

Переход к нестационарной термомагнитной конвекции в горизонтальной цилиндрической полости, подогреваемой снизу, в однородном внешнем магнитном поле

М.С.Краков¹, И.В.Никифоров²

¹Белорусский национальный технический университет

²Белорусский государственный университет

Термомагнитная конвекция в горизонтальной цилиндрической полости, заполненной магнитной жидкостью, подогреваемой снизу и находящейся в вертикальном магнитном поле, описывается безразмерной системой уравнений [1]

$$\nabla \cdot \mu(|\nabla F_i|, \theta) \nabla F_i = 0, \quad \Delta F_e = 0$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{1}{\text{Pr}} u \cdot \nabla \omega = \Delta \omega + \text{Ra} \frac{\partial \theta}{\partial x} + \text{Ra}_m \frac{\partial H}{\partial x} \frac{\partial \theta}{\partial y} - \frac{\partial H}{\partial y} \frac{\partial \theta}{\partial x}$$

$$\Delta \psi = -\omega, \text{Pr} \frac{\partial \theta_i}{\partial t} + u \cdot \nabla \theta_i = \Delta \theta_i, \text{Pr} \frac{\partial \theta_e}{\partial t} = \frac{\kappa_e}{\kappa_i} \Delta \theta_e \quad (1)$$

где индекс i относится к жидкости в полости, индекс e – к окружающей среде, F – потенциал магнитного поля, θ – безразмерная температура, $\omega = \text{rot} u$ – вихрь, u – скорость, ψ – функция тока, H – напряженность магнитного поля, безразмерные числа Рэлея, Прандтля и магнитное число Рэлея определены как

$$\text{Ra} = \frac{g \beta_m \gamma_i R^4}{\nu \kappa}, \text{Ra}_m = \frac{\mu_0 M_s^2 f^2 H \beta_m^2 \gamma_i^2 R^4}{\rho \nu \kappa \mu}, \text{Pr} = \frac{\nu}{\kappa}$$

Здесь M_s – намагниченность насыщения магнитной жидкости, зависимость намагниченности жидкости от магнитного поля и температуры внутри полости задана зависимостью $M(H) = M_s f(H) = M_s \chi_0 H / (1 + \chi_0 H) (1 - \beta_m \Delta T)$, γ_i – градиент температуры внутри полости, прочие обозначения стандартные.

В качестве граничных условий использовались условия прилипания для скорости, вихрь на границе вычислялся через функцию тока, для температуры задавался постоянный градиент на

внешней границе области и условия равенства температур и тепловых потоков на границе цилиндра, для магнитного поля использовались условия однородного поля на внешней границе области и условия равенства нормальной компоненты индукции и тангенциальной компоненты напряженности магнитного поля на границе цилиндра.

Задача решалась численно методом конечных объемов. В работе [1] решалась стационарная задача, т.е. полагалось, что все производные по времени в уравнениях (1) равны нулю. Были найдены граничные значения числа Рэлея и магнитного числа Рэлея, определяющие начало термомагнитной конвекции и структуры, в которых она реализуется (рис. 1). Было обнаружено, что конвективное течение вначале развивается в виде одной круговой ячейки (участок 1 – 2), которая при увеличении чисел Рэлея сменяется двумя ячейками (участок 2' – 6), симметричными относительно вертикальной плоскости. Однако не исследованным оставался вопрос о переходе к нестационарному режиму.

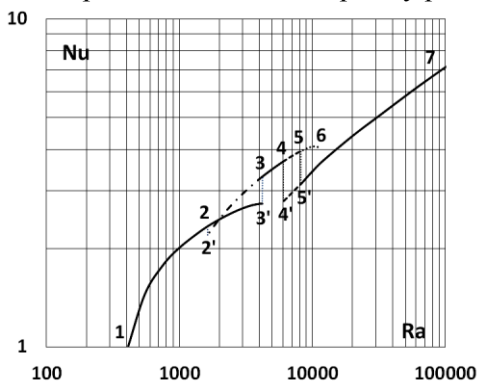


Рис.1. Зависимость интенсивности теплопереноса от числа Рэлея

В случае нестационарной задачи картина течения зависит от начальных условий. Если начальное течение отсутствует и мгновенно включается подогрев, то вначале конвективное течение развивается в виде одной ячейки (участок 1 -2), затем в виде двух ячеек (участок 2' – 4), после чего течение становится нестационарным (4' – 7). При постепенном подогреве, используя найденное решение при предыдущем значении числа Рэлея в качестве начального условия для следующего значения, картина

выглядит иначе: переход от одной ячейки к двум происходит в точке 3', стационарное течение реализуется вплоть до точки 5, но участок 5 – 6 остается нереализуемым, т.е. стационарное течение при этих числах Рэлея неустойчиво. Структура переходов в случае увеличения магнитного числа Рэлея аналогична.

Особый интерес представляет карта структур течения при различных ориентациях магнитного поля (рис.2). Ниже кривой 1 конвекции нет, между 1 и 2 одна ячейка, между 2 и 3 в зависимости от начальных условий либо одна, либо две, выше 3 – только две ячейки. Кривые 4, 4' и 4'' ограничивают стационарное течение. 4 – вертикальное магнитное поле, 4'' – горизонтальное, 4' – наклон 45°. Как видно, ориентация магнитного поля существенно влияет на переход к нестационарной конвекции.

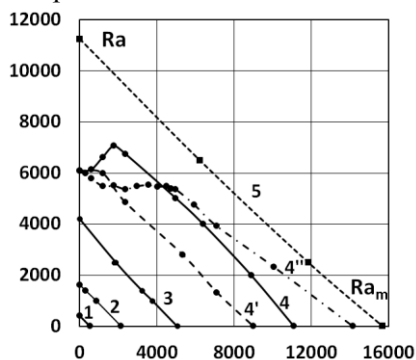


Рис.2. Карта конвективных структур

Литература

1. M.S.Krakov, I. V. Nikiforov. Natural convection in a horizontal cylindrical enclosure filled with a magnetic nanofluid: Influence of the uniform outer magnetic field. – Int. J. of Thermal Sciences, v. 133, Nov. 2018, Pages 41-54.