

ПЕРЕХОДЫ МЕЖДУ ЭЛЕКТРОКОНВЕКТИВНЫМИ РЕЖИМАМИ СЛАБОПРОВОДЯЩЕЙ ЖИДКОСТИ ПРИ ИНЖЕКЦИИ ЗАРЯДА В ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ЯЧЕЙКАХ С РАЗНЫМ АСПЕКТНЫМ ОТНОШЕНИЕМ

К. С. Рушинская, В. А. Ильин

Пермский государственный национальный исследовательский университет,
614990, Пермь, Букирева, 15

Изучены нелинейные режимы электроконвекции неизотермической слабопроводящей жидкости в постоянном электрическом поле горизонтального слоя при униполярной инъекции заряда с катода. При вычислениях были рассмотрены прямоугольные ячейки разной длины с условиями периодичности. Построены карты режимов электроконвекции.

Ключевые слова: электроконвекция; слабопроводящая жидкость; инъекция

TRANSITIONS BETWEEN ELECTROCONVECTIVE REGIMES OF A POORLY CONDUCTIVE LIQUID UNDER CHARGE INJECTION IN HORIZONTAL CELLS WITH THE DIFFERENT ASPECT RATIO

K. S. Rushinskaya, V. A. Il'in

Perm State University, Bukireva St. 15, 614990, Perm

Nonlinear regimes of electroconvection in a horizontal layer of the nonisothermal poorly conductive liquid in a steady electric field have been studied. Electroconvection is given rise by unipolar injection of charge from a cathode. During calculations rectangular cells of a different length with the periodicity conditions have been observed. The diagrams of electroconvection regimes have been plotted.

Keywords: electroconvection; poorly conductive liquid; injection

Движение жидкостей в электрическом поле привлекает внимание тем, что представляет собой способ прямого преобразования энергии электрического поля в энергию движения жидкой среды [1]. С практической точки зрения знание законов действия электрического поля на конвективные течения актуально в связи с проблемой эффективного управления конвекцией, тепло- и массопереносом в различных технологических ситуациях, в частности, в электрогидродинамических насосах.

Существует несколько механизмов электроконвекции в диэлектрических жидкостях. Влияние диэлектрофоретического механизма неустойчивости на движение идеальных диэлектриков рассмотрено в работе [2]. Электроконвекция слабопроводящих жидкостей при участии электрокондуктивного механизма неустойчивости изучена в [3]. Неустойчивость и электроконвекция под действием инъекционного механизма зарядообразования в слабо-

проводящих жидкостях рассмотрены в [4–7]. Электроконвекция с инъекцией в длинной ячейке изучена в [8].

В настоящей работе инъекционный механизм зарядообразования считается основным. Используется модель униполярной инъекции заряда, предложенная в [1, 4]. Согласно этой модели плотность инжектируемого заряда прямо пропорциональна напряженности электрического поля в слое.

В рамках безындукционного приближения безразмерная система уравнений электроконвекции слабопроводящей жидкости имеет вид [4–7]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial \Phi}{\partial z} - \frac{\partial \psi}{\partial z} \frac{\partial \Phi}{\partial x} &= \Delta \Phi - E \frac{T_e^2}{M^2} \frac{\partial q}{\partial x} - \frac{Ra}{Pr} \frac{\partial q}{\partial x}, \\ \frac{\partial \rho_e}{\partial t} + \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial \rho_e}{\partial z} - \frac{\partial \psi}{\partial z} \frac{\partial \rho_e}{\partial x} &= \frac{T_e^2}{M^2} \left(\rho_e^2 + E \frac{\partial \rho_e}{\partial t} \right), \\ \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial z} - \frac{\partial \psi}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial x} &= \frac{1}{Pr} \Delta T. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь Φ – вихрь скорости, ψ – функция тока, T – температура жидкости, q – плотность заряда, x, z – горизонтальная и вертикальная координаты, t – время, E – напряженность электрического поля; T_e и M – безразмерные электрические параметры, Pr – число Прандтля, Ra – число Рэлея [6].

Граничные условия имеют вид (A – параметр инъекции):

$$\begin{aligned} z = 0: \psi &= 0, \partial \psi / \partial z = 0, q = AE, T = 1; \\ z = 1: \psi &= 0, \partial \psi / \partial z = 0, T = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Задача решалась методом конечных разностей. Рассмотрен случай подогрева снизу. Нагрев сверху рассмотрен в работе [6]. Для вычислений выбиралась прямоугольная ячейка с пространственными размерами $L_z = 1, L_x = 4; L_z = 1, L_x = 10$. Число узлов по вертикальной и горизонтальной осям бралось соответственно $21 \times 81; 21 \times 201$. Число Прандтля $Pr = 10$. Использовались условия периодичности. Расчеты проведены при разных значениях параметра T_e и теплового числа Рэлея Ra .

Результаты расчетов систематизированы. Обнаружены два режима стационарной конвекции, между которыми наблюдались гистерезисные переходы [7]. Предварительные результаты для разных ячеек опубликованы в работе [9]. На рис. 1 представлены результаты расчетов зависимости максимального значения функции тока ψ_m от электрического параметра T_e для $Ra = 1000$ и сетки 21×201 узлов.

Нижний режим 1 имеет меньшую интенсивность движения вихрей, верхний режим 2 – большую интенсивность. Существует конкуренция между режимом 2 и равновесием, режимами 1 и 2 в соответствующих интервалах управляющего параметра.

Результаты расчетов для ячейки $L_z = 1, L_x = 2$ представлены в работе [7]. Пороги переходов между режимами электроконвекции, полученные при

вычислении зависимости максимального значения функции тока от параметра T_e для $Ra = 1000$ и для $L_x = 4, 10$, представлены в табл. 1.

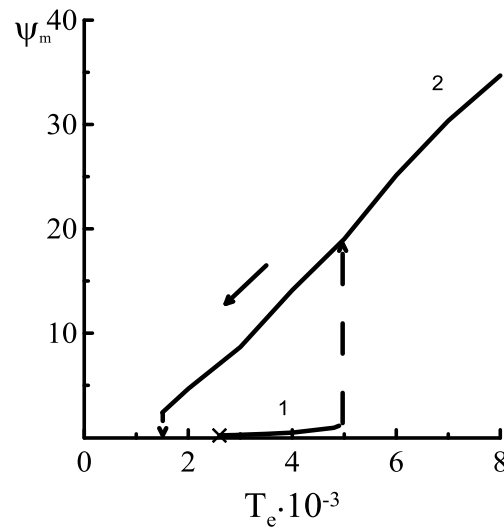


Рис. 1. Зависимость максимальной функции тока от T_e для $Ra = 1000$ ($L_z = 1, L_x = 10$)

Для ячейки $L_z = 1, L_x = 2$ нижний режим начинается при $T_e = 2.5 \cdot 10^3$; для $L_z = 1, L_x = 4$ – при $T_e = 2.8 \cdot 10^3$; для $L_z = 1, L_x = 10$ – при $T_e = 2.6 \cdot 10^3$.

Для ячейки $L_z = 1, L_x = 2$ с ростом поля при $T_e = 5.5 \cdot 10^3$ происходит скачкообразный переход к режиму конвекции 2 с большей интенсивностью вихрей; для $L_z = 1, L_x = 4$ – при $T_e = 4.9 \cdot 10^3$; для $L_z = 1, L_x = 10$ – при $T_e = 5 \cdot 10^3$.

Для ячейки $L_z = 1, L_x = 2$ в интервале $1.6 \cdot 10^3 \leq T_e \leq 5.5 \cdot 10^3$ обнаружен гистерезис, в котором поведение системы существенно зависит от начальных условий. При вычислении методом продолжения по параметру выявлено, что при движении в пространстве параметров справа налево режим 2 существует до $T_e = 1.6 \cdot 10^3$. При меньшей напряженности поля в системе независимо от начальных условий затухают все возмущения, и устанавливается равновесное распределение переменных. При больших размерах ячейки эти интервалы переходов следующие: $1.4 \cdot 10^3 \leq T_e \leq 4.9 \cdot 10^3$ для $L_z = 1, L_x = 4$; $1.5 \cdot 10^3 \leq T_e \leq 5 \cdot 10^3$ для $L_z = 1, L_x = 10$.

Для ячейки $L_z = 1, L_x = 2$ в интервале $1.6 \cdot 10^3 \leq T_e \leq 2.4 \cdot 10^3$ в зависимости от начальных условий в системе будет либо равновесие, либо стационарный режим 2, при большем поле: $2.5 \cdot 10^3 \leq T_e \leq 5.4 \cdot 10^3$, реализуется либо режим 1, либо режим 2. При $T_e > 5.4 \cdot 10^3$ сколь угодно малые возмущения равновесия приводят систему после переходных процессов к стационарному режиму 2.

Для других ячеек интервалы меняются. Для $L_z = 1, L_x = 4$ они таковы: $1.4 \cdot 10^3 \leq T_e \leq 2.7 \cdot 10^3$; $2.8 \cdot 10^3 \leq T_e \leq 4.8 \cdot 10^3$. Переход на верхний режим

происходит при $T_e > 4.8 \cdot 10^3$. Для $L_z = 1$, $L_x = 10$ первый интервал гистерезиса следующий: $1.5 \cdot 10^3 \leq T_e \leq 2.5 \cdot 10^3$, второй – $2.6 \cdot 10^3 \leq T_e \leq 4.9 \cdot 10^3$. Переход на верхний режим совершается при $T_e > 4.9 \cdot 10^3$.

Табл. 1. Пороги возникновения нелинейных режимов и переходов от одного режима к другому для $Ra = 1000$ для различных размеров ячейки

L_x	Порог возникновения верхнего режима (2), $T_e, 10^3$	Порог возникновения нижнего режима (1), $T_e, 10^3$	Порог перехода от нижнего режима (1) к верхнему (2), $T_e, 10^3$
4	1.4	2.8	4.9
10	1.5	2.6	5.0

Список литературы

1. Жакин А. И. Электрогидродинамика // Успехи физических наук. 2012. Т. 182. №5. С. 495–520.
2. Ильин В. А., Трофимова Е. В. Устойчивость электроконвективных режимов идеального диэлектрика в высокочастотном электрическом поле горизонтального конденсатора // Вестник Пермского университета. Серия: Физика. 2014. Вып. 1 (26). С. 49–56.
3. Ильин В. А., Пономарева Л. А. Электроконвекция слабопроводящей жидкости в высокочастотном электрическом поле // Вестник Пермского университета. Серия: Физика. 2013. Вып. 3 (25). С. 28–36.
4. Верещага А. Н. Унарная электроконвекция в плоском слое // Гидродинамика и процессы тепломассопереноса. 1989. С. 42–47.
5. Ильин В. А., Петров Д. А. Исследование динамики переноса заряда через слабопроводящую жидкость в модулированном электрическом поле // Вестник Пермского университета. Серия: Физика. 2009. Вып. 1 (27). С. 26–30.
6. Мордвинов А. Н., Смородин Б. Л. Электроконвекция при инжекции с катода и нагреве сверху // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2012. Т. 141. Вып. 5. С. 997–1005.
7. Ильин В. А. Электроконвекция слабопроводящей жидкости в горизонтальном конденсаторе при униполярной инжекции заряда // Журнал технической физики. 2017. Т. 87. Вып. 1. С. 5–9.
8. Smorodin B. L., Taraut A. V. Simulations of oscillatory electroconvection in a horizontal capacitor with a large aspect ratio // Magnetohydrodynamics. 2016. Vol. 52. N. 1. P. 245–254.
9. Рушинская К. С., Ильин В. А. Электроконвекция слабопроводящей жидкости при инжекции заряда в горизонтальных ячейках с разным аспектным отношением // Материалы международного симпозиума "Неравновесные процессы в сплошных средах". 2017. Т. 2. С. 172–174.