

На правах рукописи

САФИУЛЛИНА
Марина Вадимовна

**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ В
ДВУХМЕРНОЙ И ТРЕХМЕРНОЙ
НАКЛОННЫХ ПОЛОСТЯХ**

01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Тюмень – 2008

Работа выполнена в лаборатории вычислительной гидродинамики
ГОУ ВПО Тюменский государственный университет

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор **Зубков Павел Тихонович**

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор **Кутушев Анвар Гумерович**

доктор физико-математических наук,
профессор **Черкасов Сергей Гелиевич**

Ведущая организация: ГОУ ВПО Пермский государственный
университет

Защита диссертации состоится « 21 » ноября 2008 г. в « 14³⁰ » часов на заседании диссертационного совета ДМ 212.274.09 при Тюменском государственном университете по адресу 625003, г. Тюмень, ул. Перекопская 15А.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тюменского государственного университета.

Автореферат разослан « 17 » октября 2008 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук



Н.Г. Мусакаев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Изучение естественной конвекции связано с определением параметров течения жидкости или газа, обеспечивающих увеличение переносимой через полость энергии. Нестационарный свободно-конвективный теплоперенос в полостях при периодически изменяющихся во времени граничных условиях довольно подробно изучен в течение последних двух десятилетий. В предшествующих публикациях не рассмотрены процессы конвективного переноса тепла в зависимости от угла наклона полости.

Задача о распространении температурных волн в некоторой среде является классическим примером приложения математической теории теплопроводности к изучению явлений природы. Это связано с тем, что температура на поверхности земли носит ярко выраженную суточную и годовую периодичность. Также данная задача является характерной задачей без начальных условий, так как при многократном повторении температурного хода на границе влияние начальной температуры будет меньше влияния других факторов, которыми обычно пренебрегают.

Изучение гистерезиса связано с разными путями эволюции течения в зависимости от начальных условий и величин внешних параметров, оказывающих определяющее влияние на картину течения и теплообмен. Различные стационарные и автоколебательные гидродинамические структуры и связанные с ними величины теплопереноса, главным образом, получены для случая нелинейной зависимости плотности от температуры. Ранее явление гистерезиса было получено для холодной воды вблизи точки инверсии плотности в наклонной полости.

Интерес к задачам естественной конвекции обусловлен их немаловажностью для понимания явлений, возникающих в различных

технологических процессах (при охлаждении электрических схем, утилизации солнечной энергии, нагреве и охлаждении помещений и т.п.).

Цель работы

Численное исследование свободно-конвективного переноса тепла в двухмерной и трехмерной наклонной полости квадратной и кубической формы.

Научная новизна

- Определены условия, при которых существует направленный поток энергии от поверхности к поверхности с равными в среднем за период температурами.
- Найдены условия, при которых рассматриваемая область работает как тепловой диод.
- Выявлены условия, когда возможен перенос тепла от более холодной (в среднем за период) стенки к более теплой за счет естественно-конвективного движения жидкости.
- Получено явление гистерезиса для жидкости с линейной зависимостью плотности от температуры.

Практическая значимость

Результаты исследований могут быть использованы в строительстве для оптимального расположения нагревательных приборов в сооружениях, в топливно-энергетическом комплексе для предотвращения замерзания жидкостей и в других отраслях промышленности.

На основе проведенных численных исследований возможно построение установок для получения энергии за счет работы сил гравитации и периодических изменений температуры в атмосфере.

Методы исследования

При решении поставленных задач использованы методы, основанные на общих законах механики жидкости и газа, и современные методы вычислительной гидродинамики.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы были представлены на следующих конференциях: Международная конференция «Современные проблемы тепловой конвекции» (Россия, Пермь, ноябрь 2003), XLII Международная научная студенческая конференция «Студент и научно-технический прогресс» (Россия, Новосибирск, апрель 2004), ICNMT International Symposium on Advances in Computational Heat Transfer, (Норвегия, апрель 2004), VIII Всероссийская конференция молодых ученых «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» (Россия, Новосибирск, октябрь 2004), Межрегиональная конференция, посвященная 30-летию факультета математики и компьютерных наук Тюменского государственного университета «Современные математические методы и информационные технологии в образовании» (Россия, Тюмень, апрель 2005), Всероссийская конференция молодых ученых (с международным участием) «Неравновесные процессы в сплошных средах» (Россия, Пермь, декабрь 2007).

Публикации

Основные результаты по теме диссертационного исследования изложены в 12 публикациях, список которых представлен в конце автореферата.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 74 страниц, содержит 43 рисунка. В библиографии представлено 48 наименований работ российских и зарубежных авторов.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражена актуальность темы, определены цели исследования, отмечены научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе диссертационной работы проводится анализ литературных источников с точки зрения современного состояния и проблем в решении следующих задач: двумерные и трехмерные процессы конвекции жидкостей в замкнутых полостях. Приведена система уравнений свободной конвекции, описаны варианты граничных условий для исследуемых задач.

В пункте 1.1 дан обзор литературы по вопросам исследований естественно-конвективных течений жидкости.

В пункте 1.2 описывается система уравнений свободной конвекции в приближении Буссинеска.

В пункте 1.3 сформулирована общая постановка задач исследования: заполненная жидкостью полость находится в поле силы тяжести под углом наклона α к горизонту (рис. 1); течение ламинарное; жидкость несжимаемая, все ее теплофизические свойства – постоянные (за исключением плотности в источниковом члене уравнения движения). Температура на левой и правой вертикальных стенках изменяется определенным образом. Остальные стенки считаются теплоизолированными.

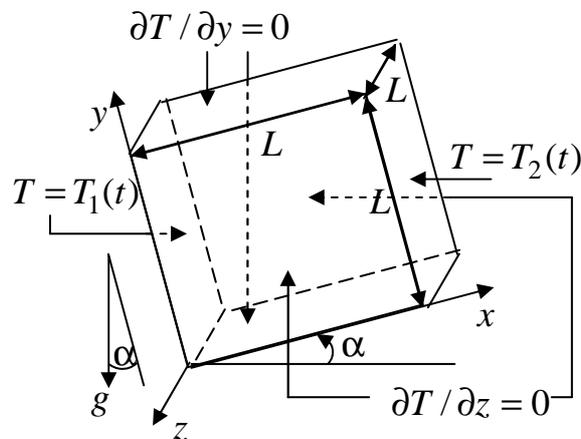


Рис. 1. Исследуемая область и граничные условия.

Приведена система уравнений Навье-Стокса в приближении Буссинеска. На всех стенках полости для составляющих вектора скорости заданы условия прилипания. Описаны различные условия на вертикальных стенках рассматриваемой полости.

Во второй главе рассматривается полость, температура двух противоположных стенок которой изменяется периодически с течением времени $T(t) = T_0 + T_1 \sin \omega t$.

Задача решается в безразмерном виде. В качестве безразмерных параметров выступают числа Грасгофа и Прандтля, безразмерная частота. Расчеты проводятся на сетке 50×50 контрольных объемов. Значения параметров: $Pr = 1$, $Gr = 3 \cdot 10^5, 5 \cdot 10^5$, $0 \leq f \leq 500\pi$, $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$. Основными характеристика задачи являются осредненный тепловой поток через правую границу и средний тепловой поток за период.

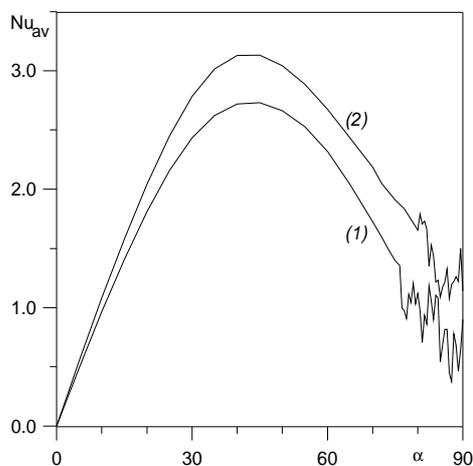


Рис. 2. Зависимость среднего теплового потока за период от угла наклона при $f = 100\pi$ и $Gr = 3 \cdot 10^5$ (1), $Gr = 5 \cdot 10^5$ (2)

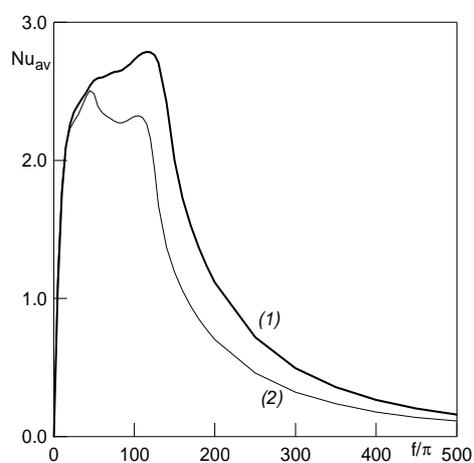


Рис. 3. Зависимость среднего теплового потока от безразмерной частоты при $Gr = 3 \cdot 10^5$ и $\alpha = 45^\circ$ (1), $\alpha = 60^\circ$ (2)

На рис. 2 представлена зависимость среднего теплового потока за период от угла наклона при $f = 100\pi$ для двух значений числа Грасгофа. Видно, что с ростом числа Грасгофа характеры поведения теплового потока в течение периода колебаний подобны, амплитуда же колебаний увеличивается. В

диапазоне угла наклона $76^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ для обеих кривых наблюдаются неперiodические «колебания» теплового потока. Это объясняется неустойчивостью системы при значениях угла наклона, близких к 90° .

На рис. 3 представлена зависимость среднего теплового потока от частоты при двух значениях угла наклона. В обоих случаях с ростом частоты тепловой поток вначале резко возрастает, затем для $\alpha = 45^\circ$ достигает максимального значения при $f = 115\pi$. Далее осредненный тепловой поток монотонно убывает и в пределе при $f \rightarrow \infty$ он будет нулевым. Следует отметить существенно нелинейный характер данной зависимости при $\alpha = 60^\circ$. Изменение среднего теплового потока носит сложный характер с двумя локальными максимумами и одним локальным минимумом.

В главе III рассматривается передача тепла через квадратную ячейку. Правая стенка поддерживается при постоянной температуре T_0 , противоположная ей – при периодически изменяющейся температуре $T(t) = T_0 + T_1 \sin \omega t$.

Задача решается в безразмерном виде. Безразмерная температура определяется как $\theta = (T - T_0)/T_1$.

В качестве параметров выступают числа Грасгофа и Прандтля, безразмерная частота колебаний температуры на левой стенке.

Численное моделирование проводится методом контрольного объема с помощью модифицированного алгоритма SIMPLER, с использованием схемы степенного закона и второго порядка аппроксимации граничных условий. Результаты получены на сетке 50×50 контрольных объемов. Значения безразмерных параметров: $Pr = 1$; $Gr = 2 \cdot 10^5, 3 \cdot 10^5$; $0 \leq f \leq 320\pi$. Угол наклона к горизонту изменяется в пределах $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$. В качестве основных характеристик задачи рассматриваются осредненный тепловой поток через правую границу и средний тепловой поток за период.

Если угол наклона $\alpha = 0^\circ$, температура левой стенки (в среднем за период колебаний) равна температуре правой стенки, то осредненный тепловой поток через ячейку за период будет равен нулю.

Рассмотрим случай, когда $\alpha > 0^\circ$. Допустим, температура левой стенки превышает температуры на правой, тогда имеется стратификация, которая способствует конвективному движению жидкости в квадрате. В течение этой части периода тепло переносится как за счет теплопроводности, так и за счет конвекции. Когда же температура на левой стенки ниже температуры правой, стратификация гасит конвективные течения, и тепло через левую стенку переносится главным образом за счет теплопроводности. Следовательно, суммарно за период через стенку с периодически меняющейся температурой поступление тепла может превысить его потери. Таким образом, через ячейку может передаваться отличный от нуля тепловой поток за период колебаний температуры левой стенки.

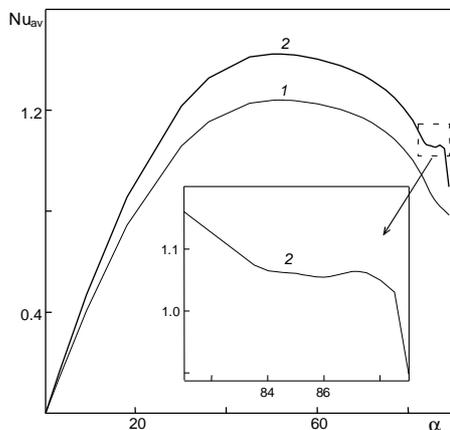


Рис. 4. Зависимость среднего теплового потока за период от угла наклона при $Gr = 2 \cdot 10^5$ (1) и $Gr = 3 \cdot 10^5$ (2) для $f = 20\pi$

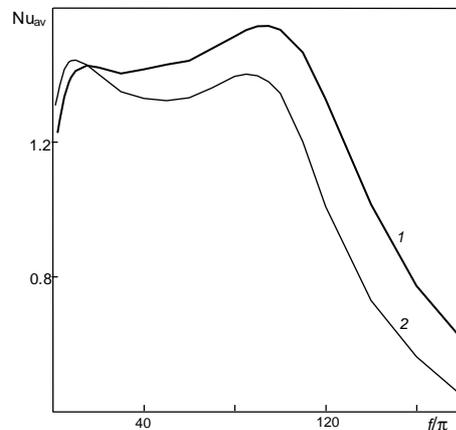


Рис. 5. Зависимость среднего теплового потока за период от безразмерной частоты при $\alpha = 50^\circ$ (1) и $\alpha = 60^\circ$ (2) для $Gr = 3 \cdot 10^5$

Зависимость среднего теплового потока за период от угла наклона α показана на рис. 4. Как и предполагалось, при $\alpha = 0^\circ$ через ячейку за период переносится нулевой тепловой поток. При $\alpha = 54^\circ$ перенос тепла через ячейку

достигает своего максимума. Кроме того, вблизи угла $\alpha = 90^\circ$ наблюдается локальный максимум переноса тепла, что связано, особенно для $Gr = 3 \cdot 10^5$, с существенным переустройством характера течения вблизи этого угла наклона.

Зависимость среднего теплового потока за период от безразмерной частоты при $\alpha = 50^\circ, 60^\circ$ (Рис. 5) носит ярко выраженный нелинейный характер. С ростом частоты, когда она начинает превышать значение 100π , тепловой поток существенно уменьшается. При стремлении безразмерной частоты к бесконечности через ячейку будет переноситься нулевой тепловой поток.

В четвертой главе изучена передача тепла в наклонной квадратной ячейке. Правая сторона полости поддерживается при постоянной температуре T_h , противоположная ей – при периодически изменяющейся температуре $T(t) = T_c + \Delta T \sin \omega t$, причем $\Delta T > T_h - T_c > 0$.

В течение части периода, меньшей его половины, температура более холодной (в среднем за период) стенки превышает температуру более горячей стороны. В течение этого времени при угле наклона $\alpha > 0^\circ$ жидкость в полости стратифицирована так, что она способствует переносу тепла в положительном направлении оси x как за счет конвекции, так и за счет теплопроводности. Причем количество переносимого тепла увеличивается с ростом числа Грасгофа. В течение оставшейся части периода, когда температура более холодной (в среднем за период) стенки становится меньше температуры противоположной стороны, стратификация приводит к уменьшению конвективного потока, и тепло передается в отрицательном направлении оси x главным образом за счет теплопроводности. Таким образом, суммарно за период тепловой поток в положительном направлении оси x может превышать значение потока в отрицательном направлении, т.е. под влиянием конвективного течения будет осуществляться перенос тепла от более холодной (в среднем за период) стенки к более теплой.

Решение получено в безразмерном виде. В качестве безразмерных параметров выступают числа Грасгофа и Прандтля, безразмерная частота f ,

безразмерная амплитуда колебания граничной температуры ($\varepsilon = \Delta T / (T_h - T_c)$). Результаты получены на сетке 50×50 контрольных объемов при $Pr = 1$, $Gr = 5 \cdot 10^5$, $\varepsilon = 5$, $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$, $0 \leq f \leq 1000\pi$. В качестве основных характеристик задачи были выбраны осредненный тепловой поток через правую и левую границу, а также средний тепловой поток за период.

На рис. 6 приведено распределение среднего теплового потока через правую стенку во времени при $\alpha = 45^\circ$. При $f = 10\pi$ тепловой поток меняет свой знак в течение периода. Когда $f = 100\pi$ и $f = 400\pi$ в течение периода тепловой поток всегда направлен слева направо, причем при $f = 400\pi$ становится практически постоянным, меняясь в пределах 10%. Можно сделать вывод, что в случае больших частот при $\alpha = 45^\circ$ рассматриваемая область ведет себя как тепловой диод или как полупроводник на правой границе.

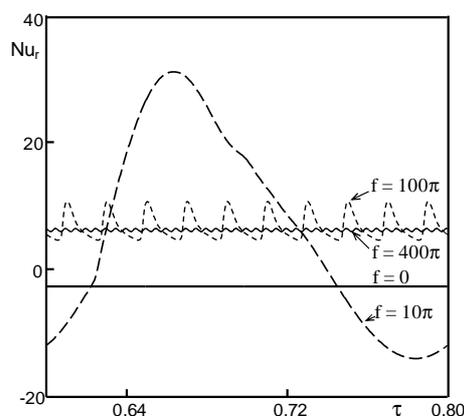


Рис. 6. Зависимость осредненного теплового потока через правую границу от безразмерного времени при $\alpha = 45^\circ$ и $f = 0, 10\pi, 100\pi, 400\pi$

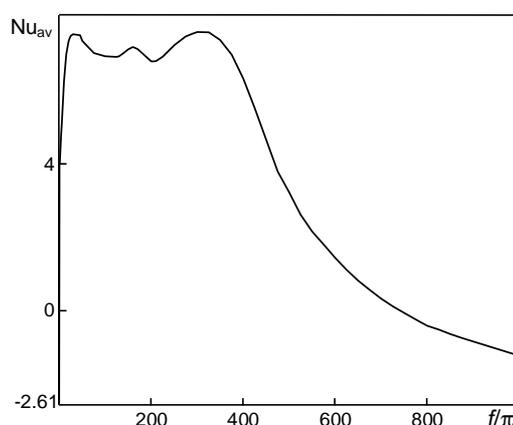


Рис. 7. Зависимость среднего теплового потока за период от безразмерной частоты при $\alpha = 45^\circ$

При угле наклона $\alpha = 45^\circ$ зависимость осредненного направленного слева направо теплового потока от частоты (рис. 7) носит сложный немонотонный характер с тремя локальными максимумами и двумя локальными минимумами. Наибольшее количество тепла от более холодной (в среднем за период) стенки

к более теплой передается при $f = 300\pi$. Начиная со значения $f = 730\pi$, тепловой поток становится отрицательным, т.е. направленным справа налево.

В пятой главе проведено исследование процесс переноса тепла в полости квадратной и кубической формы. Правая и левая стенки поддерживаются при постоянных температурах T_c и T_h соответственно ($T_c < T_h$).

Задача решается в безразмерном виде. В качестве безразмерной температуры в точке рассматривается отношение разности температуры в точке и среднего арифметического температур боковых стенок к разности температур стенок.

Параметрами задачи выступают числа Грасгофа и Прандтля.

Численное моделирование проводится методом контрольного объема с помощью модифицированного алгоритма SIMPLER, с использованием схемы степенного закона и второго порядка аппроксимации граничных условий. Расчеты получены при $Pr = 1$ для трехмерного случая на сетке $50 \times 50 \times 50$ контрольных объемов ($Gr = 5 \times 10^5$); для двухмерной ситуации на сетке 50×50 контрольных объемов ($Gr = 5 \times 10^5$), на сетке 100×100 контрольных объемов ($Gr = 1 \times 10^6, 2 \times 10^6$ и 5×10^6). Угол наклона к горизонту изменяется в пределах $-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$. Стационарное решение при предыдущем угле наклона являлось начальным условием при последующем угле наклона. В качестве основной характеристики задачи рассматривается безразмерный тепловой поток через правую стенку (число Нуссельта).

В квадратной полости при $68.3^\circ \leq \alpha \leq 68.98^\circ$ обнаруживается область гистерезиса числа Нуссельта по углу в виде однообластной ячейки (рис. 8). При увеличении значения числа Грасгофа явление гистерезиса также обнаруживается, при этом форма области существенно усложняется (рис. 9). В трехмерной ситуации явление гистерезиса наблюдается при $39.25^\circ \leq \alpha \leq 40.275^\circ$ (рис. 10).

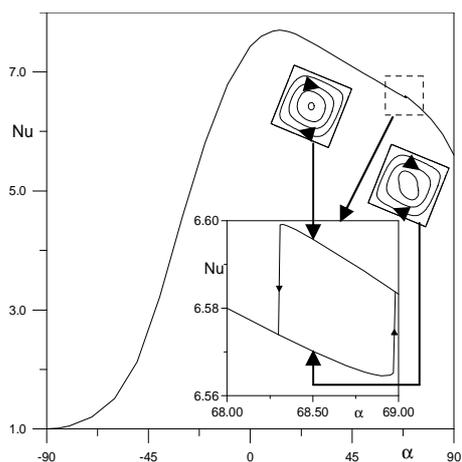


Рис. 8. Зависимость безразмерного теплового потока от угла наклона при $Gr = 5 \times 10^5$ в квадратной полости

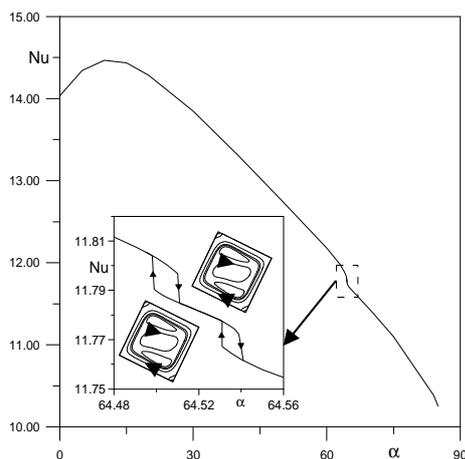


Рис. 9. Зависимость безразмерного теплового потока от угла наклона при $Gr = 5 \times 10^6$ в квадратной полости

При сравнении рис. 8 и рис. 10 видно, что при прочих одинаковых условиях в двухмерной ситуации тепловой поток достигает одного локального максимума, а в трехмерной – наблюдаются два локальных максимума и один минимум. В обоих случаях область гистерезиса принимает форму однообластной ячейки, но картина течения в кубической полости гораздо сложнее (рис. 11). Таким образом, структура трехмерной задачи не может быть корректно представлена посредством решения аналогичной двухмерной задачи.

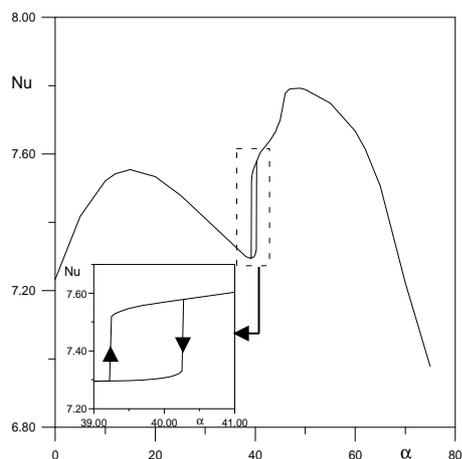


Рис. 10. Зависимость безразмерного теплового потока от угла наклона при $Gr = 5 \times 10^5$ в кубической полости

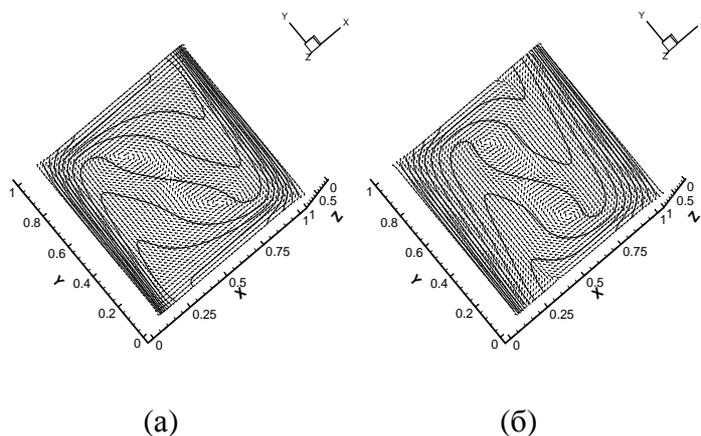


Рис. 11. Структура течения и изотермы в плоскости симметрии $Z = 0.5$: а) при увеличении угла α , б) при уменьшении угла α

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

В диссертационной работе численно исследован процесс переноса тепла в наклонной полости, заполненной жидкостью и находящейся в поле силы тяжести. Температура на боковых вертикальных сторонах изменялась определенным образом. Остальные стенки предполагались адиабатическими. По результатам исследований могут быть сделаны следующие выводы:

- Перенос тепла через наклонную полость возможен в случае, когда температура на противоположных стенках изменяется во времени по одному и тому же периодическому закону. Найдены зависимости суммарного теплового потока от угла наклона полости и частоты колебаний температуры стенки.
- Если температура одной стенки периодически изменяется, причем ее осредненное по времени значение совпадает с постоянной температурой противоположной стенки, то при ненулевом угле наклона возможен перенос тепла к стороне с постоянной температурой. Исследованы зависимости суммарного теплового потока от частоты колебаний температуры и угла наклона полости.
- Передача тепла возможна от более холодной стенки (в среднем за период колебаний ее температуры) к более теплой, причем величина теплового потока существенно зависит от частоты колебаний температуры. Изучены зависимости теплового потока от угла наклона полости и частоты колебаний температуры холодной стенки.
- Наблюдается явление гистерезиса числа Нуссельта по углу наклона полости к горизонту для жидкости с линейной зависимостью плотности от температуры. Получено, что его форма усложняется с увеличением числа Грасгоффа. Показано, что структура трехмерной задачи не может быть корректно представлена посредством решения аналогичной двухмерной задачи.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. *Zubkov P.T., Kanashina (Safiullina) M.V.* The hysteresis phenomenon in the problem of natural convection // Abstracts of International Conference «Advanced problems in thermal convection» (24-27 November, 2003, Perm, Russia). – Perm, 2003. – с.121-122.
2. *Канашина (Сафиуллина) М. В.* Явление гистерезиса в двумерной и трехмерной задачах естественной конвекции // Тез. докл. XLII Международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс»: секция «Математика», (13-15 апреля 2004, Новосибирск). – Новосибирск, Новосиб. гос. университет, 2004. – с.27-28.
3. *Zubkov P.T., Kanashina (Safiullina) M.V., Kalabin E.V.* Natural convective heat transfer in a square cavity with time-varying sidewall temperature // ICHMT International Symposium on Advances in Computational Heat Transfer, April 2004, G. de Vahl Davis and E. Leonardi (eds.), CD-ROM Proceedings, ISBN 1-5670-174-2, Begell House, New York, 2004.
4. *Zubkov P.T., Kanashina (Safiullina) M.V., Kalabin E.V.* Heat transfer from the cold wall of a square cavity to the hot one by oscillatory natural convection // ICHMT International Symposium on Advances in Computational Heat Transfer, April 2004, G. de Vahl Davis and E. Leonardi (eds.), CD-ROM Proceedings, ISBN 1-5670-174-2, Begell House, New York, 2004.
5. *Зубков П.Т., Канашина (Сафиуллина) М.В., Калабин Е.В.* Процесс передачи тепла естественной конвекцией в квадратной полости, температура одной из стенок которой изменяется по синусоидальному закону // Теплофизика высоких температур, 2004, том 42, №1, с.118-124.
6. *Зубков П.Т., Канашина (Сафиуллина) М.В., Калабин Е.В.* Свободноконвективный перенос тепла в квадратной полости при периодическом изменении температуры одной из стенок // Доклады Академии наук, 2004, том 397, №3, с.334-336.

7. *Канашина (Сафиуллина) М.В.* Естественная конвекция в квадратной полости, температуры стенок которой меняются по синусоидальному закону // Тез. докл. VIII Всероссийской конференции молодых ученых «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» (6-8 октября 2004, Новосибирск, Россия). – Новосибирск, 2004. – с.16-17.
8. *Zubkov P.T., Kalabin E. V., Kanashina (Safiullina) M.V.* Heat Transfer From The Cold Wall Of A Square Cavity To The Hot One By Oscillatory Natural Convection // Numerical Heat Transfer: Part A: Applications, 2005, Vol. 47, № 6, pp.609-619.
9. *Zubkov P.T., Kalabin E. V., Kanashina (Safiullina) M.V.* Natural-Convective Heat Transfer In A Square Cavity With Time-Varying Side-Wall Temperature // Numerical Heat Transfer: Part A: Applications, 2005, Vol. 47, № 6, pp.621-631.
10. *Зубков П.Т., Канашина (Сафиуллина) М.В.* Перенос тепла за счет естественной конвекции в квадратной полости с периодическим изменением температуры границы // Тез. докл. Межрегиональной конференции, посвященной 30-летию факультета математики и компьютерных наук Тюменского государственного университета «Современные математические методы и информационные технологии в образовании» (14-16 апреля 2005, Тюмень, Россия). – Тюмень: Изд-во ТюмГУ, 2005. – с.24-26.
11. *Зубков П.Т., Канашина М.В (Сафиуллина), Тарасова Е.Н.* Явление гистерезиса в двумерной и трехмерной задачах естественной конвекции // Известия Академии Наук, Энергетика, 2007, №2, с. 106-110.
12. *Зубков П.Т., Сафиуллина М.В.* Естественная конвекция в квадратной полости с периодическим изменением температуры границы // Материалы всероссийской конференции молодых ученых (с международным участием) «Неравновесные процессы в сплошных средах» (5-7 дек. 2007 г.). – Пермь, 2007. – С. 186-189.