

ГРАНИЦЫ РЕЖИМОВ КОНВЕКЦИИ, ГИСТЕРЕЗИСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕН В НАКЛОННЫХ СЛОЯХ С РАЗЛИЧНЫМ ОТНОШЕНИЕМ СТОРОН.

Лебедев М.А.¹, Мякшина М.Н.², Полежаев В.И.²

¹Московский авиационный институт (государственный технический университет) ²Институт Проблем Механики им. А.Ю. Ишлинского РАН

АННОТАЦИЯ

Границы ячейкового и вихревого режимов при тепловой гравитационной конвекции в наклонных слоях на основе модели бесконечно-длинного слоя с периодическими граничными условиями, а также обзор существовавших к тому времени работ даны в [1]. В данной работе выполняются численные исследования этого класса задач в слоях конечного удлинения при различных отношениях сторон, начатые в [2, 3]. Основное внимание уделяется определению границ характерных режимов, гистерезисных явлений, влияния отношения сторон слоя на процесс смены режимов конвекции и выявлению особенностей структур течения и теплообмена. Расчеты выполнены для удлинений $L/H = 1, 2; 3; 4; 5; 7; 10; 15; 20; 30; 50$. Определены критические углы наклона слоя, при которых происходит смена режимов конвекции от ячейкового до вихревого, особенности локальных и средних потоков тепла.

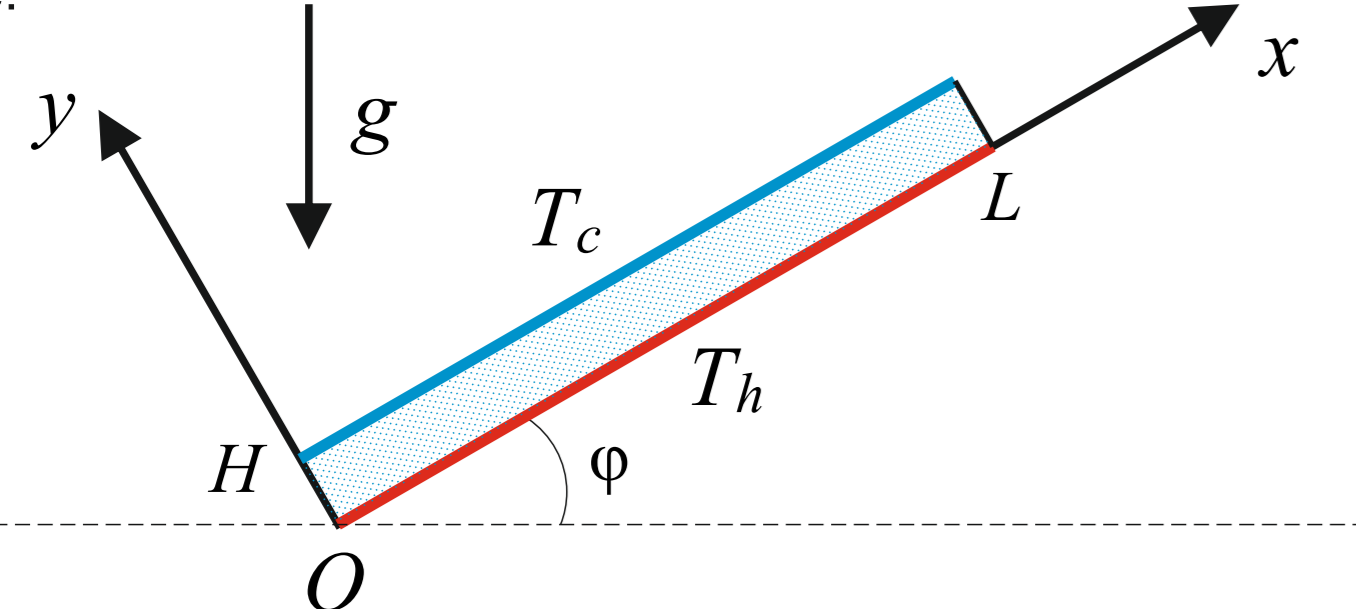
ВВЕДЕНИЕ

В зависимости от угла наклона действуют два механизма тепловой гравитационной конвекции, соответствующие двум предельным случаям: равновесие возможно, но может быть устойчивым или неустойчивым (подогрев снизу), и равновесие невозможно (подогрев сбоку). В промежуточных случаях происходит конвективное взаимодействие между этими двумя механизмами, приводящее к существенной перестройке структуры течения, локальным и средним характеристикам теплообмена. И хотя вдоль границы линейной устойчивости переход от рэлеевской моды в вихревой по мере изменения угла наклона происходит непрерывным образом, в надкритической области соответствующая перестройка имеет скачкообразный характер и сопровождается явлением гистерезиса.

Несмотря на большое количество работ по наклонным слоям, сведения о гистерезисе при различных отношениях сторон слоя немногочисленны.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривается естественная конвекция в наклонном плоском слое. Нижняя сторона подогревается, верхняя – охлаждается, боковые стенки теплоизолированы. Сила тяжести постоянна и направлена вертикально вниз. Координатная система связана со слоем. Ориентация слоя изменяется в пространстве.



Численные расчеты велись с помощью программы COMGA и Программы D[2]. Некоторые результаты были получены на программе Fluent.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рисунке 1 представлены картины изотерм (верхний ряд) и линии тока (нижний ряд) при изменении ориентации в диапазоне от 0 до 90 (рис. а) и от 90 до 0 (рис. б) градусов с интервалом 15 градусов при числе Релея 10^4 и $Pr=6.5$. Поворот ячейки осуществляется, как показано на рисунке против часовой стрелки. Направление конвективного течения в начальном положении происходит по часовой стрелке, однако уже на 15 градусах направление течения меняется на противоположное. При более подробном шаге по углу смена направления течения происходит раньше, причем существует порог, которому соответствует критический угол, при котором возмущения, вызываемые горизонтальной проекцией бокового потока тепла становится сопоставимой с интенсивностью начального конвективного течения. При угле наклона 90 боковой поток тепла доминирует, что видно из характера изотерм. При повороте слоя в обратном направлении в связи с уменьшением составляющей бокового потока тепла конвекция приобретает прежний вид, с той лишь разницей, что смены направления течения не происходит, так как возникновение конвекции релей-бенаровского типа происходит под действием постоянно действующего возмущения, вызываемого составляющей бокового потока тепла, приводящему к реализации течения с направлением, задаваемым начальными условиями.

На рисунке 2а представлены картины теплообмена, иллюстрирующие переходный характер явления гистерезисного типа, которое приводит в итоге к близкой по отношению к начальной структуре конвекции, но с противоположным направлением движения. Механизм этого процесса состоит в том, что на начальное ячейковое течение с направлением по часовой стрелке, причиной которого является конвективная неустойчивость, при повороте на некоторый угол начинает действовать подъемная сила, связанная с боковым потоком тепла, которая в итоге приводит к течению с направлением против часовой стрелки. Фильм, иллюстрирующий перестройку структуры в динамике, позволяет понять этот механизм конвективного взаимодействия, являющийся причиной этой перестройки (при желании Вы можете посмотреть фильм на ноутбуке у докладчика). На рисунке 2б показано изменение числа Нуссельта в зависимости от угла наклона. При повороте против часовой стрелки из начального состояния при угле в 8 градусов происходит всплеск зависимости теплообмена по углу, в то время как при повороте по часовой стрелки этот всплеск отсутствует.

Изотермы (верх. ряд) и линии тока (ниж. ряд) при изменении угла наклона

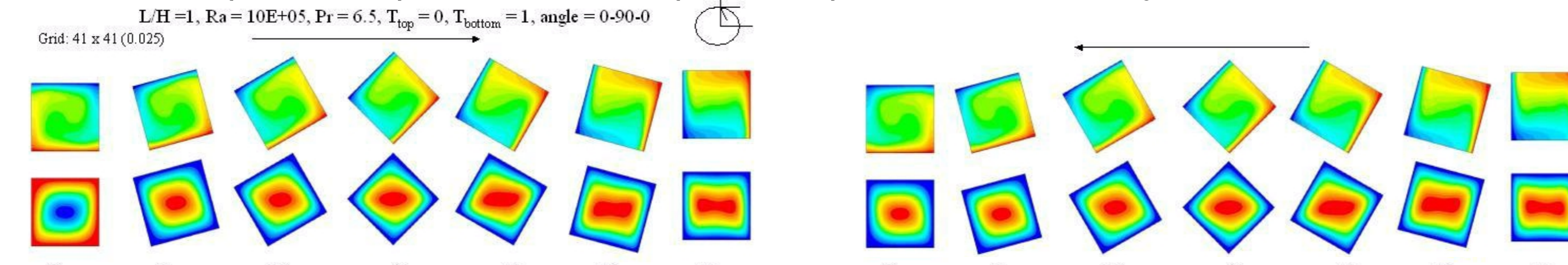


Рис. 1а

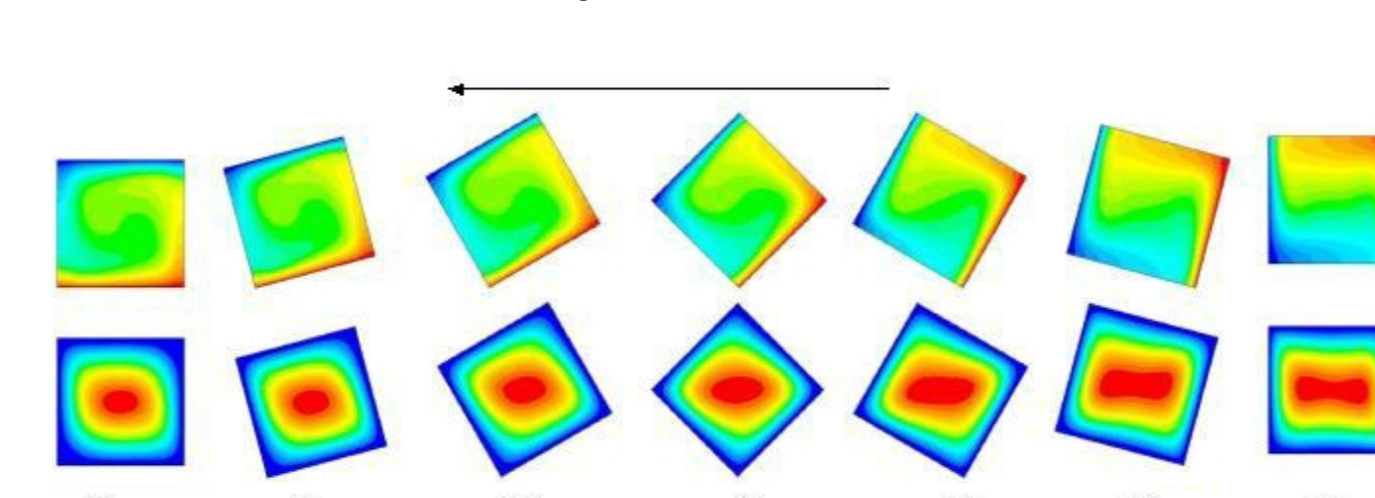


Рис. 1б

Перестройка структур в квадратной области (Вы можете посмотреть фильм на ноутбуке у докладчика)

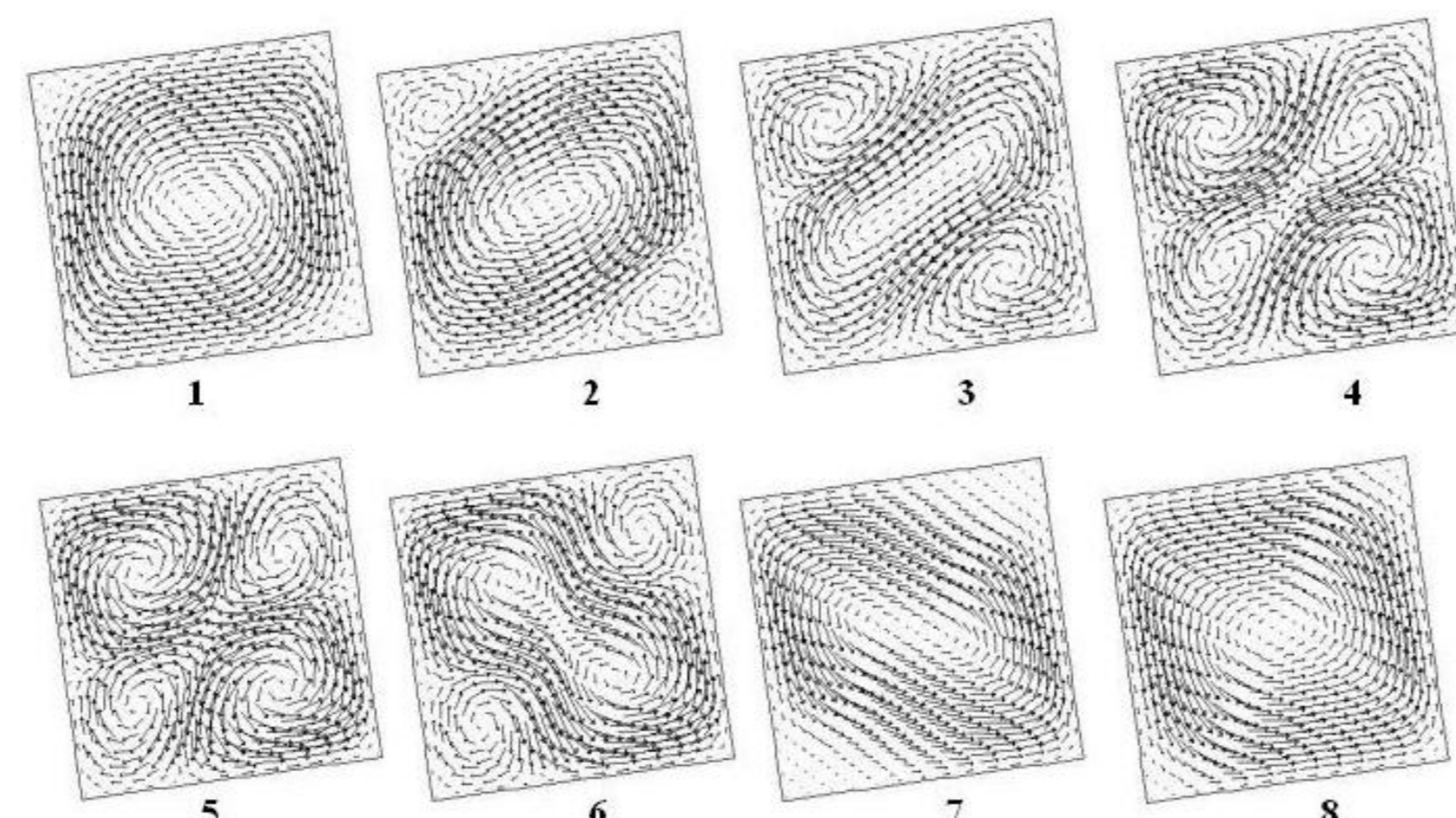


Рис. 2а

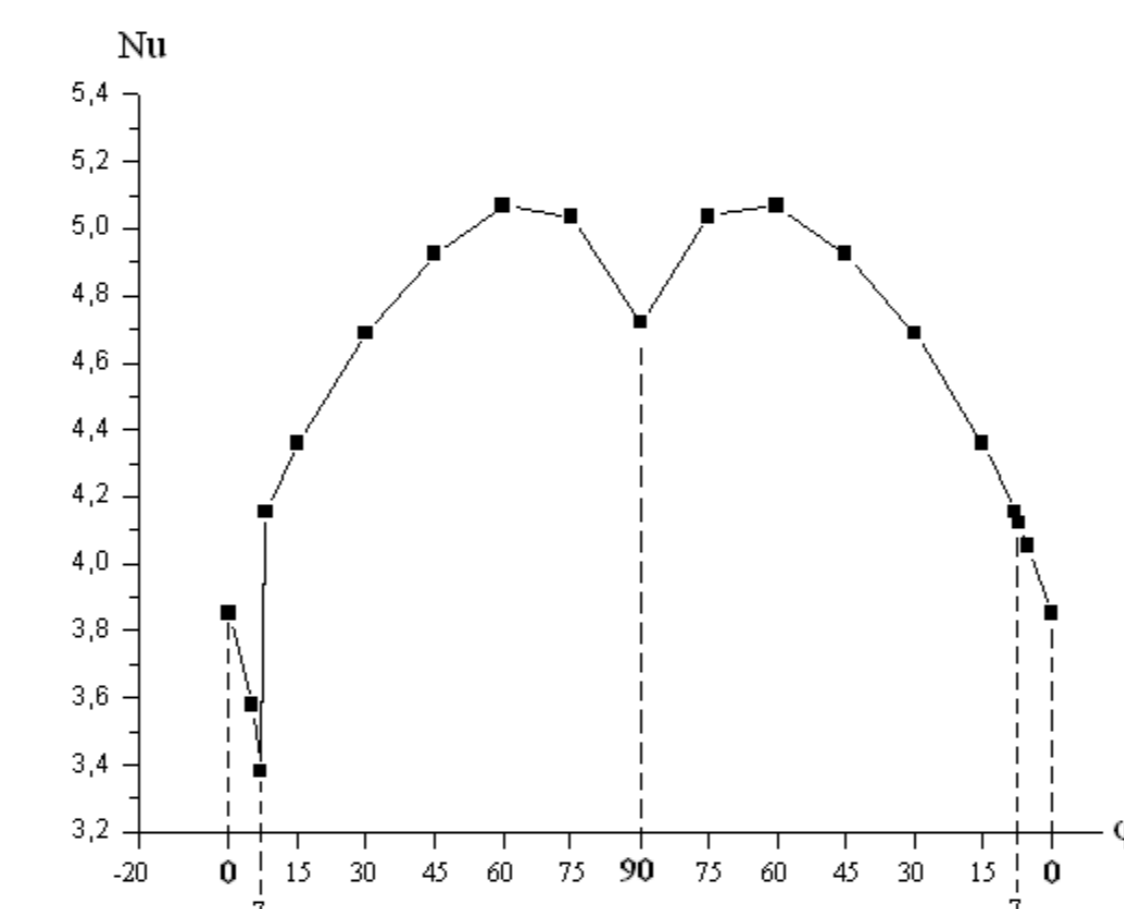


Рис. 2б

Эффект гистерезиса при изменении угла наклона

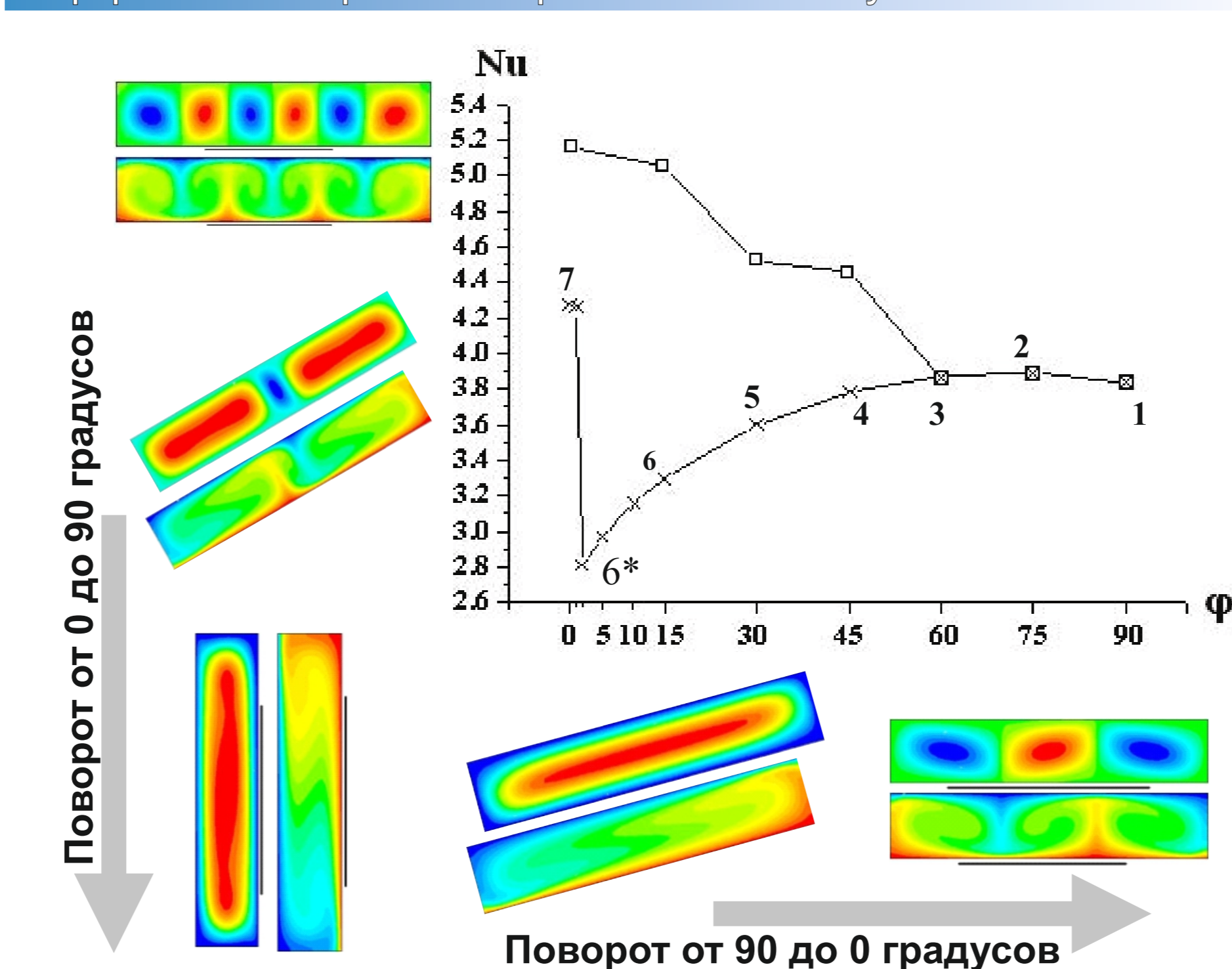


Рис. 4а

График критического угла смены режимов конвекции от удлинения

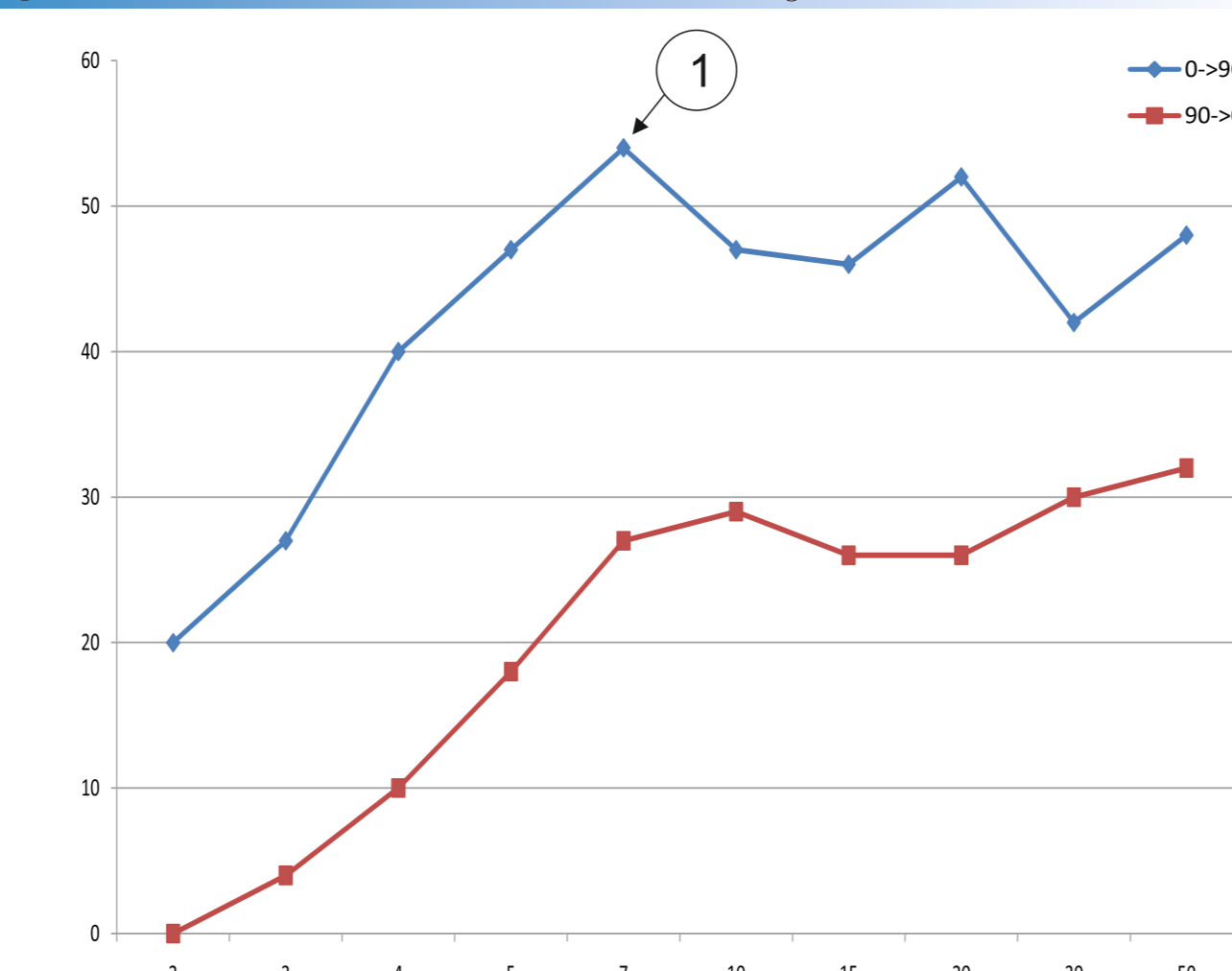
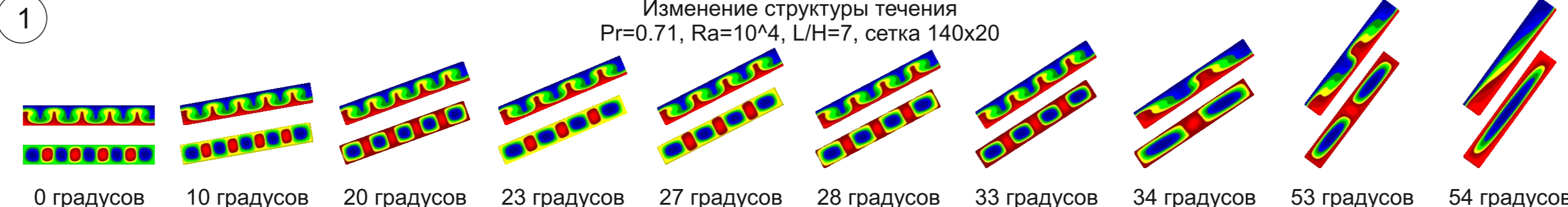


Рис. 5а



Изменение структуры течения Pr=0.71, Ra=10^4, L/H=7, сетка 140x20

График изменения числа Нуссельта в параллелепипеде (5x5x1).

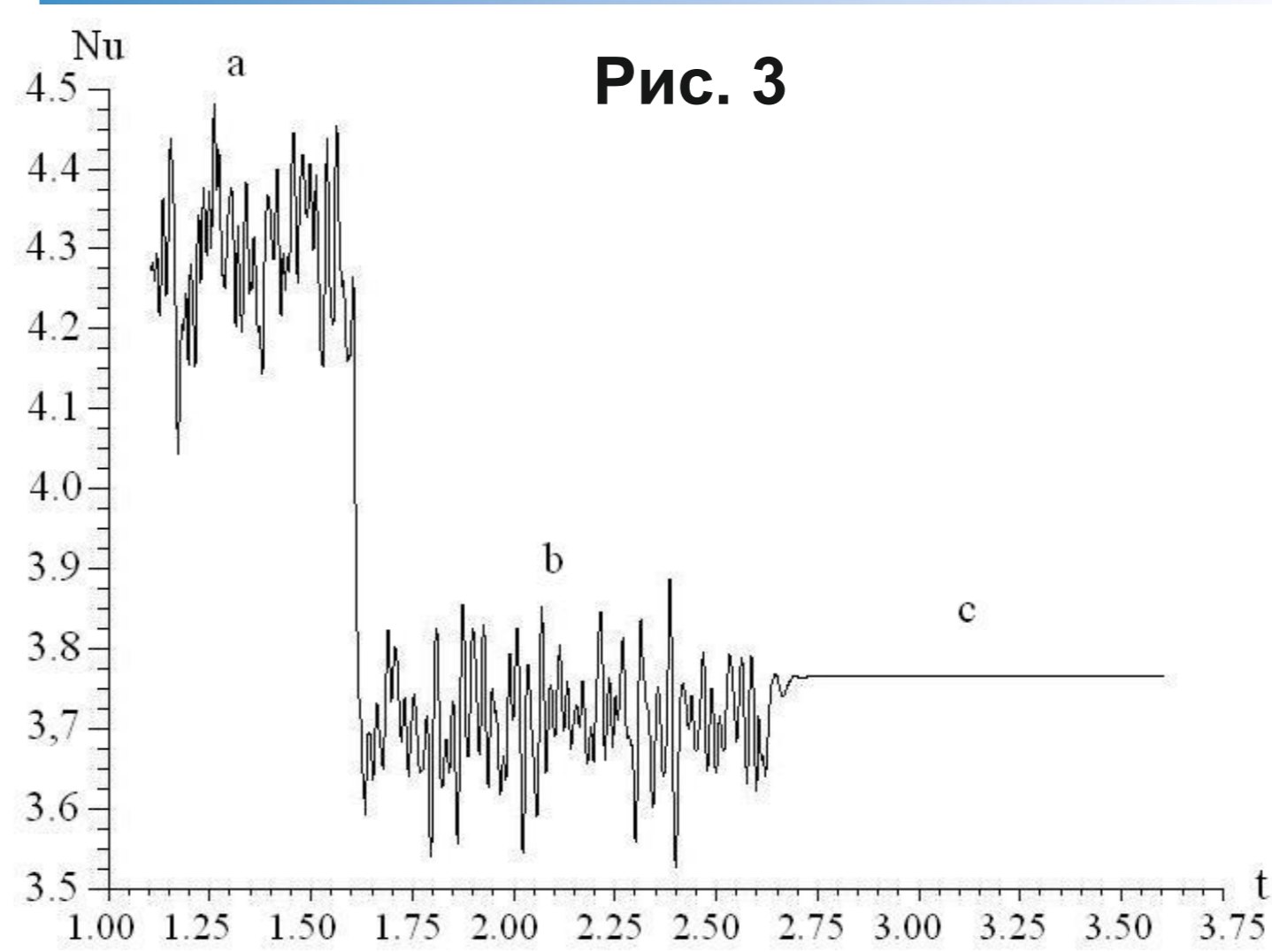
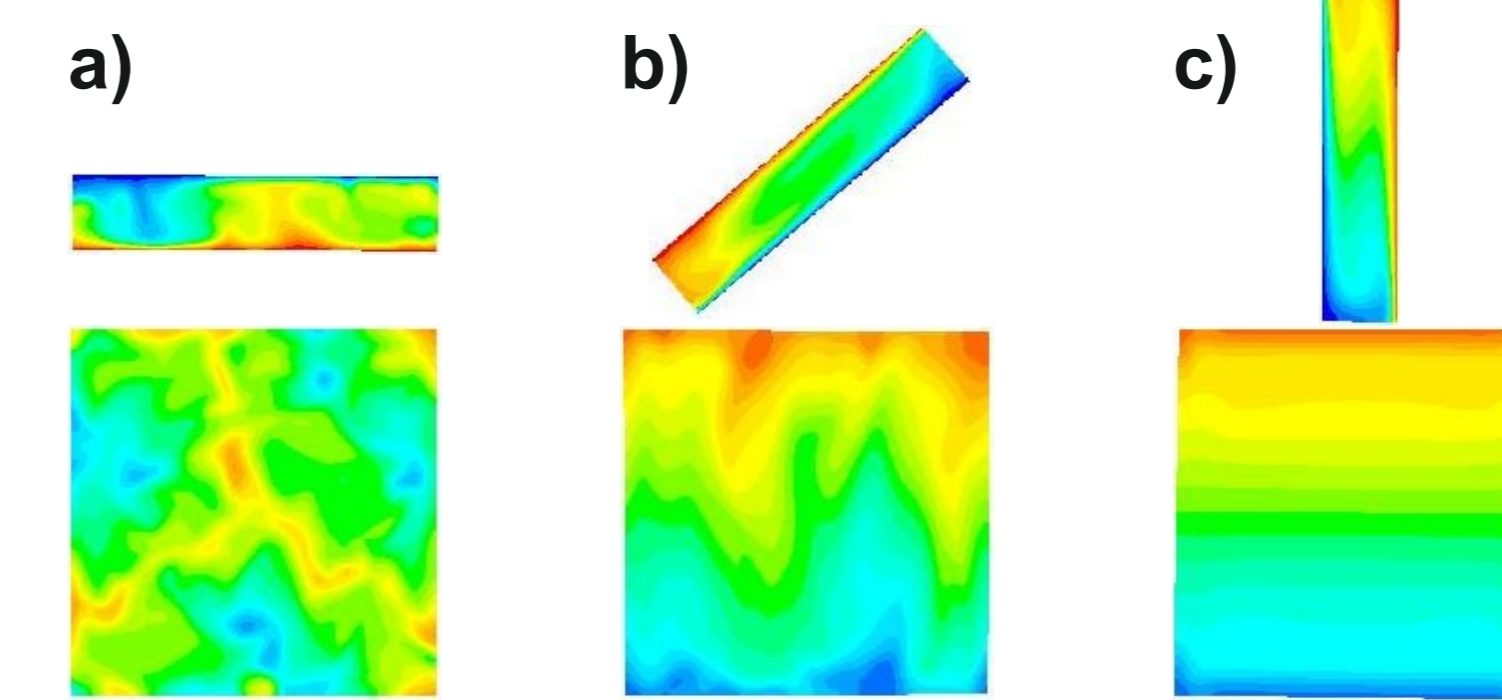


Рис. 3



Эволюция структур в горизонтальном слое при изменении числа Релея

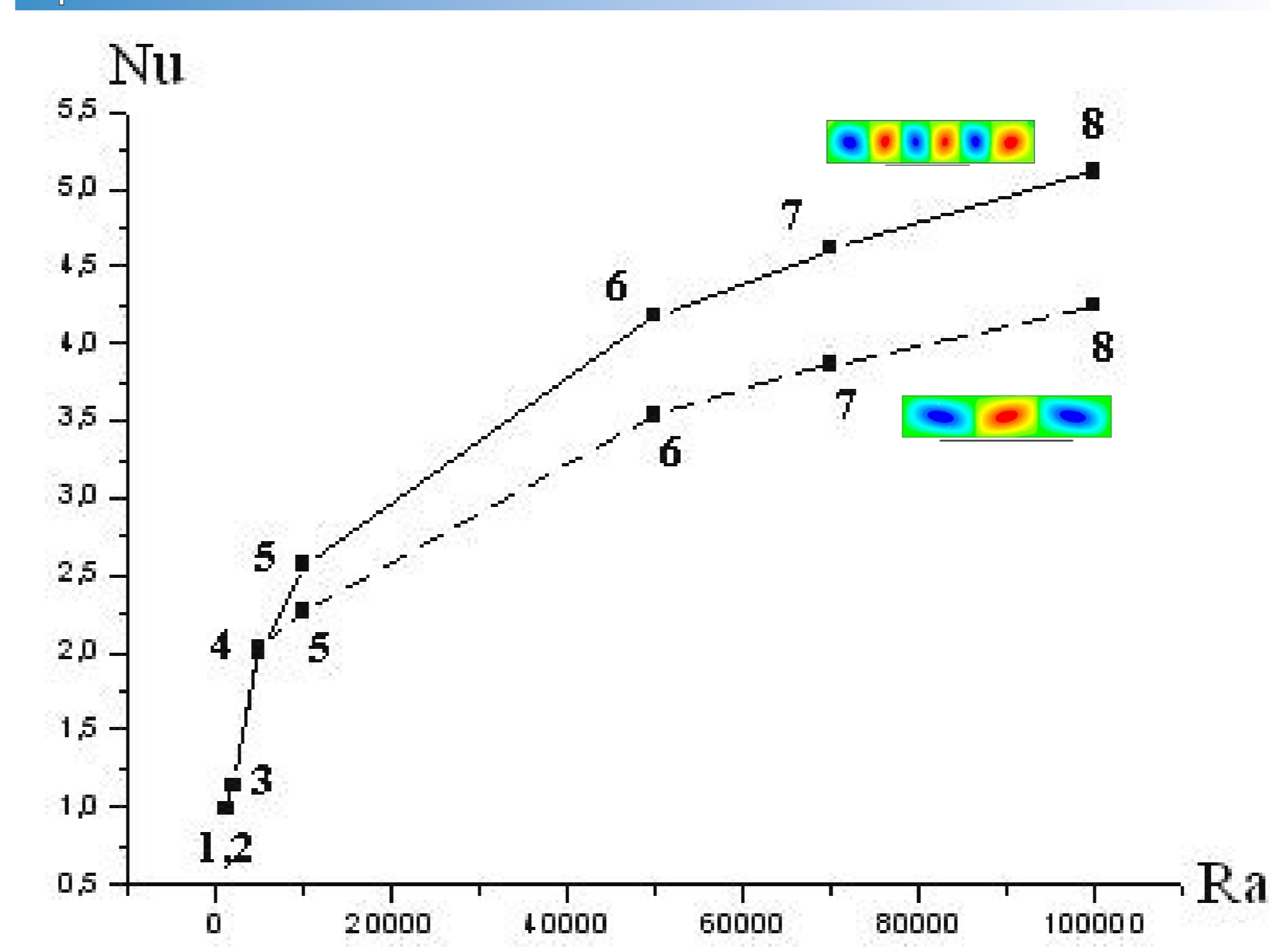


Рис. 4б

Петля гистерезиса

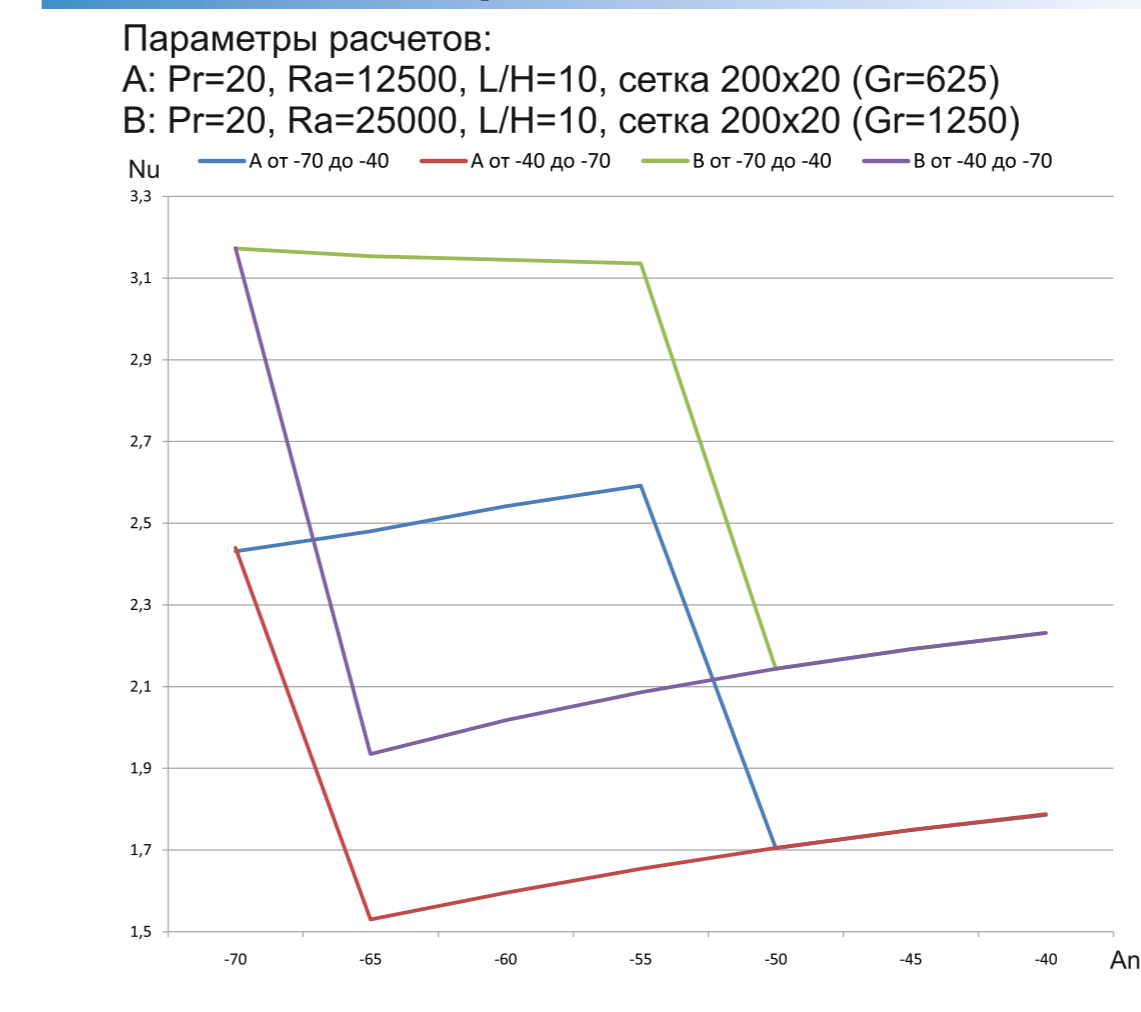


Рис. 5б

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рисунке 3 представлен график изменения числа Нуссельта от времени при последовательных поворотах против часовой стрелки на угол 45 и 90 градусов (а - 0; б - 45; с - 90) параллелепипеда. При 0 и 45 градусах течение не устанавливается. Под графиком представлены изотермы в двух центральных сечениях параллелепипеда при углах 0, 45, 90 градусов. Многие двумерные ветви при пересчете в трех мерном варианте не дают результатов, полученные течения не выходят на стационар.

На приведенном рисунке 4 дан пример расчета структур течения и теплообмена в слое $L/H = 5$ при $Ra=10^4$, $Pr=0.71$, при изменении угла наклона от нуля (горизонтальный слой) до 90 и обратно, иллюстрирующий смену характерных режимов и эффект гистерезиса при изменении угла наклона (а), а также эволюцию структур в горизонтальном слое при изменении числа Релея (б). Из первоначальной шести ячейковой структуры конвекции, при повороте слоя от 90 градусов до 0, получается побочная ветвь с трех ячейковой структурой. При чем она появляется при очень маленьком угле в 2 градуса (точка 6*), а до этого сохраняется подъемно-опускное течение. Эта ветвь является неустойчивой. На рисунке 4б показано, при последовательном уменьшении числа Релея, трех и шести ячейковые ветви сливаются в одну в точке 4.

На рисунке 5 представлены полученные разновидности гистерезисных явлений. Найдены границы, при которых происходит смена структур течений. Для рисунка 5а это граница по углу от отношения сторон, а для рисунка 5б граница по углу от числа Прандтля. Для случая зависимости от удлинения найдены характерные пики, которые проиллюстрированы ниже. В обоих случаях наблюдается гистерезис, при чем для случая зависимости от Прандтля после числа $Pr=7$ граница смены течений остается постоянной. Рисунок 5в изображает график зависимости числа Нуссельта от угла наклона, который больше известен как «петля гистерезиса». Он иллюстрирует, что переход от релей-бенаровской моды к вихревой в надкритической области имеет скачкообразный характер и сопровождается явлением гистерезиса.

В ходе выполнения работы были задействованы три программных пакета: Fluent, Comga и Program D. В основном использовались не очень подробные линейные сетки, но достаточные для достоверных данных (сравнивались значения для примера рисунка 4а и 4б сетки 500×100 и 100×20 , погрешность была минимальна).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрена простейшая квадратная область, где отсутствуют сложные взаимодействия ячейковых структур и подъемно-опускных течений, выявлены базовые механизмы их взаимодействия, их границы и параметрические зависимости, а также явления гистерезисного типа. Получены критические углы перестройки структур и изменения направления течения в зависимости от числа Прандтля. Так для $Ra=10^4$ получены следующие данные: $Pr=6.5$ - угол=8 градусов, $Pr=0.717$ - угол=18 градусов, $Pr=0.07$ - угол=32 градуса. Получен ярко выраженный гистерезис для прямоугольной области с отношением сторон $L/H=5/1$. Получена побочная ветвь, которая оказалась неустойчивой при уменьшении числа Релея. Найдена граница режимов для слоев с удлинениями $L/H=1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 15, 20, 30, 50$, а так же для чисел Прандтля $Pr=0.71, 1.74, 7, 13.5, 43.9$. Были получены пики, а также минимумы углов смены течений для разных удлинений. Показана эволюция изменения структур течения. Рассмотрена трехмерная задача и выявлено отсутствие устанавливающегося течения, а так же невозможность нахождения критического угла.

ЛИТЕРАТУРА

- Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М., Непомнящий А.А. Устойчивость конвективных течений. М.: Наука. Гл. ред. Физ-мат. лит., 1989, с. 53-55.
- Полежаев В.И., Никитин С.А., Мякшина М.Н. Теплообмен и температурное расслоение при свободно-конвективных взаимодействиях в замкнутых объемах.— Труды Пятой Российской национальной конференции по теплообмену. Т. 1 Общие проблемные доклады. Доклады на круглых столах. М.: Изд. Дом МЭИ. 2010, С. 55-62
- М.А. Лебедев, В.И. Полежаев. Моделирование течения, теплообмена и гистерезисных явлений в наклонных слоях. (18-я Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева "Проблемы газодинамики и тепломассообмена в новых энергетических технологиях" г. Звенигород, 23-27 мая 2011)
- Эль-Шербини, Рейтби, Холландс. Свободноконвективный теплообмен в вертикальных и наклонных слоях. Теплопередача, 1982, т.104, №1 стр. 104-111
- М.А. Лебедев, С.А. Никитин, Д.Е. Пивоваров, В.И. Полежаев Сетевая компьютерная лаборатория в задачах конвективного теплообмена: Разработка и первые применения Препринт ИПМех РАН № 992. 2011..
- Manual of FLUENT 6.3 User's Guide.
- Ремков М.К., Мякшина М.Н., Никитин С.А., Полежаев В.И., Яремчук В.П. Компьютерная лаборатория и компьютерный практикум по тепло- и массообмену. Труды третьей Российской национальной конференции по теплообмену, Т. 3. Свободная конвекция. Теплообмен при химических превращениях. М.: Издательство МЭИ, 2002, 72-75