

ПЕРЕХОДЫ МЕЖДУ ЭЛЕКТРОКОНВЕКТИВНЫМИ РЕЖИМАМИ СЛАБОПРОВОДЯЩЕЙ ЖИДКОСТИ ПРИ ИНЖЕКЦИИ ЗАРЯДА В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ КОНДЕНСАТОРЕ

Т. И. Чигорина, 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. Рассмотрены разные нагревы снизу. Построены карты режимов электроконвекции.

Ключевые слова: электроконвекция; слабопроводящая жидкость; инъекция

TRANSITIONS BETWEEN ELECTROCONVECTIVE REGIMES OF A POORLY CONDUCTIVE LIQUID UNDER CHARGE INJECTION IN HORIZONTAL CAPACITOR

T. I. Chigorina, 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. Different heatings from below are considered. 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, например, в электрогидродинамических насосах и немеханических переключателях.

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, 4]. Неустойчивость и электроконвекция под действием инъекционного механизма зарядообразования в слабопроводящих жидкостях рассмотрена в [5, 6].

В настоящей работе инжекционный механизм зарядообразования считается основным. Используется модель униполярной инъекции заряда с катода, предложенная в работе [5]. Согласно этой модели инжектируемая в жидкость плотность заряда прямо пропорциональна напряжённости электрического поля в конденсаторе.

В рамках безындукционного приближения безразмерная система уравнений электротермической конвекции слабопроводящей жидкости имеет вид [5–8]:

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

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 – тепловое число Рэлея [7].

Граничные условия имеют вид (A – параметр инъекции):

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

Задача решалась методом конечных разностей. Рассмотрен случай подогрева снизу. Нагрев сверху рассмотрен в работе [7]. Для вычислений выбиралась прямоугольная ячейка с пространственными размерами $L_z = 1, L_x = 2$. Сетка бралась 21×41 узлов. Число Прандтля $Pr = 10$. Использовались условия периодичности. Вычислялись зависимости максимальной функции тока от параметра T_e для разных нагревов – теплового числа Рэлея Ra .

Результаты расчетов систематизированы. Обнаружены два режима стационарной конвекции, между которыми наблюдались гистерезисные переходы [8]. На рис. 1 представлены результаты расчётов зависимости максимальной функции тока ψ_m от электрического параметра T_e для $Ra = 400$.

При расчёте с постоянными начальными условиями было обнаружено, что электроконвекция возникает мягким образом при $T_e = 4.8 \cdot 10^3$, наблюдается режим с маленькой интенсивностью вихрей (режим 1). При $T_e = 5.8 \cdot 10^3$ происходит скачкообразный переход к режиму с большой интенсивностью вихрей (режим 2). Интенсивность этого режима растёт с ростом T_e .

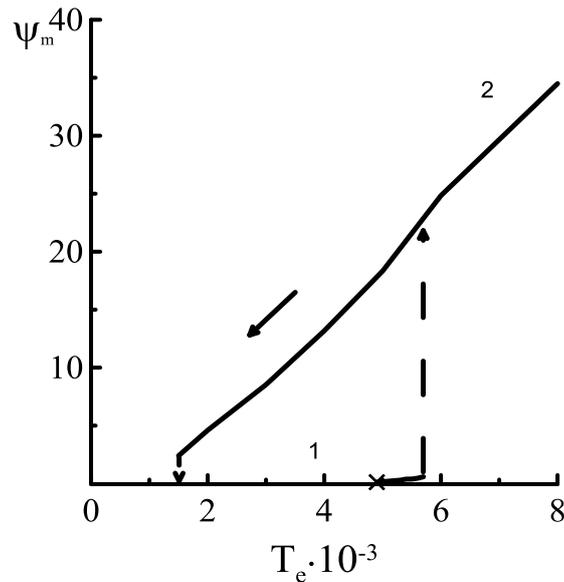


Рис. 1. Зависимость максимальной функции тока от параметра T_e для $Ra = 400$

В интервале $4.8 \cdot 10^3 \leq T_e \leq 5.7 \cdot 10^3$ было обнаружено, что поведение системы зависит от начальных условий. При вычислении методом продолжения по параметру было выявлено, что при движении в пространстве параметров справа налево режим с большей интенсивностью вихрей существует до $T_e = 1.5 \cdot 10^3$. При меньшей напряженности поля $T_e < 1.5 \cdot 10^3$ в системе независимо от начальных условий затухают все возмущения, и устанавливается равновесное распределение переменных.

В интервале $1.5 \cdot 10^3 \leq T_e \leq 4.7 \cdot 10^3$ в зависимости от начальных условий реализуется либо равновесное распределение, либо стационарный режим 2, при большем поле $4.8 \cdot 10^3 \leq T_e \leq 5.7 \cdot 10^3$ будет либо режим 1, либо режим 2. При $T_e \geq 5.8 \cdot 10^3$ сколь угодно малые возмущения приводят систему после переходных процессов к стационарному режиму 2.

На основе данных статьи [8] была выявлена следующая закономерность: с уменьшением значения числа Рэлея уменьшается интервал существования режима с маленькой интенсивностью вихрей. В настоящей работе это закономерность была подтверждена и продолжена. Для этого были проведены расчёты при значениях числа Рэлея меньше $Ra = 400$. На рис.2 представлена карта режимов для $Ra = 50$. В этом случае мягко возникающего режима с малой интенсивностью вихрей не было обнаружено.

При $T_e = 6.2 \cdot 10^3$ происходит скачкообразный переход к режиму конвекции с большой интенсивностью вихрей (в [5] для $Ra = 0$ аналогичный переход происходит при $T_e = 6.3 \cdot 10^3$). При движении в пространстве параметров справа налево режим существует до $T_e = 1.5 \cdot 10^3$. При меньшей напряженности поля $T_e < 1.5 \cdot 10^3$ в системе независимо от начальных условий затухают все возмущения, и устанавливается равновесие.

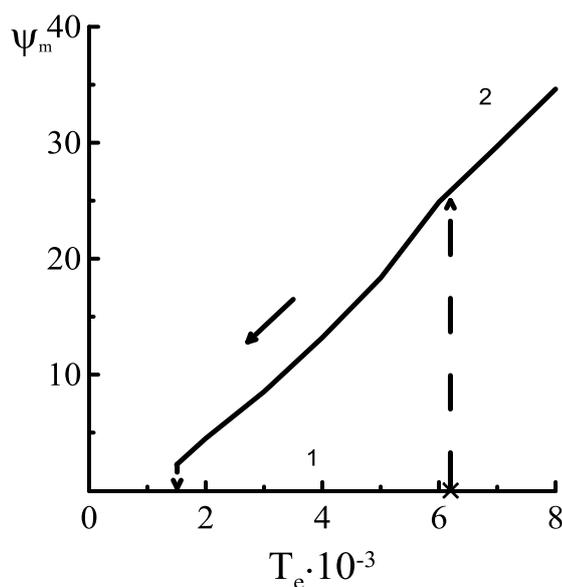


Рис. 2. Зависимость максимальной функции тока от параметра T_e для $Ra = 50$

В интервале $1.5 \cdot 10^3 \leq T_e < 6.2 \cdot 10^3$ в зависимости от начальных условий в системе будет либо равновесие, либо стационарный режим. При $T_e \geq 6.2 \cdot 10^3$ сколь угодно малые возмущения равновесия приводят систему после переходных процессов к стационарному режиму.

Табл. 1. Пороги возникновения нелинейных режимов и переходов от нижнего к верхнему режиму для разных значений Ra

Ra	Порог возникновения режима 2, T_e	Порог возникновения режима 1, T_e	Порог перехода от режима 1 к режиму 2, T_e
400	$1.5 \cdot 10^3$	$4.8 \cdot 10^3$	$5.8 \cdot 10^3$
300	$1.5 \cdot 10^3$	$5.3 \cdot 10^3$	$5.9 \cdot 10^3$
70	$1.5 \cdot 10^3$	$6.1 \cdot 10^3$	$6.2 \cdot 10^3$
50	$1.5 \cdot 10^3$	-	$6.2 \cdot 10^3$
0	$1.5 \cdot 10^3$	-	$6.3 \cdot 10^3$

С ростом числа Рэлея возникает режим 1 с малой интенсивностью вихрей. Например, для числа Рэлея $Ra = 70$ при расчёте с постоянными начальными условиями он возникает при $T_e = 6.1 \cdot 10^3$. При $T_e = 6.2 \cdot 10^3$ происходит скачкообразный переход к режиму 2, интенсивность которого растёт с ростом T_e . В интервале $1.5 \cdot 10^3 \leq T_e \leq 6.2 \cdot 10^3$ выявлен гистерезис, в котором поведение системы зависит от начальных условий. Режим с большой интенсивностью вихрей при движении справа налево существует до $T_e = 1.5 \cdot 10^3$. При $T_e < 1.5 \cdot 10^3$ в системе устанавливается равновесие.

Пороги переходов между режимами электроконвекции при вычислении зависимости максимального значения функции тока от параметра T_e для разных чисел Ra представлены в табл. 1. Как видно из табл. 1, с уменьшением числа Рэлея интервал существования режима 1 сужается, и режим исчезает. При $Ra = 70$ интервал существования режима 1 минимален. При $Ra = 50$ режим 1 не наблюдается.

Список литературы

1. *Остроумов Г. А.* Взаимодействие электрических и гидродинамических полей: Физические основы электрогидродинамики. М.: Наука, 1979. 319 с.
2. *Ильин В. А., Куришина Е. В.* Исследование модели электроконвекции идеального диэлектрика в конденсаторе с твёрдыми границами // Вестник Пермского университета. Серия: Физика. 2009. Вып. 1 (27). С. 3–6.
3. *Картавых Н. Н., Ильин В. А.* Численное моделирование электроконвекции слабопроводящей жидкости в переменном электрическом поле // Вычислительная механика сплошных сред. 2014. Т. 7. № 3. С. 260–269.
4. *Ильин В. А., Пономарева Л. А.* Исследование модели электроконвекции слабопроводящей жидкости в конденсаторе с твердыми границами // Вестник Пермского университета. Серия: Физика. 2015. Вып. 1 (29). С. 19–26.
5. *Верещага А. Н.* Унарная электроконвекция в плоском слое // Гидродинамика и процессы тепломассопереноса. 1989. С. 42–47.
6. *Ильин В. А., Петров Д. А.* Линейный анализ устойчивости слабопроводящей жидкости в электрическом поле при униполярной инжекции заряда // Вестник Пермского университета. Серия: Физика. 2011. Вып. 1 (16). С. 31–35.
7. *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.
8. *Ильин В. А.* Электроконвекция слабопроводящей жидкости в горизонтальном конденсаторе при униполярной инжекции заряда // Журнал технической физики. 2017. Т. 87. Вып. 1. С. 5–9.