

УДК 536.25:538.4

В. К. ПОЛЕВИКОВ, В. Е. ФЕРТМАН

**ТЕПЛОВАЯ КОНВЕКЦИЯ В НЕОДНОРОДНОМ ПОЛЕ
МАССОВОЙ СИЛЫ**

(Представлено академиком АН БССР Р. И. Солоухиным)

В условиях, близких к невесомости, действующие на каждую материальную частицу аппарата слабые массовые силы могут вызвать конвективное движение в неизотермическом объеме жидкости. Возникновение и интенсивность конвекции в условиях незначительных перегрузок (ускорений) в космосе исследуются как в связи с проблемой термостабилизации топлива ⁽¹⁾, так и для оптимизации технологических процессов на борту космического аппарата ⁽²⁾. Оценка величины ускорений, возникающих под действием различных массовых сил при высоте круговой орбиты 1610 км, показала ⁽³⁾, что наибольшее значение имеют ускорения:

а) при вращении аппарата вокруг центра масс в связи с поддержанием его ориентации: $a_{ц} = 2,4 \cdot 10^{-7} g$;

б) из-за неоднородности внешнего гравитационного поля (Земли): $a_{вн} = 2,4 \cdot 10^{-7} g$;

в) при гравитационном взаимодействии с массой аппарата — самогравитации: $a_{с} = 3,3 \cdot 10^{-8} g$.

Все перечисленные массовые силы переменны по пространству. Представляет интерес определить особенности конвекции в неоднородном поле массовой силы по сравнению с постоянной силой, чтобы обоснованно проводить экспериментальное и численное моделирование процессов теплообмена в объемах жидкости в аппарате.

В работе ⁽⁴⁾ обсуждается возможность моделирования процессов тепловой конвекции в поле переменной массовой силы на магнитной жидкости (задаем $\nabla H \neq \text{const}$, где H — напряженность магнитного поля), так как роль силы тяжести при термомагнитной конвекции выполняет градиент напряженности магнитного поля ∇H .

В настоящей работе задавалась более сильная неоднородность поля массовой силы по сравнению с распределением центробежной ($a_{ц} \sim r$) и массовой сил в гравитационном поле цилиндрического аппарата ($a_{с} \sim 1/r$), чтобы выявить возможные новые физические эффекты.

Рассматривался цилиндрический сосуд радиусом r_2 и высотой l , полностью заполненный магнитной жидкостью, на оси симметрии которого расположен цилиндрический проводник с током радиуса r_1 . Исследования проводились на системе двухмерных безразмерных уравнений, описывающих в цилиндрических координатах термомагнитную конвекцию непроводящей несжимаемой магнитной жидкости при обычных предположениях Буссинеска ⁽⁵⁾. В цилиндрических координатах r и z она имеет вид

$$\frac{\partial(Rv_r T)}{\partial r} + \frac{\partial(Rv_z T)}{\partial z} = \frac{1}{\text{Pr}} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(R \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(R \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right], \quad (1)$$

$$\frac{\partial(Rv_r \varphi)}{\partial r} + \frac{\partial(Rv_z \varphi)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{R} \frac{\partial(R^2 \varphi)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(R \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) - \text{Gr}_m \frac{B(B+1)}{R^2} \frac{\partial T}{\partial z}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{R} \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{R} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) + \varphi R = 0, \quad (3)$$

$$v_r = \frac{1}{R} \frac{\partial \psi}{\partial z}, \quad v_z = -\frac{1}{R} \frac{\partial \psi}{\partial r}, \quad R = r + B, \quad B = \frac{r_2 - r_1}{r_1},$$

где T — температура; φ — вихрь; ψ — функция тока; v_r и v_z — компоненты скорости. Предполагалось, что распределение магнитного поля в жидкости не зависит от температурного режима среды. На поверхности проводника и сосуда задавались граничные условия первого рода, торцевые стенки предполагались теплоизолированными.

В такой постановке решения задачи определяются критериями подобия: числом Прандтля $\text{Pr} = \nu/\kappa$, магнитным числом Грасгофа $\text{Gr}_m = \mu_0 K G \gamma^{1/4} / \rho \nu^2$ и параметрами l/d и r_2/r_1 . Здесь $d = r_2 - r_1$; K — пироманитный коэффициент; G и γ — характерные градиенты магнитного поля и температуры; μ_0 — магнитная проницаемость вакуума; ρ — плотность.

Численные расчеты выполнялись методом сеток с использованием монотонной консервативной схемы второго порядка точности (6). Решение системы разностных уравнений осуществлялось итерационным методом Зейделя с релаксацией. Применялась квадратная сетка с шагом $1/20$.

Неоднородность поля магнитной силы, изменяющейся вдоль радиуса по закону $|\nabla H| \sim 1/r^2$, приводит к повышению границы устойчивости и уменьшению среднего теплообмена в цилиндрическом слое жидкости (рис. 1). При этом в области отношений радиусов $r_2/r_1 \leq 2$ средний тепловой поток изменяется в среднем на 5% по сравнению с соответствующей зависимостью для подогреваемого снизу горизонтального слоя жидкости в однородном поле силы тяжести (рис. 2). Следовательно, даже в условиях $a \sim 1/r^2$ при тепловых расчетах можно не учитывать неравномерность распределения массовой силы на расстояниях, соизмеримых с размерами космического корабля, и использовать осреднение массовой силы. Полученный результат соответствует выводам работы (7), где рассмотрено влияние распределения центробежной массовой силы на среднюю температуру свободной поверхности жидкости

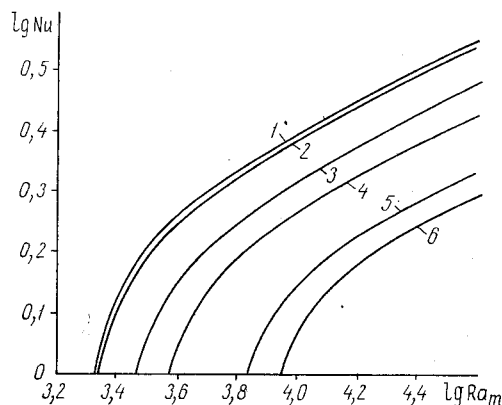


Рис. 1. Зависимость числа Нуссельта Nu от магнитного числа Релея Ra_m ($Ra_m = \text{Gr}_m \cdot \text{Pr}$); $l/d = 5$; $\text{Pr} = 35$: 1 — $r_2/r_1 = 1,05$; 2 — 1,5; 3 — 3,0; 4 — 5,0; 5 — 7,5; 6 — 10,0

во вращающемся цилиндрическом сосуде при непрерывном подводе тепла из окружающей среды и определен диапазон расстояний, в котором можно пользоваться осредненным значением массовой силы.

Отметим, что с увеличением числа Ra_m зависимость числа Нуссельта Nu от Ra_m становится степенной с показателем степени, практически не зависящим от r_2/r_1 и равным примерно $1/4$ (рис. 1), что, вообще говоря, характерно для теплообмена в условиях развитой ламинарной конвекции в однородном поле тяжести. Как и следовало ожидать, результаты расчета критического значения $Ra_m^{кр}$, при котором происходит

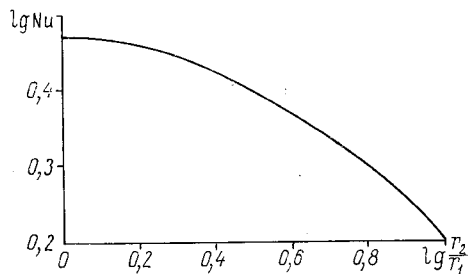


Рис. 2. Влияние кривизны слоя на конвективный теплообмен: $Ra_m = 1,75 \cdot 10^4$; $Pr = 35$; $l/d = 5$

потеря устойчивости равновесного состояния, в предельном случае $r_2/r_1 \rightarrow 1$ хорошо согласуются с известными результатами исследования конвективной устойчивости горизонтального слоя жидкости.

Авторы признательны В. И. Полежаеву за полезное обсуждение полученных результатов.

Summary

At distances commensurable with the space vehicle dimensions inhomogeneity of the self-gravitational bulk force distribution can be neglected in calculation of heat transfer in fluid volumes in space vehicles.

Литература

- ¹ Бабский В. Г., Копачевский Н. Д., Мышкис А. Д., Слобожанин Л. А., Тюпцов А. Д. Гидромеханика невесомости, М., 1976. ² Беляков И. Т., Борисов Ю. Д. Технология в космосе, М., 1974. ³ Пейнтер Г. В. в кн.: Двигательные установки ракет на жидком топливе, М., 1966. ⁴ Фертман В. Е. Магнитные жидкости — естественная конвекция и теплообмен, Минск, 1978. ⁵ Neuringer J. L., Rosensweig R. E. Phys. Fluids, 7, 12, 1927, 1964. ⁶ Полевиков В. К. Автореф. канд. дис., Минск, 1977. ⁷ Полежаев В. И. Космические исследования, 12, 6, 924, 1974.

Институт тепло- и массообмена
им. А. В. Лыкова АН БССР

Поступило 19.07.78