелинейной комбинацией предыдущих двух, спектральный состав таких колебаний включает в себя как четные, так и нечетные гармоники частоты внешнего поля.

На плоскости «период внешнего поля $1/\nu$ – электрический параметр e » построена карта режимов электроконвективных синхронных колебаний (рис. 2). В области равновесия все возмущения затухают (рис. 2, область IV), и тепло передается теплопроводным механизмом, а число Нуссельта равняется единице ($\text{Nu} = 1$).

Во всей области параметров неустойчивость наступает колебательным образом с возникновением синхронных режимов второго типа (рис. 2, область II). При увеличении электрического числа сменяется тип синхронных колебаний: наступают возмущения третьего типа (рис. 2, область III). С дальнейшим ростом амплитуды внешнего поля ре-

ализуются колебания первого типа (рис. 2, область I). Отметим, что на отрезке по обратной частоте внешнего поля $1 \leq 1/\nu < 1.29$ были найдены хаотические возмущения. В силу того, что эти колебания реализуются в узком интервале по e , на рис. 2 они не обозначены.

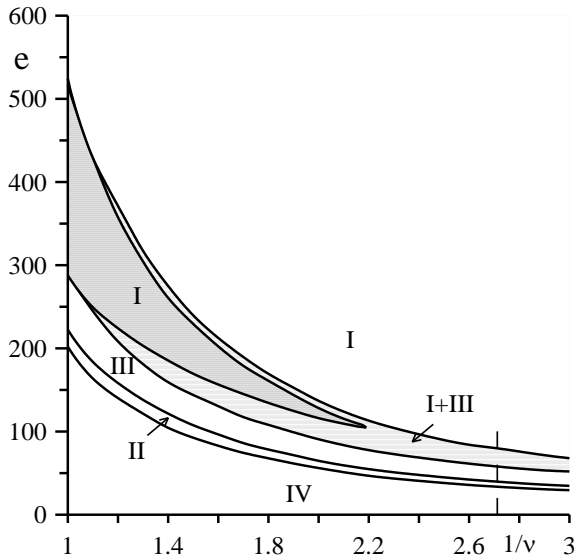


Рис. 2. Карта синхронных режимов на плоскости «период колебаний поля $1/\nu$ – электрический параметр e »; области, разделенные сплошными линиями, соотносятся с синхронными режимами первого типа (I), второго типа (II), третьего типа (III), равновесием (IV). Штриховка выделяет области гистерезиса. Пунктирная линия соответствует значению частоты $\nu = 0.37$ ($1/\nu = 2.7$)

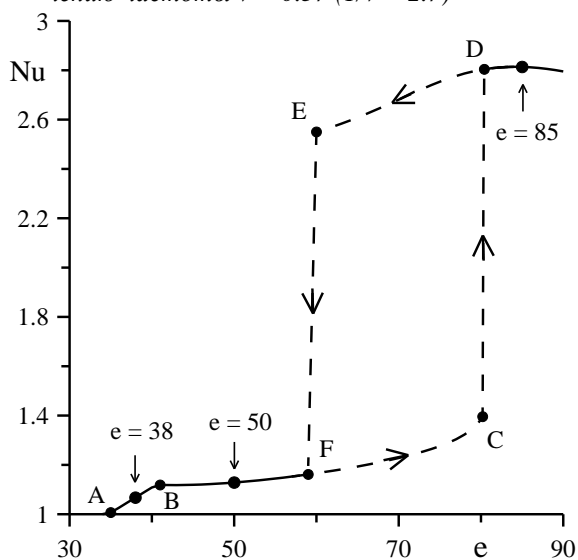


Рис. 3. График зависимости безразмерного теплопотока Nu от электрического параметра e для частоты внешнего поля $\nu = 0.37$ ($1/\nu = 2.7$, сечение I на рис. 2); пунктирными линиями со стрелками обозначена область гистерезиса

При уменьшении электрического параметра e обнаружено явление гистерезиса (рис. 2, штрихованные области). В зависимости от начальных условий реализуются колебания различных типов

Рассмотрим подробно поведение системы при частоте внешнего поля $\nu = 0.37$ ($1/\nu = 2.7$, пунктирная линия на рис. 2). На рис. 3 приведена зависимость безразмерного теплопотока (числа Нуссельта) Nu от электрического параметра e при $\nu = 0.37$. Когда $Nu = 1$, все возмущения затухают, система находится в равновесии. Рост теплопотока ($Nu > 1$) говорит о возникновении электроконвекции. Для частоты $\nu = 0.37$ неустойчивость рождается при $e = 34.8$ (рис. 3, точка A). Появляется синхронный колебательный режим второго класса (рис. 3, участок AB). Спектр Фурье таких возмущений представлен на рис. 4 а (присутствуют только четные гармоники внешней частоты $\nu_m = 2m\nu$, $m = 0, 1, 2, \dots$).

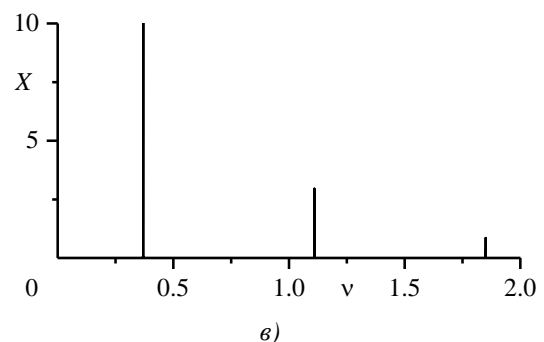
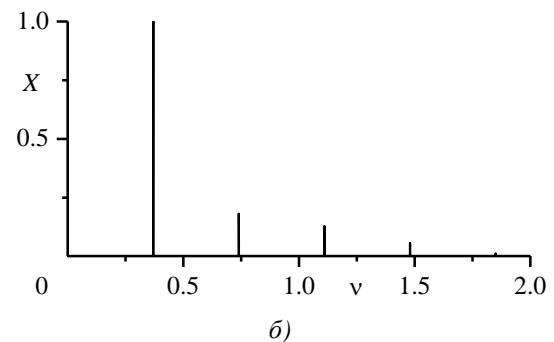
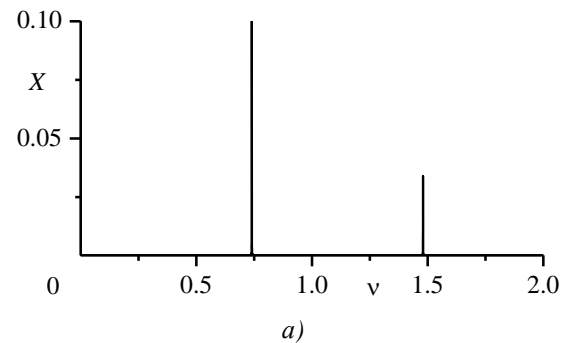


Рис. 4. Спектры Фурье отклика системы для амплитуды X при $\nu = 0.37$ ($1/\nu = 2.7$): а – $e = 38$; б – $e = 50$; в – $e = 85$

При достижении электрическим параметром значения $e = 40.5$ происходит смена колебательно-го режима (рис. 3, точка В). Возникают возмущения третьего типа (рис. 3, участок ВС), Фурье-спектр которых представлен на рис. 4, б (появляются нечетные пики, и присутствует полный набор частот $\nu_m = m\nu, m = 0, 1, 2, \dots$)

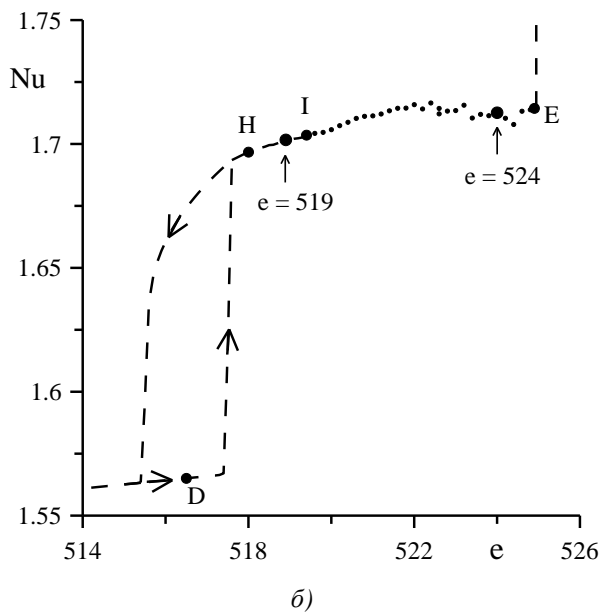
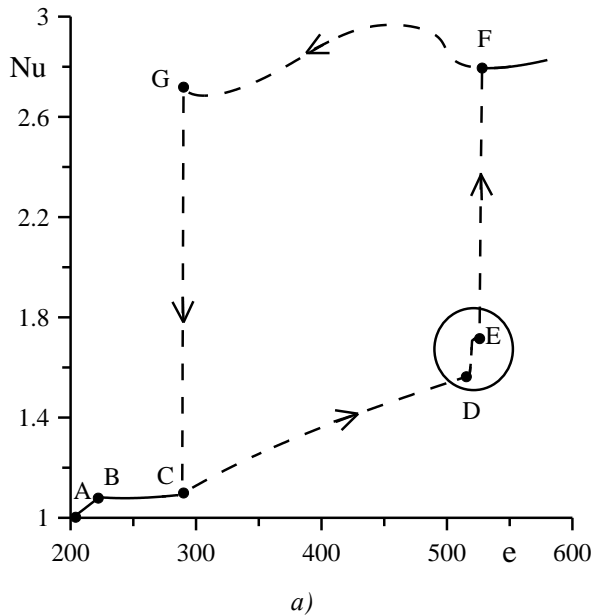


Рис. 5. Зависимость безразмерного теплопотока Nu от электрического параметра e для частоты внешнего поля $\nu = 1$ ($1/\nu = 1$, ось ординат на рис. 2): а – в широком диапазоне параметра e ; б – увеличенный масштаб области, обведенной окружностью, на рис. 5, а. Пунктирными линиями со стрелками обозначены области гистерезиса

С дальнейшим ростом амплитуды электрического поля вновь происходит смена режима при

$e = 80.3$ (рис. 3, точка D). Теперь синхронные колебания относятся к первому классу (рис. 3, участок правее точки D), их спектральный состав приведен на рис. 4, в (исчезают четные пики, присутствуют только нечетные гармоники внешней частоты $\nu_m = (2m + 1)\nu, m = 0, 1, 2, \dots$).

При уменьшении электрического параметра e наблюдается явление гистерезиса (рис. 3, участок CDEF). В зависимости от начальных условий может реализоваться режим с большим (первый тип колебаний) или меньшим (третий тип колебаний) теплопотоком. Одновременное сосуществование двух классов возмущений обнаружено в интервале по электрическому параметру $59.3 < e < 80.3$ (соответствует горизонтальной штриховке на рис. 2).

При частоте внешнего воздействия $\nu = 1$ ($1/\nu = 1$, ось ординат на рис. 2) поведение системы становится сложнее. Зависимость числа Нуссельта от электрического параметра для частоты $\nu = 1$ представлена на рис. 5. Потеря устойчивости происходит при $e = 202.2$ с возникновением колебательных течений второго типа (рис. 5 а, точка А). С увеличением амплитуды внешнего поля рождаются колебания третьего класса (рис. 5 а, точка В, $e = 222.5$), которые в дальнейшем сменяются возмущениями первого типа (рис. 5 а, точка С, $e = 287.8$). Участок DE на рис. 5, а ($516.4 \leq e < 524.3$) имеет сложную структуру, увеличенный масштаб этой области приведен на рис. 5, б.

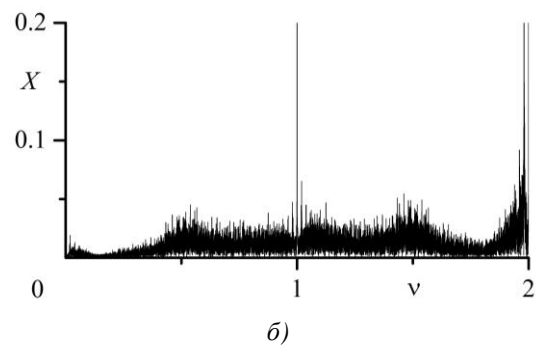
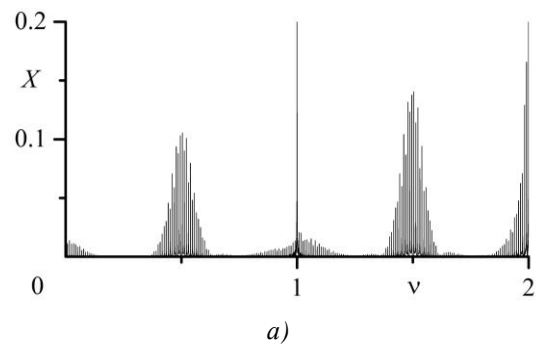


Рис. 6. Спектры Фурье отклика системы для амплитуды X при $\nu = 1$ ($1/\nu = 1$): а) – $e = 519$; б) – $e = 524$

При $\epsilon = 516.4$ (рис. 5, точка D) возникают колебания третьего типа. С ростом параметра ϵ происходит резкое увеличение теплопотока приблизительно на 8%, после чего, начиная с $\epsilon = 518.0$ (рис. 5, б, точка H) появляются квазипериодические колебания. Спектр Фурье этих возмущений содержит набор близко расположенных частот (рис. 6, а), но является дискретным. При дальнейшем увеличении амплитуды электрического поля появляются хаотические колебания, характеризующиеся сплошным Фурье-спектром (рис. 6, б). Таким образом, в системе реализуется сценарий перехода к хаосу через квазипериодичность [15].

Отметим, что в предыдущих исследованиях электроконвекции слабопроводящей жидкости при подогреве снизу [5] квазипериодические возмущения обнаружены не были, а переход к хаосу осуществлялся по сценарию Фейгенбаума [15].

Уменьшение безразмерного параметра ϵ так же, как и при других частотах, сопровождается явлением гистерезиса (рис. 5, а, участок CDEFG, $289.5 < \epsilon < 524.3$). Состояние на верхней ветви соответствует синхронному режиму первого класса. Таким образом, синхронные колебания первого класса конкурируют с несколькими типами возмущений:

- 1) периодическими колебаниями третьего класса (отвечает горизонтальной штриховке на рис. 2);
- 2) периодическими колебаниями первого класса с меньшей величиной теплопотока (соотносится с точечной штриховкой на рис. 2);
- 3) квазипериодическими колебаниями;
- 4) хаотическими колебаниями.

На рис. 5, б также присутствует область гистерезиса (обозначена пунктирными линиями со стрелками). На верхней ветви реализуются периодические колебания третьего класса.

4. Заключение

В рамках маломодовой модели электроконвекции исследовано движение слабопроводящей жидкости в переменном электрическом поле горизонтального конденсатора. Основным механизмом зарядообразования является электрокондуктивный механизм. На плоскости «период колебаний поля – электрический параметр» построена карта режимов. Найдены области существования различных типов регулярных и хаотических колебаний. Для двух частот внешнего поля были рассмотрены зависимости интенсивности колебаний от амплитуды внешнего воздействия. С помощью быстрого преобразования Фурье проведена классификация колебательных режимов. Обнаружены области гистерезиса, где конкурируют различные типы возмущений с большим и меньшим теплопотоками.

Список литературы

1. *Саранин В. А.* Устойчивость равновесия, зарядка, конвекция и взаимодействие жидких масс в электрических полях. М.: Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2009. 332 с.
2. *Atten P., Lacroix J. C., Malraison B.* Chaotic motion in a coulomb force driven instability: large aspect ratio experiments // *Physics Letters A*. 1980. Vol. 79, N 4. P. 255–258. DOI: 10.1016/0375-9601(80)90341-2
3. *Malrison B., Atten P.* Chaotic behavior of instability due to unipolar injection a dielectric liquid // *Physical Review Letters*. 1982. Vol. 49. P. 723–726. DOI: 10.1103/PhysRevLett.49.723
4. *Traoré Ph., Pérez A. T.* Two-dimensional numerical analysis of electroconvection in a dielectric liquid subjected to strong unipolar injection // *Physics of Fluids*. 2012. Vol. 24. 037102. DOI: 10.1063/1.3685721
5. *Картавых Н. Н., Смородин Б. Л., Ильин В. А.* Параметрическая электроконвекция слабопроводящей жидкости в горизонтальном плоском конденсаторе // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 2015. Т. 148, № 1(7). С. 178–189. DOI: 10.7868/S0044451015070160
6. *Болога М. К., Гросу Ф. П., Кожухарь И. А.* Электроконвекция и теплообмен. Кишинев: Штиинца, 1977. 320 с.
7. *Стишков Ю. К., Остапенко А. А.* Электрогидродинамические течения в жидких диэлектриках. Л.: Ленинградский ун-т. 1989. 176 с.
8. *Жакин А. И.* Электрогидродинамика // *Успехи физических наук*. 2012. Т. 182, № 5. С. 495–520. DOI: 10.3367/UFNr.0182.201205b.0495
9. *Косвинцев С. Р.* Экспериментальное изучение электроконвекции в плоском слое неоднородно нагретых слабопроводящих жидкостей // *Вестник Пермского университета. Серия: Физика*. 1994. № 2. С. 128–140.
10. *Жданов С. А., Косвинцев С. Р., Макарихин И. Ю.* Влияние электрического поля на устойчивость термогравитационного течения в вертикальном конденсаторе // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 2000. Т. 117. № 2. С. 398–406.
11. *Ильин В. А., Смородин Б. Л.* Нелинейные режимы конвекции слабопроводящей жидкости // *Письма в Журнал технической физики*. 2007. Т. 33. Вып. 8. С. 81–87. DOI: 10.1134/S1063785007040256
12. *Smorodin B. L., Velarde M. G.* On the parametric excitation of electrothermal instability in a dielectric liquid layer using an alternating electric field // *Journal of Electrostatics*. 2001. Vol. 50, N. 3. P. 205–226. DOI: 10.1016/S0304-3886(00)00036-X

13. Смородин Б. Л., Тараут А. В. Динамика волновых электроконвективных течений в модулированном электрическом поле // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2014. Т. 145, № 1. С. 180–188.
DOI: 10.7868/S0044451014010192
14. Kosvintsev S. R., Smorodin B. L., Zhdanov S. A., Makarikhin I. Yu. Electro-convective stability in a horizontal capacitor // Proceedings of International Conference «Modern Problems of Electrophysics and Electrohydrodynamics of Liquids» (MPEEL). St. Petersburg, 2000. P. 79–82.
15. Берже П., Помо И., Видаль К. Порядок в хаосе. О детерминированном подходе к турбулентности. М.: Мир, 1991. 368 с.
- and heat transfer]. Kishinev: Shtiintsa, 1977. 320 p. (In Russian).
7. Stishkov YU. K., Ostapenko A. A. *Ehlektrogidrodinamicheskie techeniya v zhidkih dielektrikah* (Electrohydrodynamic flows in liquid dielectrics) Izdatel'stvo Leningradskogo universiteta, 1989. 176 p. (In Russian).
8. Zhakin A. I. Electrohydrodynamics. *Physics-Uspokhi*, 2012, vol. 55, no. 5, pp. 465–488. DOI: 10.3367/UFNr.0182.201205b.0495
9. Kosvintsev S. R. *Ehksperimental'noe izuchenie ehlektrokonvekcii v ploskom sloe neodnorodno nagretyh slaboprovodyashchih zhidkostej* (Experimental study electroconvection in a flat layer of inhomogeneously heated poorly conducting liquid) // *Bulletin of Perm University. Series: Physics*, 1994, no. 2, pp. 128–140 (In Russian).
10. Zhdanov S. A., Kosvintsev S. R., Makarikhin I. Yu. Influence of an electric field on the stability of thermogravitational flow in a vertical capacitor. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 2000, vol. 90, no 2, pp. 352–359.
11. Il'in V. A., Smorodin B. L. Nonlinear regimes of electroconvection in a low-conducting liquid. *Technical Physics Letters*, 2007, vol. 33, no. 4, pp. 355–357. DOI: 10.1134/S1063785007040256
12. Smorodin B. L., Velarde M. G. On the parametric excitation of electrothermal instability in a dielectric liquid layer using an alternating electric field. *Journal of Electrostatics*, 2001, vol. 50, no. 3, pp. 205–226.
DOI: 10.1016/S0304-3886(00)00036-X
13. Smorodin B. L., Taraut A. V. Dynamics of electroconvective wave flows in a modulated electric field. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 2014, vol. 118, no. 1, pp. 158–165.
DOI: 10.7868/S0044451014010192
14. Kosvintsev S. R., Smorodin B. L., Zhdanov S. A., Makarikhin I. Yu. Electro-convective stability in a horizontal capacitor. *Proceedings of International Conference «Modern Problems of Electrophysics and Electrohydrodynamics of Liquids» (MPEEL)*. St. Petersburg, 2000, pp. 79–82.
15. Berge P., Pomo I., Vidal K. *Order within chaos: towards a deterministic approach to turbulence*. New York: Wiley, 1986.

References

1. Saranin V. A. *Ustojchivost' ravnovesiya, zaryadka, konvekciya i vzaimodejstvie zhidkih mass v ehlektricheskikh polyah* (Stability of equilibrium, charge, convection and interaction of liquid mass in electric fields). M. Izhevsk: NIC «Regulyarnaya i haoticheskaya dinamika», 2009. 332 p. (In Russian).
2. Atten P., Lacroix J. C., Malraison B. Chaotic motion in a coulomb force driven instability: large aspect ratio experiments. *Physics Letters A*, 1980, vol. 79, n 4, pp. 255–258.
DOI: 10.1016/0375-9601(80)90341-2
3. Malrison B., Atten P. Chaotic behavior of instability due to unipolar injection a dielectric liquid. *Physical Review Letters*, 1982, vol. 49, pp. 723–726. DOI: 10.1103/PhysRevLett.49.723
4. Traoré Ph., Pérez A. T. Two-dimensional numerical analysis of electroconvection in a dielectric liquid subjected to strong unipolar injection. *Physics of Fluids*, 2012, vol. 24, 037102.
DOI: 10.1063/1.3685721
5. Kartavykh N. N., Smorodin B. L., Il'in V. A. Parametric electroconvection in a weakly conducting fluid in a horizontal parallel-plate capacitor. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 2015, vol. 121, no. 1, pp. 155–165.
DOI: 10.7868/S0044451015070160
6. Bologna M. K., Grosu F. P., Kozhuhar' I. A. *Elektrokonvektsiya i teploobmen* [Electroconvection

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Картавых Н. Н., Некрасов О. О. Регулярные и хаотические электроконвективные колебания в слабопроводящих средах // Вестник Пермского университета. Физика. 2017. № 4 (38). С. 45–51.
doi: 10.17072/1994-3598-2017-4-45-51

Please cite this article in English as:

Kartavykh N. N., Nekrasov O. O. Regular and chaotic electroconvective oscillations in poorly conducting media. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2017, no. 4 (38), pp. 45–51. doi: 10.17072/1994-3598-2017-4-45-51