

УДК 532.517:536.25

ВЛИЯНИЕ ВРАЩЕНИЯ ВНЕШНЕЙ ГРАНИЦЫ НА РЕЖИМЫ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ В СФЕРИЧЕСКОМ СЛОЕ

© 2011 г.

А.В. Ряховский, А.В. Гореликов,

Сургутский госуниверситет ХМАО–Югры

echo47@rambler.ru

Поступила в редакцию 16.05.2011

Рассматривается задача о естественной конвекции во вращающемся сферическом слое в центральном поле тяжести. Представлены результаты численного исследования естественной конвекции при различных значениях скорости вращения внешней границы сферического слоя. Получены нестационарные, периодические по времени режимы конвекции, не обладающие осевой симметрией.

Ключевые слова: численное моделирование, естественная конвекция, сферический слой, вращение.

Постановка задачи

Исследование естественной конвекции во вращающихся сферических слоях в центральном поле тяжести актуально для решения многих фундаментальных проблем геодинамики, астрофизики и физики атмосферы. В их числе задача о генерации геомагнитного поля. Существуют принципиально различные модели геомагнетизма [1, 2], но во всех этих моделях естественная конвекция во внешнем ядре Земли является механизмом, создающим и поддерживающим магнитное поле. Основной моделью генерации магнитного поля Земли в настоящее время является модель геодинамо. В работах [3, 4] по исследованию конвекции и МГД-течений получен ряд важных результатов, касающихся инверсии геомагнитного поля и восточного дрейфа твердого внутреннего ядра Земли. Восточный дрейф внутреннего ядра был подтвержден экспериментально на основе изучения сейсмологических данных в работах [5, 6].

В настоящей работе численно исследуются ламинарные режимы естественной конвекции во вращающемся сферическом слое ($A \leq R \leq A + 1$) в центральном поле тяжести. Постановка задачи учитывает некоторые реальные условия конвекции во внешнем ядре Земли. Внешняя граница сферического слоя ($R = A + 1$) равномерно вращается с угловой скоростью Ω_0 . Предполагается, что внутри сферического слоя находится твердый однородный шар (ядро), который может вращаться под действием сил вязкого трения со стороны жидкости. Задача естественной конвекции решалась в полной трехмерной постановке в инерциальной системе отсче-

та. Математическая модель состоит из системы уравнений свободной конвекции в приближении Буссинеска и граничных условий, которые при $R = A$ содержат уравнение движения твердого ядра.

Результаты расчетов

При численном решении использовался метод контрольного объема [7] в сферических координатах. Дискретные аналоги получены с использованием неявной схемы и схемы со степенным законом для аппроксимации конвективных и диффузионных потоков на гранях контрольных объемов. Расчет поля течения производился по алгоритму SIMPLER [7]. Программный код распараллелен с помощью директив стандарта OpenMP для использования на многопроцессорных вычислительных системах с общей памятью. Скорость выполнения многопоточного кода на четырехъядерном процессоре класса Intel Core 2 Quad при расчете на сетке ($N_r = 62$, $N_\theta = 82$, $N_\varphi = 122$) увеличивается примерно в 2.2 раза по сравнению со скоростью выполнения однопоточного кода.

Расчеты проводились при фиксированных значениях чисел Прандтля ($Pr = 1$) и Рэлея ($Ra = 10^4$). Безразмерные значения радиуса и момента инерции внутреннего ядра выбирались таким образом, чтобы они соответствовали параметрам ядра Земли [8]: $A = 0.56$, $J = 0.1$. Угловая скорость вращения внешней границы сферического слоя Ω_0 варьировалась в диапазоне значений от 5 до 120.

Результаты расчетов показывают, что стационарные осесимметричные решения формиру-

ются при малых значениях Ω_0 ($\Omega_0 < 30$). В остальных случаях решения нестационарны. При $\Omega_0 = 30$ конвекция переходит в режим колебаний, в котором локальные величины периодически изменяются с течением времени. На рис. 1 показаны: *a, в* – изоповерхности температуры; *б, г* – линии тока тангенциальных составляющих скорости на сферической поверхности ($R = 1.452$) в системе отсчета, равномерно вращающейся вместе с внешней границей слоя, цветом показано распределение давления, темный цвет соответствуют более низким значениям давления. Характерные изоповерхности температуры приобретают седловидную форму (рис. 1*a*). Данная конвективная структура (рис. 1*a, б*), не меняя размеров и форм изоповерхностей всех величин (температуры, давления, компонент скорости), равномерно вращается вокруг оси Oz в направлении вращения границ слоя, т.е. представляет собой азимутальную волну. Скорости вращения внутреннего ядра и азимутальной волны в этом случае выше скорости вращения внешней границы слоя.

Другой тип периодического решения был получен при $\Omega_0 = 75$ (рис. 1*в, г*). На рис. 1*в* показан вид сверху на характерную для данного режима конвекции поверхность постоянной температуры. Структура конвективного течения состоит из трех основных ячеек, вершины которых приблизительно совпадают с вершинами равностороннего треугольника в плоскости экватора. Скорость азимутального вращения основных конвективных ячеек в данном случае ниже скорости внешней границы слоя. На рис. 1*г* показана структура течения в северном полушарии. Течение в каждом полушарии состоит из трех циклонов и трех антициклонов.

которым движутся частицы жидкости в конвективных ячейках. Это приводит к уменьшению радиальных размеров конвективных ячеек и, как следствие, ослабляет конвективный перенос тепла.

При равномерном вращении сферического слоя момент импульса жидкости достигает наибольших значений в области экватора у внешней границы слоя. Естественная конвекция приводит к перераспределению момента импульса, в результате чего может изменяться скорость вращения внутреннего ядра. Во всех рассмотренных случаях угловая скорость вращения твердого внутреннего ядра больше скорости вращения внешней границы слоя жидкости, т.е. имеет место восточный дрейф внутреннего ядра. Для нестационарных режимов конвекции отношение скорости вращения твердого ядра к скорости внешней границы близко к единице.

Заключение

Проведена серия численных экспериментов по исследованию естественной конвекции во вращающемся сферическом слое при $Ra = 10^4$, в которой варьировалась скорость вращения внешней границы. Результаты исследования показывают, что только при малых скоростях вращения внешней границы ($\Omega_0 < 30$) решения стационарны и обладают осевой симметрией. В остальных случаях ($30 \leq \Omega_0 \leq 100$) формируются нестационарные режимы конвекции без осевой симметрии. Получены два различных типа нестационарных режимов конвекции, в которых локальные величины изменяются периодически, а интегральные характеристики имеют постоянные значения.

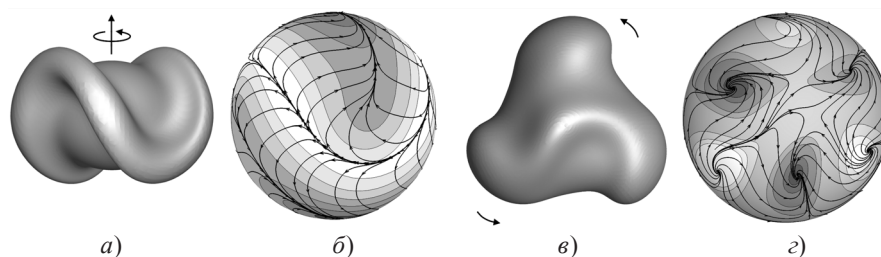


Рис. 1

При дальнейшем увеличении скорости вращения внешней границы естественная конвекция ослабевает и полностью прекращается при $\Omega_0 = 120$. Уменьшение интенсивности конвекции обусловлено действием силы Кориолиса. Сила Кориолиса растет пропорционально Ω_0 и уменьшает радиусы кривизны траекторий, по

Список литературы

1. Решетняк М.Ю. // Докл. РАН. 2001. Т. 380, №5. С. 685.
2. Кирдяшкин А.Г., Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.А. // Геология и геофизика. 2000. Т. 41, №5. С. 601.

3. Glatzmaier G.A., Roberts P.H. // Phys. Earth Planet. Inter. 1995. V. 91. P. 63.
4. Glatzmaier G.A., Roberts P.H. // Nature. 1995. V. 377. P. 203.
5. Song X., Richards P.G. // Nature. 1996. V. 382. P. 221.
6. Su W., Dziewonski A., Jeanloz R. // Science. 1996. V. 274. P. 1883.
7. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.
8. Сохотин О.Г., Ушаков С.А. Развитие Земли: Учебник / Под. ред. В.А. Садовниченко. М.: МГУ, 2002ю 560 с.

THE EFFECT OF ROTATION OF THE OUTER BORDER ON NATURAL CONVECTION IN A SPHERICAL SHELL

A.V. Ryakhovsky, A.V. Gorelikov

The problem of natural convection in a rotating spherical shell in a central gravitational field is investigated. Three-dimensional governing equations were solved numerically using the control volume method. Numerical simulations of natural convection were performed for various angular velocities of the outer border of the spherical shell. Nonstationary, periodic in time, non-axisymmetric solutions were obtained.

Keywords: numerical simulation, natural convection, spherical shell, rotation.