

ВЛИЯНИЕ ПЕРЕМЕННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ТЕПЛОПОТОК ЧЕРЕЗ КОНВЕКТИВНУЮ ЯЧЕЙКУ, ЗАПОЛНЕННУЮ СЛАБОПРОВОДЯЩЕЙ ЖИДКОСТЬЮ

Н. Н. Картавых

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

Изучена электроконвекция слабопроводящей жидкости в переменном электрическом поле горизонтального конденсатора. Рассматривается электрокондуктивный механизм зарядообразования. Проанализирована эволюция возникающих течений в надкритической области.

Рассмотрим плоский горизонтальный слой неоднородно нагретой вязкой несжимаемой слабопроводящей жидкости, находящейся в переменном вертикальном электрическом поле E и поле тяжести g . Ось x направлена вдоль нижней границы слоя, ось z — перпендикулярна границам слоя. Идеально тепло- и электропроводные пластины конденсатора расположены при $z=0, h$ (h — толщина слоя), и нагреты до разной температуры $T(0)=\Theta$, $T(h)=0$. Здесь T — температура, отчитываемая от некоторого среднего значения, Θ — характерная разность температур. Случай $\Theta > 0$ соответствует нагреву снизу. Потенциал поля верхней границы равен нулю: $\varphi(h)=0$, потенциал нижней — изменяется со временем по гармоническому закону: $\varphi(0)=U \cos(\omega t)$. Здесь U — амплитуда напряжения, $\omega=2\pi\nu=2\pi/t_f$, где ν — частота, t_f — период модуляции.

Изучение электроконвекции проводилось на основе восьмимодовой модели [1]:

$$\begin{aligned} \dot{S} &= -gS + XU - gY \cos \omega t, & \dot{T} &= -gT - gW \cos \omega t, \\ \dot{U} &= -gU - XS - 2gZ \cos \omega t, & \dot{V} &= \text{Pr}(-dV + (rW + eS \cos \omega t)/d), \\ \dot{W} &= -dW + V, & \dot{X} &= \text{Pr}(-X + rY - eT \cos \omega t), \\ \dot{Y} &= -Y + X + XZ, & \dot{Z} &= -bZ - XY, \end{aligned} \quad (1)$$

где X, V — амплитуды пространственных гармоник функции тока, Y, Z, W — температуры, S, T, U — плотности заряда, r — эффективное тепловое число Рэлея и e — безразмерный электрический параметр; b, d — геометрические параметры; g — определяет отношение времени релаксации тепловых возмущений и возмущений заряда, k — волновое число, характеризующее периодичность электроконвективных структур вдоль конденсатора. Важным отличием системы (1) от модели Лоренца является то, что даже в статическом случае жидкость теряет устойчивость колебательным образом.

Проведено исследование эволюции течений для параметров $\text{Pr} = 400$, $\text{Pr}_e = 30$, соответствующих таким слабопроводящим жидкостям как конден-

саторные и трансформаторные масла [2], кукурузное масло Mazola [3] и интенсивности нагрева $r=0.8$. Значение волнового числа $k=0.933$ соответствует минимуму нейтральной кривой электроконвекции в отсутствии гравитации ($r=0$), при этом значения параметров таковы: $b=2,138$, $d=2,604$, $g=0,722$ [4, 5].

При частоте внешнего электрического поля $\nu=0,113$ при потере устойчивости в системе возникает периодический режим течения с основной частотой отклика $\nu_{\text{main}}=\nu$ и Фурье-спектром, содержащим одни нечетные гармоники внешней частоты. С увеличением электрического поля изменяется тип периодических колебаний. При $e=22,5$ (рис. 1) число Нуссельта через конвективную ячейку резко уменьшается, что соответствует изменению режима течения. Спектральный состав отклика системы для этого режима содержит в качестве главной гармоники удвоенную внешнюю частоту $\nu_{\text{main}}=2\nu$ и как четные, так и нечетные ее комбинации. С дальнейшим увеличением поля происходит каскад бифуркаций удвоения периода и при $e=24,28$ появляется хаос (рис. 1, точка *A*). При углублении в область хаоса наблюдается окно периодичности с колебаниями, соответствующими удвоенной внешней частоте $\nu_{\text{main}}=2\nu$ (рис. 1, область *I*).

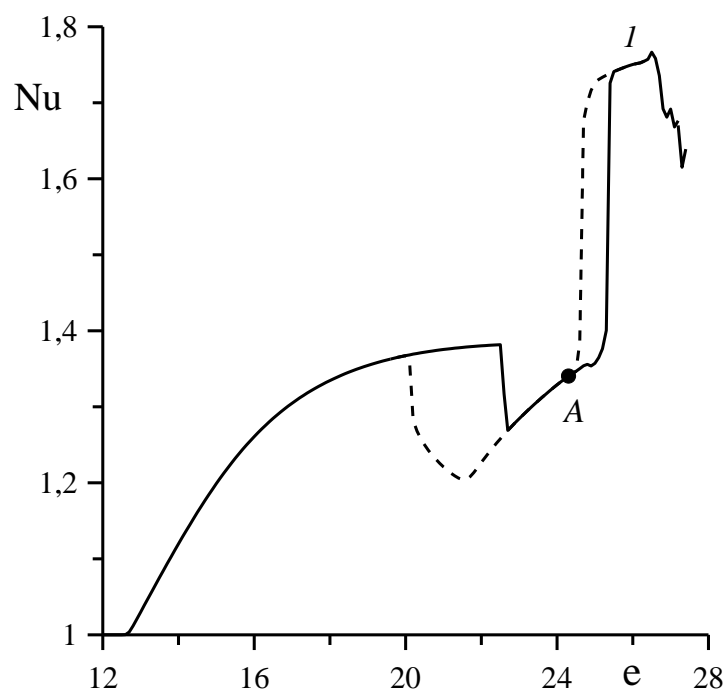


Рис. 1. График зависимости безразмерного теплопотока Nu от электрического числа e при $\nu=0,113$

При уменьшении электрического числа были обнаружены две гистерезисные петли (рис. 1, штриховая линия). Первая справа является продолжением окна периодичности в область хаоса. Петля, расположенная на рисунке 1 в интервале $20,0 < e < 22,5$ представляет собой гистерезисный переход между различными типами периодических колебаний. Зависимости числа Нуссельта, характеризующего теплопоток через конвективную ячейку, от

частоты приведены при различных значениях электрического числа Рэлея (рис. 2). Видно, что имеет место резонансное усиление теплопотока (числа Нуссельта), что связано с усилением интенсивности электроконвективных течений при совпадении частоты внешнего поля с собственной частотой конвективной ячейки. Сдвиг максимума числа Нуссельта в область высоких частот электрического числа Рэлея связан с ростом собственной частоты при увеличении напряженности электрического поля.

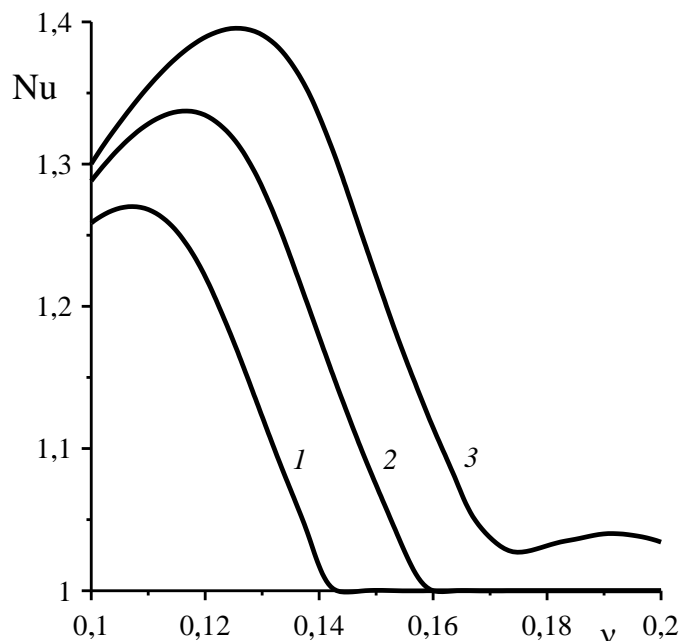


Рис. 2. График зависимости безразмерного теплопотока Nu от частоты внешнего поля ν . Линия 1 соответствует электрическому числу $e = 16$; 2 — $e = 18$; 3 — $e = 20$

Исследования выполнены при финансовой поддержке грантов РФФИ (№ 13-01-00171-А, 14-01-31253-мол_а).

Список литературы

1. Ильин В. А., Смородин Б. Л. Нелинейные режимы конвекции слабопроводящей жидкости // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. Вып. 8. С. 81–87.
2. Gross M. J., Porter J. E. Electrically induced convection in dielectric liquids // Nature. 1966. V. 212, N. 5068. P. 1343–1345.
3. Жданов С. А., Косвинцев С. Р., Макарихин И. Ю. Влияние электрического поля на устойчивость термогравитационного течения в вертикальном конденсаторе // ЖЭТФ. 2000. Т. 117, вып. 2. С. 398–406.
4. Ильин В. А., Смородин Б. Л. Нелинейные режимы конвекции слабопроводящей жидкости // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33, вып. 8. С. 81–87.
5. Ильин В. А. Электроконвекция слабопроводящей жидкости в постоянном электрическом поле // ЖТФ. 2013. Т. 83, вып. 1. С. 64–73.