

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ И ТЕПЛООБМЕНА ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ЗАМКНУТОМ КОНТУРЕ

АННОТАЦИЯ

Численно исследована нестационарная трехмерная естественная конвекция воздуха ($Pr = 0.72$), развивающаяся в замкнутом контуре благодаря плавучести в поле центробежной силы. Контур полагается нагретым на периферии. Рассмотрено два варианта вращения контура: один, когда плоскость контура и плоскость вращения совпадают, и другой, когда плоскость контура перпендикулярна плоскости вращения. Осредненные во времени результаты расчета представлены для значения числа Релея $1.6 \cdot 10^9$. Отмечено, что в контуре развивается интенсивное циркуляционное течение, причем для первого варианта циркулирующий расход заметно выше, чем для второго. Средняя теплоотдача на характерных поверхностях контура в первом варианте более неоднородна, чем во втором, однако средняя по всем поверхностям теплоотдача для обоих вариантов различается незначительно.

1. ВВЕДЕНИЕ

Вытянутые вдоль вектора объемной силы полости, внутри которых внешние термические условия создают неустойчивую стратификацию, служат устройствами для передачи теплоты, известными как термосифоны. Естественная конвекция в неподвижных термосифонах развивается из-за противоположного направления гравитационной силы и интегрального потока тепла. Эта конвекция исследована подробно (см., например, [1]). Слабо исследована конвекция во вращающихся термосифонах.

В быстро вращающейся полости ($\Omega^2 R \gg g$), вытянутой вдоль радиуса вращения R и нагреваемой на периферии, радиальное течение возникает из-за неустойчивой стратификации в поле центробежной силы. Действие силы Кориолиса, вызванной радиальным потоком, приводит к специфическим эффектам: развитию вторичных течений, отбору определенного типа вихревых структур и стремлению картины течения к двумеризации.

Влияние вращения на течение и теплообмен внутри сравнительно коротких параллелепипедов (с отношением высоты к основанию 3:1) рассмотрено нами в предыдущих работах [2, 3]. Показано, что при значении числа Релея $4.3 \cdot 10^6$ в неподвижной полости развивается турбулентная конвекция, а в во вращающейся полости - квазипериодическая конвекция с тремя ведущими частотами. При этом во вращающейся полости теплоотдача заметно выше, чем в неподвижной.

Особенности естественной конвекции внутри длинного параллелепипеда (с отношением размеров

10:1) в широком диапазоне изменения числа Релея рассмотрены в работе [4]. Получены режимы течения от стационарного ламинарного до стохастического. Показано, что в полости развивается циклоническая циркуляция, охватывающая практически весь ее объем. Эта циркуляция определяет в основном параметры теплоотдачи.

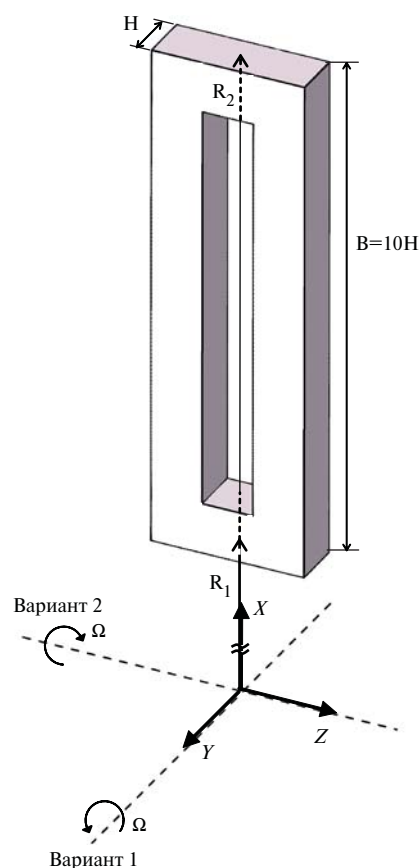


Рис. 1. Вращающийся контур и два варианта его положения относительно осей вращения

В настоящей работе представлены результаты численного исследования течения и теплообмена при естественной конвекции во вращающемся замкнутом контуре, составленном из каналов квадратного сечения (рис. 1). Такого вида контур может служить упрощенной моделью замкнутой системы охлаждения ротора или рабочей лопатки газовой турбины [5], а также моделью радиального охлаждающего устройства для иных образцов вращающихся систем.

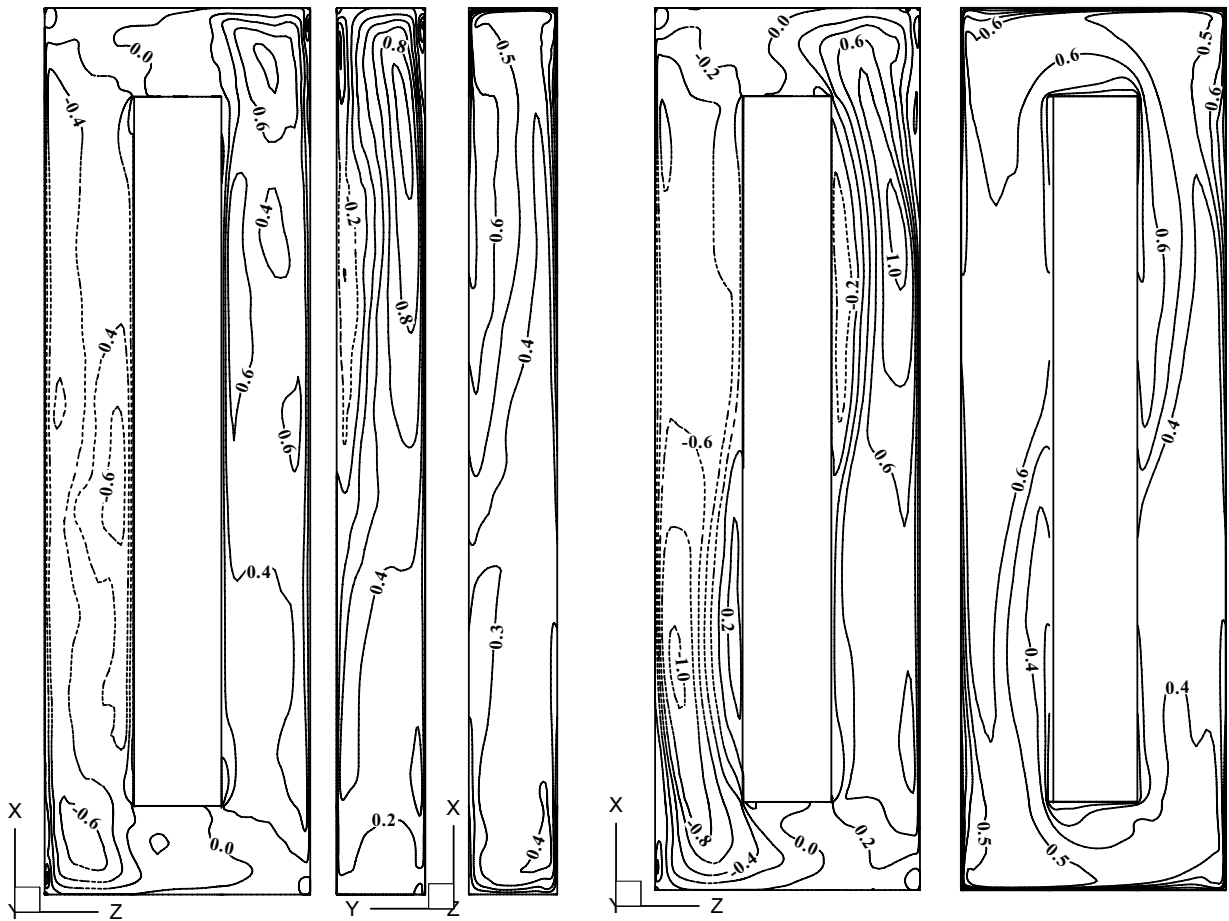


Рис. 2. Поля x -компоненты скорости (a, c, d) и температуры (b, e): (a, b) – вариант 1, среднее продольное сечение контура; (c, d, e) – вариант 2, (c) – среднее продольное сечение контура, (d, e) – среднее сечение соседнего (вид (c)) участка контура, параллельное плоскости вращения

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ

Замкнутый контур (рис. 1) образован четырьмя прямыми каналами квадратного сечения ($H \times H$), два из которых имеют длину $B = R_2 - R_1 = 10H$, а длина двух других равна H . Контур расположен на большом удалении от оси вращения так, что $R_2/R_1 = 1.16$, и изменение центростремительного ускорения вдоль контура мало по сравнению с его значением на среднем радиусе вращения R_m .

Рассмотрены два варианта ориентации контура относительно оси вращения (рис.1): вариант 1, в котором плоскость контура совпадает с плоскостью вращения, и вариант 2, в котором плоскость контура перпендикулярна плоскости вращения.

Контур полагается обогреваемым на периферии. На удаленной от оси вращения поверхности внешнего обвода контура задана температура T_e , а на противоположной поверхности, приближенной к оси вращения, – температура T_i , причем $T_e > T_i$. На остальных поверхностях температура меняется линейно от T_e до T_i . Контур вращается достаточно быстро, чтобы можно было пренебречь плавучестью в гравитационном поле ($\Omega^2 R_m \gg g$).

Естественная конвекция в полости определяется числом Рейля $Ra = Pr \cdot \varepsilon_T \cdot \Omega^2 \cdot R_m \cdot B^3 / \nu^2$, параметром вращения $K = \Omega \cdot B / V_b$, числом Прандтля Pr и температурным фактором $\varepsilon_T = 2 \cdot (T_e - T_i) / (T_e + T_i)$, где $V_b = \Omega \cdot B \cdot \varepsilon_T^{0.5}$ – скорость плавучести.

В расчетах полагалось, что полость заполнена газом с $Pr = 0.72$. Температурный фактор $\varepsilon_T = 1$ и параметр вращения $K = 1$. В работе приводятся данные, полученные для числа Рейля, равного $1.6 \cdot 10^9$.

Нестационарное течение и теплообмен описываются уравнениями Навье—Стокса в относительной системе координат. Эффект плавучести учитывается в приближении Буссинеска.

Численное моделирование проведено с помощью программы SINF [6], основанной на методе конечного объема. Пространственная и временная дискретизация уравнений выполнена со вторым порядком точности.

Область течения покрыта четырехблочной структурированной сеткой размерностью 870000 ячеек. Для указанного числа Рейля величина безразмерного шага по времени $\Delta t \cdot (\Omega \varepsilon_T^{1/2})$ была выбрана равной 0.05, что обеспечило достаточное разрешение течения во времени.

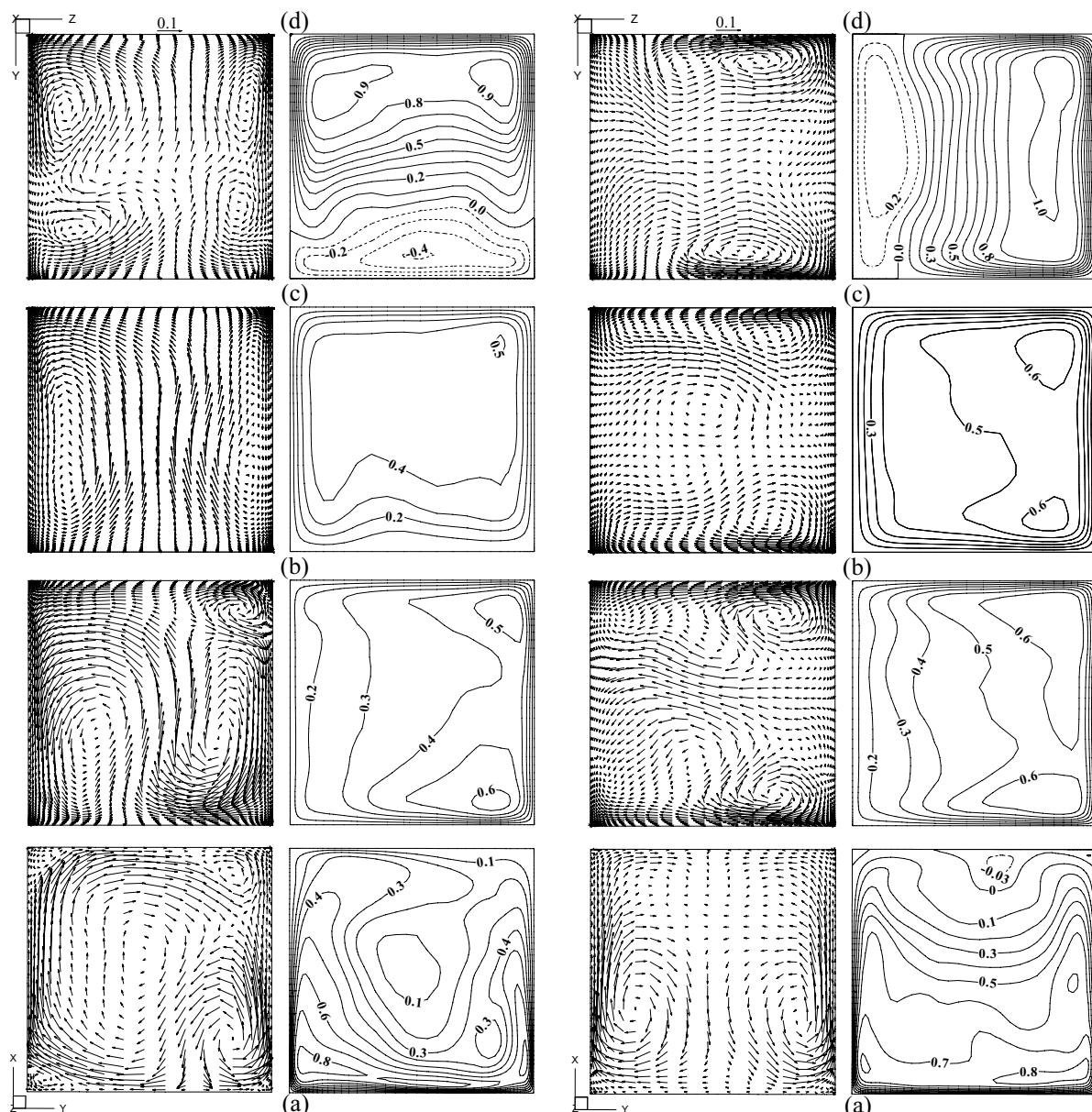


Рис. 3. Векторы поперечной скорости и контуры продольной скорости для вариантов 1 (слева) и 2 (справа) в среднем поперечном сечении короткого участка (а), лежащего в основании контура, и в поперечных сечениях вытянутого участка, отстоящих от основания на расстояниях $x = 2H$ (b), $x = 4H$ (c) и $x = 7H$ (d)

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА И ОБСУЖДЕНИЕ

Расчеты течения для обоих вариантов вращения контура были проведены более чем на 20 единицах времени. За время порядка 15 единиц в контуре формировались стохастические режимы течения, которые с учетом разрешения вихревых структур на использованной сетке можно трактовать как турбулентные режимы с относительно малым числом пространственных мод. Наблюдения за изменением локальных параметров в точках мониторинга и фиксации расхода циркулирующей среды на каждом временном шаге показали, что на последних пяти единицах времени осредненные величины практически не меняются. В этом интервале времени в работе [7] даны изображения мгновенных полей скорости и температуры по всему контуру. В настоящей работе

данные о полях скорости и температуры представлены осредненными по времени.

На рис. 2 показаны поля x -компоненты скорости и температуры в продольных сечениях контура для двух вариантов вращения. Видно, что в обоих вариантах в контуре формируется циклональное циркуляционное течение. Для варианта 1 такое направление циркуляции является характерным. В работе [4] такое же направление циркуляции отмечено и для вытянутого параллелепипеда. Для варианта 2 циклональное и антициклональное направления циркуляции в принципе равноправны. Отбор направления циркуляции здесь может быть связан либо с несимметрией начальных условий, либо с несимметрией возмущений, генерируемых численным алгоритмом. Значения расхода газа даны в таблице 1.

Осредненные поля скорости и температуры для варианта 1 почти центрально симметричны. В варианте 2 черты этой симметрии выражены не столь отчетливо и могут быть замечены лишь при более детальном анализе полей. Возможно, это связано с недостаточным временем осреднения для варианта 2.

В обоих вариантах отчетливо видны области обратных течений в удлинённых частях контура. Сопоставляя поля скорости и температуры, можно заключить, что формирование этих областей вызвано локальным проявлением эффекта плавучести в поле центробежной силы.

Картины поперечных течений и распределения продольной скорости даны на рис. 3. В варианте 1 видно, что пара вихрей, формируемая силой Кориолиса на длинном отрезке контура, полностью пронизывает циркулирующий поток, сохраняясь и на коротком отрезке. При этом поле продольной скорости на длинном отрезке приобретает вид, характерный для вынужденного течения в радиальных вращающихся каналах, со смещением максимума скорости к стороне повышенного давления.

В варианте 2 структура поперечного течения более сложная. На длинном участке контура отмеченное выше парное вихревое течение не успевает сформироваться. На коротком участке поперечное течение выглядит как течение с одним превалирующим вихрем, который на длинном участке постепенно трансформируется в течение с четырьмя почти одинаковыми вихрями. Многовихревая структура делает продольное течение на середине длинного участка однородным по поперечному сечению. Такая же особенность течения была отмечена при вынужденном турбулентном течении в сходным образом вращающемся U-образном канале [8]. Влияние силы Кориолиса в варианте 2 отражается выравниванием поля продольной скорости к концу длинного участка в направлении оси z , параллельной оси вращения.

Данные о средней теплоотдаче на поверхностях контура сведены в табл. 1. Для обоих вариантов средняя по всей поверхности контура теплоотдача отличается незначительно. Сравнивая теплоотдачу на разных частях поверхности, можно заключить, что ее наибольший уровень имеет место на коротких отрезках контура, где резкие повороты сближены.

Таблица 1. Интегральные параметры

	Var. 1	Var. 2
Расход циркулирующей среды	$4.2 \cdot 10^{-3}$	$3.2 \cdot 10^{-3}$
Среднее число Нуссельта на всей поверхности контура	8.3	8.0
В том числе:		
- на плоских поверхностях	7.7	6.9
- на внешней опоясывающей поверхности	11.7	11.0
- на меньших частях этой поверхности, перпендикулярных радиусу вращения	35.8	34.0
- на внутренней опоясывающей поверхности	2.1	6.4

Наименьшая теплоотдача наблюдается на внутренней опоясывающей поверхности, особенно в варианте 1, где эта поверхность на обоих длинных отрезках является стороной с пониженным уровнем продольной скорости и поперечным течением, направленным от стенки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Во вращающемся замкнутом контуре при наложенных извне тепловых условиях, создающих неустойчивую стратификацию, развивается глобальная циркуляция, интенсивность которой наибольшая в том случае, когда плоскость контура и плоскость вращения совпадают. В этом случае по сравнению с вариантом, в котором плоскость контура перпендикулярна плоскости вращения, более упорядочена и картина вторичных течений, расход циркулирующей среды заметно выше. Вместе с тем при наблюдающихся существенных различиях в картинах течения средняя по всему контуру теплоотдача слабо зависит от ориентации контура относительно оси вращения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 04-02-16531.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mallinson G. D., Graham A. D., de Vahl Davis G. Three-dimensional flow in a closed thermosyphon // *J. Fluid Mech.*, 1981. 109. P. 259-275.
2. Kirillov A.I., Kitanina E.E., Ris V.V., Smirnov E.M. Three-dimensional unsteady natural convection in rectangular or sector-like rotating cavities heated from the periphery // 12th Int. Heat Transfer Conference, Grenoble, CD-ROM publ. 2002. 6 p.
3. Кириллов А.И., Китанина Е.Э., Рис В.В., Смирнов Е.М. Численное моделирование свободной конвекции воздуха в быстровращающихся полостях при интегральном переносе тепла в радиальном направлении // Труды РНКТ-3. Том 3. МЭИ, 2002. С.83-86.
4. Китанина Е.Э. Течение и теплообмен во вращающемся воздушном термосифоне: результаты расчетов для стационарного и нестационарного режимов // Труды XV Школы-семинара молодых ученых и специалистов под рук. А.И. Леонтьева. Т. 2. МЭИ, 2005. С.289-292.
5. El-Masri M.A. A proposed regenerative thermosyphon blade cooling system for high efficiency gas turbines // *Heat and Mass Transfer in Rotating Machinery*, Edited by Metzger, D.E. and Afgan, N.H., Hemisphere, 1984. P. 645-658.
6. Смирнов Е.М., Зайцев Д.К. Метод конечных объемов в приложении к задачам гидрогазодинамики и теплообмена в областях сложной геометрии // Научно-технические ведомости. Изд. СПбГПУ. 2004. № 2. С. 70-81.
7. Kirillov A.I., Kitanina E.E., Ris V.V., Smirnov, E.M. Numerical study of centrifugal-buoyancy phenomena in an elongated loop-shaped domain with radial heat flow // 13th Int. Heat Transfer Conference, Sydney, 2006 (принята к опубликованию).
8. Kirillov A.I., Ris V.V., Smirnov E.M., Zajtsev D.K. Numerical simulation of local heat transfer in rotating two-pass square channels, *Heat Transfer in Gas Turbine Systems. Annals of the New York Academy of Sciences*. 2001. 934. P. 456-463.