

На правах рукописи



**Кондрашов Александр Николаевич**

**Динамика конвективного течения над локализованным  
источником тепла**

Специальность 01.02.05 —  
«Механика жидкости, газа и плазмы»

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Пермь — 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет» (ПГНИУ).

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор,  
**Смородин Борис Леонидович**

Официальные оппоненты: **Ингель Лев Ханаанович**,  
доктор физико-математических наук, доцент,  
Институт экспериментальной метеорологии ФГБУ  
НПО «Тайфун»,  
ведущий научный сотрудник (г. Обнинск)

**Козлов Николай Викторович**,  
кандидат физико-математических наук,  
ФГБУН «Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук» (филиал – «Институт механики сплошных сред УрО РАН»),  
старший научный сотрудник лаборатории гидродинамической устойчивости (г. Пермь)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова», г. Москва

Защита состоится 05 декабря 2019 г. в 10.30 часов на заседании диссертационного совета Д 004.036.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук (филиал – Институт механики сплошных сред УрО РАН) по адресу: 614013, Россия, г. Пермь, ул. Академика Королёва, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 614013, Россия, г. Пермь, ул. Академика Королёва, 1, ученому секретарю диссертационного совета Д 004.036.01.

Автореферат разослан \_\_\_\_ \_\_\_\_\_ 2019 года.

Телефон для справок: (342) 237-84-61.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 004.036.01,  
д-р физ.-мат. наук, доцент



Зуев Андрей Леонидович

## Общая характеристика работы

**Актуальность и степень разработанности темы.** Диссертация посвящена экспериментальному и численному исследованиям особенностей тепловой конвекции от локализованного источника тепла. Находясь на пересечении механики и теплофизики, это явление наблюдается в бесчисленном множестве природных ситуаций, к которым можно причислить некоторые астрофизические, геологические и атмосферные процессы. В технической области конвекция повсеместно используется для интенсификации тепло- и массообмена. Несмотря на глубокую проработанность и широту охвата решенных задач, до сих пор существует ряд областей, получивших недостаточное освещение в специализированной литературе. Наиболее изученными остаются проблемы устойчивости течений в замкнутых полостях, в то время как динамические процессы формирования и последующего развития конвективного течения часто остаются за рамками рассматриваемых вопросов. Так, крайне мало известно о влиянии размеров и формы компактного нагревателя на структуру теплового пограничного слоя и, как следствие, на процесс организации конвективного течения. Доступна ограниченная информация о влиянии граничных условий на скорость роста теплового плюма. Остаются малоизученными гидродинамические структуры, сопровождающие конвекцию от локализованного источника тепла в узких слоях. И, наконец, ввиду быстрого развития измерительной техники, обсуждению подлежат перспективы использования конвективных акселерометров, а также способы повышения их чувствительности и оценка пределов применимости. Решению этих и некоторых других задач посвящена представленная диссертационная работа.

**Цели и задачи исследования.** Цель диссертационной работы заключается в экспериментальном и численном исследовании процессов тепломассопереноса, протекающих в результате воздействия на сплошную среду локализованных источников тепла. Основное внимание уделено процессам развития и устойчивости сопутствующего конвективного течения, а также возможности его применения в технических устройствах.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Экспериментально изучить и численно смоделировать процессы формирования конвективного течения над нагревателями различной формы: круглой, квадратной, правильного треугольника или пятиугольника.
2. Экспериментально и численно проанализировать влияние твердых стенок на скорость роста теплового плюма, возникающего над локализованным источником тепла в узких вертикальных слоях.
3. Экспериментально и численно изучить влияние интенсивности подогрева, толщины рабочего слоя, теплопроводности боковых стенок на характер конвективных структур, установившихся над компактным нагревателем в прямоугольной полости.

4. Проанализировать возможность использования узких слоев в качестве измерительных полостей конвективных акселерометров. Провести оценку чувствительности таких приборов и охарактеризовать свойства лабораторного образца конвективного датчика.

#### **Научная новизна:**

1. Для нагревателей круглой, треугольной, квадратной и пятиугольной форм обнаружено существование нескольких способов формирования течения и соответствующего поля температуры, сменяющих друг-друга в зависимости от интенсивности нагрева, теплофизических параметров рабочей среды и размеров нагревателя.
2. Проведено исследование процесса развития теплового плюма в узком вертикальном слое. Рассмотрена роль граничных условий. Показано, что уменьшение толщины рабочего слоя жидкости приводит к уменьшению скорости роста конвективного факела. Получена формула для скорости роста теплового плюма в условиях постоянной температуры нагревателя.
3. Получена карта возможных стационарных конвективных режимов в узком вертикальном слое при локализованном нагреве снизу в диапазоне чисел Рэлея  $Ra = 10 \div 10^7$ .
4. Экспериментально изучена чувствительность конвективного акселерометра на основе узкого слоя жидкости с компактным источником тепла.

**Теоретическая и практическая значимость.** Понимание способов формирования течения над нагревателями в форме многоугольников, кроме фундаментального интереса, может оказаться полезным при проектировании компактных электронных устройств с пассивным охлаждением. Результаты рассмотренного частного случая развития теплового плюма в узких слоях будут интересны специалистам в областях исторической и прикладной геологии. Результаты верифицируют ранее полученные значения и наглядно показывают общность явлений развития течений в тонких и бесконечных слоях, а также предполагают существование непрерывного гладкого перехода от одних к другим. Исследования установившегося течения и его устойчивости решают прикладную задачу оптимизации рабочих параметров некоторых тепловых устройств, в частности, конвективных акселерометров. Созданный в рамках выполнения работы лабораторный образец конвективного акселерометра может быть использован в качестве угломера или сейсмологического датчика низкочастотных ускорений.

**Методология и методы исследования.** При выполнении диссертационной работы использовались современные апробированные методы экспериментального исследования конвекции. Потoki визуализировались светорассеивающими частицами и флуоресцентными красителями. Пространственные распределения температуры на доступных для наблюдения плоскостях регистрировались тепловизором. В объеме жидкости температура измерялась термопарами.

Экспериментальные результаты дополнялись и расширялись результатами численных расчетов. Моделирование конвективных течений проводилось с использованием современных пакетов ANSYS Fluent, ANSYS CSX, Comsol Multiphysics.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Существуют, по крайней мере, два сценария возникновения конвективного течения вблизи локализованных источников тепла. Смена сценариев происходит по преодолении порогового значения числа Рэлея  $Ra_{Nc} = (8.6 \pm 0.2) \cdot 10^2$ , справедливого для всех нагревателей правильной многоугольной формы.
2. Скорость развития теплового плюма в узком вертикальном слое жидкости ниже по сравнению с неограниченным случаем. Кроме того, скорость роста развитого плюма растет с увеличением размеров источника тепла и не зависит от тепловых условий на боковых границах.
3. В условиях локализованного подогрева узкого вертикального слоя жидкости существуют зеркально-симметричный и асимметричный стационарные режимы течения. Режимы сменяют друг друга при превышении критического значения параметра Рэлея, которое уменьшается по мере увеличения толщины и высоты слоя жидкости.
4. Узкие вертикальные слои жидкости возможно применять в качестве измерительных компонентов конвективных низкочастотных датчиков сильных ускорений или угломеров. Точность таких приборов увеличивается одновременно с миниатюризацией гидродинамической системы.

**Достоверность** результатов обеспечивается продуманными методиками, высокой воспроизводимостью и низкими значениями случайных ошибок. Большинство лабораторных измерений подкреплены данными численных экспериментов, и наоборот. Полученные результаты хорошо согласуются с известными результатами других работ и вписываются в общепризнанную научную парадигму.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на региональных, всероссийских и международных конференциях и семинарах, среди которых: «Зимняя школа по механике сплошных сред» (2011 г., 2013 г., 2015 г., 2017 г., 2019 г., Пермь), «Нелинейные задачи теории гидродинамической устойчивости и турбулентность» (2012 г., 2014 г., 2016 г., Звенигород), «Пермские гидродинамические научные чтения» (2014 г., 2017 г., Пермь), Всероссийская конференция молодых ученых «Неравновесные процессы в сплошных средах» (2012 г., Пермь), Международная конференция молодых ученых «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» (2012 г., Новосибирск), «Актуальные задачи механики сплошных сред» (2014 г., Пермь), Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Математическое моделирование в естественных науках» (2014 г., Пермь), «Всероссийская конференция молодых ученых-механиков» (2017 г., Сочи), «Пермский городской гидродинамический семинар» (2014 г., 2016 г., 2017 г., 2019 г., Пермь).

**Личный вклад.** Автор самостоятельно разрабатывал и апробировал лабораторные установки и соответствующие математические модели. Выполнял численные расчеты и проводил эксперименты. Самостоятельно подготовил к печати шесть из восьми статей, включенных в диссертационную работу. В написании еще двух принимал активное участие. Выступал с докладами по теме диссертации на научных конференциях и семинарах различного уровня. Основные результаты получены, обработаны и интерпретированы автором лично.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 27 работ. Из них 8 статей, 6 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК. Остальные 19 — в тезисах докладов.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и приложения. Полный объем диссертации – 150 страниц текста с 74 рисунками и 6 таблицами. Список литературы содержит 172 наименования.

## Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований диссертационной работы, формулируются цель и задачи, излагается научная новизна и практическая значимость результатов.

**Первая глава** носит обзорный характер. В ней обсуждаются основные особенности конвективных течений, возникающих в результате локализованного нагрева замкнутых полостей, заполненных вязкой жидкостью. Проводится оценка современного состояния проблемы и указываются направления, требующие дальнейшего, более детального изучения. Особое место занимает обсуждение роли свободной конвекции в задачах измерения ускорений в наземных и космических условиях.

**Вторая глава** посвящена экспериментальному и численному исследованиям начальных этапов формирования конвективного течения вблизи поверхности нагревателей круглой, треугольной, квадратной и пятиугольной формы.

В лабораторных условиях использовалась кубическая полость со стороной  $a = 200$  мм, заполненная водным раствором глицерина. Конвективное течение создавалось компактным источником тепла – медным диском, вмонтированным в дно кюветы. Диск приводился в тепловой контакт с электрическим нагревательным элементом. Температура нагревателя поддерживалась постоянной. Возникающее течение визуализировалось флуоресцентным красителем, а соответствующее поле температуры – инфракрасной камерой.

В зависимости от температуры и размеров источника тепла, можно различить несколько способов формирования конвективного течения. При слабом подогреве небольшого нагревателя, жидкость, натекающая на горячую поверхность с кромки круга постепенно прогревается и, достигая центра, поднимается вверх, образуя единственную конвективную струю. При увеличении интенсивности нагрева возле границы нагревателя возникает

концентричный с теплообменником тороидальный конвективный вал. Он увлекает горячую жидкость, не позволяя ей достичь центра окружности. Холодная жидкость, находящаяся непосредственно над поверхностью нагревателя, тонет, а тепловой слой разделяется. По мере роста теплового плазма разделение ослабевает, а по достижении определенного размера пропадает вовсе.

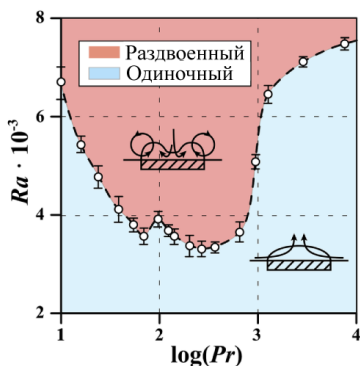


Рис. 1 — Карта режимов для круглого нагревателя радиусом  $r = 5.5$  мм. Толщина слоя рабочей жидкости  $h = 3$  мм. чины.

Экспериментально изучено поле температуры, возникающее над нагревателями квадратной и треугольной форм при различных интенсивностях подогрева (рис. 2).

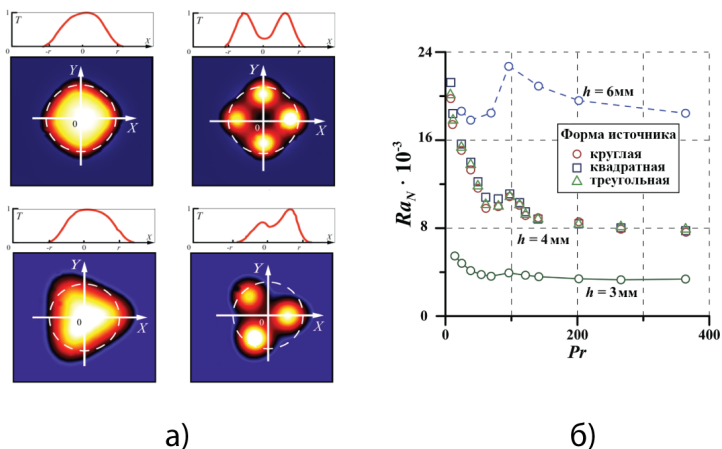


Рис. 2 — а) Поля и профили температуры для разных сценариев развития конвективного факела вблизи квадратного и треугольного нагревателей. б) Карта режимов для различных форм нагревателя в плоскости  $Ra_N$  и  $Pr$ .

Когда температура источника невелика, жидкость над поверхностью нагревателя прогревается равномерно. Если температура нагревателя превысит

некоторый порог, то, как и в случае с круглым источником тепла, возле кромки возникают конвективные валы. В отличие от осесимметричного случая, где образуется неразрывный тор, наличие углов у квадрата и треугольника создает выделенное направление для течения жидкости. Вблизи углов температурные градиенты оказываются сильнее. Навязанное геометрией неравномерное распределение скорости приводит к образованию областей перегрева.

Эксперименты показали, что с уменьшением числа углов  $N$ , критическая температура, необходимая для разделения конвективной струи, возрастает. На рисунке 2 б проведено сравнение карт режимов для разных форм нагревателя. Использование в качестве параметра эффективного числа Рэлея

$$Ra_N = \frac{g\beta\Delta T r^3}{\nu\chi \cos(\pi/N)}, \quad (1)$$

позволяет свести зависимости, полученные для разных фигур, в одну кривую.

Результаты эксперимента подкреплены расчетом. В задаче моделируется течение в ограниченном твердыми границами слое жидкости, возникающее под действием локального подогрева снизу. Расчетная область имеет форму прямоугольного параллелепипеда высотой  $h$ , в основании которого находится квадрат со стороной  $l$ . Течение создается нагревателем радиусом  $r$ , центр которого совпадает с началом координат. Область дискретизируется сеткой, в узлах которой решаются уравнения тепловой конвекции в приближении Буссинеска. На каждой границе задается условие прилипания. Боковые стенки считаются теплоизолированными. На верхней границе задается постоянная температура  $T(z = h) = T_0$ , а на нижней – распределение температуры следующего вида:

$$T(z = 0) = T_0 + \Delta T \cdot ([1 + e^{-10^3(\sqrt{x^2+y^2+r})}]^{-1} - [1 + e^{-10^3(\sqrt{x^2+y^2-r})}]^{-1}). \quad (2)$$

Функция распределения температуры выбрана таким образом, чтобы перегрев нагревателя  $\Delta T$  оказался локализован внутри области радиуса  $r$  с центром в начале координат.

В ходе численных экспериментов моделировалось поле температуры, возникающее над нагревателями круглой, квадратной, треугольной и пятиугольной форм, вписанных в окружность радиусом  $r = 5.0$  мм, при различных интенсивностях подогрева. Поля температуры, полученные путем численного моделирования, согласуются с результатами лабораторных экспериментов (рис. 3).

Если температура источника невелика, жидкость над поверхностью нагревателя прогревается равномерно, и возникает единственный тепловой плюм. Когда температура превышает некоторое пороговое значение, возле кромки формируются конвективные валы. Наличие углов у квадрата, треугольника и пятиугольника нарушает осевую симметрию течения и приводит к образованию горячих областей.



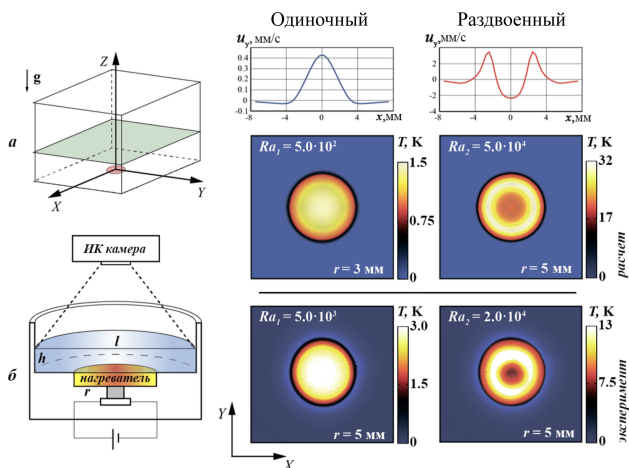


Рис. 3 — Распределение тепла на плоскости  $h = 4.0$  мм. Результаты численного моделирования (а) и эксперимента (б).

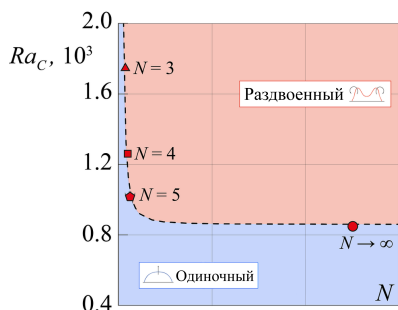


Рис. 4 — Зависимость критического числа Рэлея от количества вершин источника тепла.

С уменьшением числа углов  $N$ , критическое число Рэлея возрастает (рис. 4). Согласно результатам численного моделирования, представленным в таблице 1, среднее критическое значение эффективного числа Рэлея для нагревателя произвольной формы находится в интервале  $Ra_{Nc} = (8.60 \pm 0.50) \cdot 10^2$  и не зависит от числа Прандтля  $Pr$  исследуемой жидкости. Таким образом, при величине управляющего параметра  $Ra_N < Ra_{Nc}$  реализуется сценарий развития одиночного плюма, а при числах Рэлея  $Ra_N > Ra_{Nc}$  – раздвоенного.

Таблица 1 — Критические значения управляющих параметров.

	$\triangle$ , Треугольник	$\square$ , Квадрат	$\diamond$ , Пятиугольник	$\circ$ , Круг
$N$	3	4	5	$\infty$
$Ra_C \cdot 10^{-3}$	$1.75 \pm 0.05$	$1.25 \pm 0.05$	$1.05 \pm 0.05$	$8.5 \pm 0.2$
$Ra_{Nc}$	875	884	850	850

**Третья глава** посвящена экспериментальному и численному исследованиям скорости роста конвективного факела в узких вертикальных слоях. Обсуждаются влияние граничных условий и геометрии задачи.

В лабораторных условиях использовалась ячейка в форме прямоугольного параллелепипеда со сторонами  $l = 28$  мм,  $h = 24$  мм и  $d = 4$  мм. Широкие грани ячейки ограничены оптическими стеклами из фторида лития,

прозрачными в инфракрасной области спектра. Это позволило наблюдать распределение температуры на границе между твердой стенкой и жидкостью при помощи тепловизора. Узкими боковыми сторонами конвективной ячейки служат грани алюминиевого массива комнатной температуры. Локальный подогрев осуществляется снизу при помощи нагревателя – медного цилиндра радиусом  $r = 1$  мм, который приводится в тепловой контакт с резистором. Все элементы нагревателя располагаются внутри основания из плексигласа. В качестве рабочей жидкости по причине высокого конвективного параметра выбран гептан.

На рис. 5 приведены серии полей температуры, демонстрирующие последовательные этапы развития плюма.

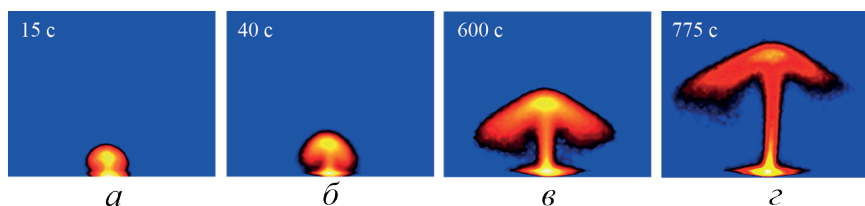


Рис. 5 — Инфракрасные снимки температуры в плоскости соприкосновения широкой грани и жидкости. Время отсчитывается с момента включения источника питания. Температура нагревателя  $\Delta T = 5$  К.

Качественно процесс формирования плюма в узком слое повторяет сценарий, описанный в работах с безграничным объемом жидкости. Так, на начальном этапе вблизи поверхности нагревателя образуется сферический температурный пограничный слой, и перенос тепла имеет преимущественно теплопроводный характер. Спустя некоторое время происходит разрушение пограничного слоя, сопровождающееся возникновением конвективного течения. В то же время, фронт тепловой волны начинает медленно удаляться от источника (рис. 5а). Более нагретая всплывающая жидкость образует узкий канал. Границы начинают расширяться, образуя тепловую шапку (рис. 5б). В итоге тепловой фронт принимает форму гриба (рис. 5в и г). Как и в осесимметричном случае, после достижения плюмом некоторого размера его скорость роста остается постоянной.

Эксперименты показали, что в случае развития плюма в узком слое скорость его роста  $W$  оказывается заметно ниже, чем в осесимметричном случае. Так, использование известной модели Бэтчелора приводит к завышению оценок. Сравнение теоретических и экспериментальных зависимостей показано на рис. 6. Экспериментальные значения  $W$  подчиняются корневому закону с погрешностью, не превышающей 7%. Пунктирной линией на графике показано изменение скорости для постоянных мощностей в случае безграничного объема, а сплошной – с учетом инертности нагревателя. Наличие боковых границ приводит к возрастанию гидродинамического сопротивления по сравнению с бесконечным слоем, а, следовательно, к уменьшению скорости распространения тепла за счет конвекции.

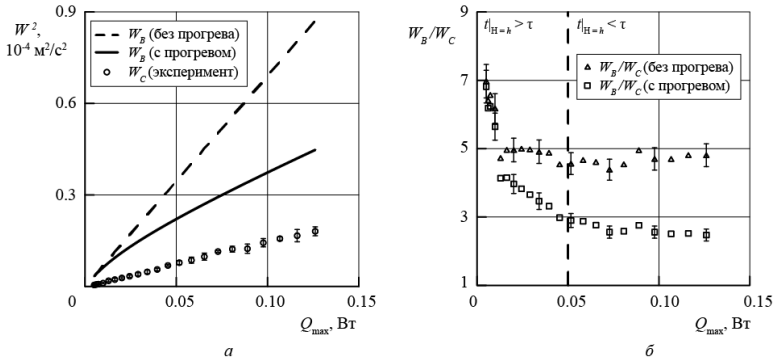


Рис. 6 — Функция квадратов скоростей распространения фронта тепловой волны, найденных в эксперименте и рассчитанных для случаев без учета и с учетом прогрева соответственно (а), отношение рассчитанной скорости к экспериментальной в зависимости от мощности источника тепла (б).

В численном эксперименте расчетная область имитирует экспериментальную установку и представляет собой прямоугольную полость высотой  $h = 24$  мм, шириной  $l = 28$  мм и толщиной  $d = 4$  мм, заполненную вязкой жидкостью. Нагрев происходит снизу компактным источником тепла радиусом  $r$ . Исследуемое пространство дискретизируется сеткой, в узлах которой решаются уравнения тепловой конвекции в приближении Буссинеска. Движение жидкости внутри расчетной области предполагается ламинарным, а, ввиду малых скоростей движения, диссипация энергии за счет сил внутреннего трения не учитывается.

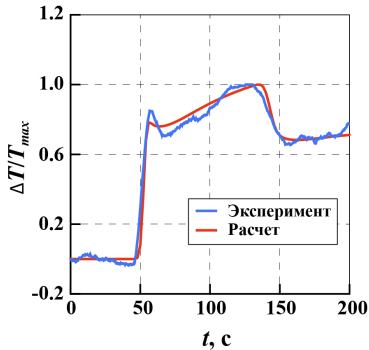


Рис. 7 — Сравнение сигналов измерительной термопары в лабораторной ячейке и результатов численного моделирования.

Краевая задача решается в трехмерной постановке. Система исходных уравнений дополняется граничными и начальными условиями. В начальный момент времени температура жидкости постоянна, а течение отсутствует. На твердых границах задается условие прилипания. Верхняя граница считается изотермической и выполняет роль холодильника  $T(z = h) = T_0$ . На нижней границе задается распределение температуры, локализирующее область нагрева внутри круга радиусом  $r$ . В качестве рабочих жидкостей рассматривались гептан, вода и этиловый спирт.

Тестовые расчеты показали, что перебор тепловых условий (первого, второго или третьего рода) на боковых границах не оказывает значительного эффекта на эволюцию теплового плюма.

Объяснить это можно существенным различием времени роста плюма и характерным тепловым временем  $\tau_\chi = (d/2)^2/\chi$ . Так, верхней границы плюм достигает примерно на два порядка быстрее, чем тепло доходит до узких граней ячейки за счет молекулярного механизма переноса. Поэтому в течение эксперимента фронт тепловой волны не успевает достичь боковых границ.

На рис. 7 проведено сравнение показаний сигнальной термопары в лабораторной ячейке и динамики разницы температур между аналогичными точками в расчете. Расхождение не превышает 4%. По результатам проведенных расчетов и экспериментов, получено итоговое выражение для нахождения скорости роста плюма, с учетом влияния толщины рабочего слоя и размеров нагревателя:

$$W = k \cdot \sqrt{\frac{\ln \epsilon^{-2}}{2}} \cdot \frac{\chi}{r} \cdot Ra^{5/8} \cdot \left[ 1 - \frac{C(\nu, \chi)}{\sqrt[3]{d}} \right], \quad (3)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности Бэтчелора,  $\epsilon$  – поправка, зависящая от числа Прандтля,  $r$  – радиус нагревателя,  $\chi$  – температуропроводность жидкости,  $C(\chi, \nu)$  – коэффициент, зависящий от температуропроводности и вязкости среды,  $d$  – толщина слоя.

Найденное значение коэффициента пропорциональности  $k$  для разных жидкостей приведено в таблице 2:

Таблица 2 — Коэффициент пропорциональности  $k$  для разных жидкостей

	Вода	Гептан	Этанол	Среднее
Эксперимент	$0.56 \pm 0.03$	$0.56 \pm 0.02$	$0.57 \pm 0.02$	$0.56 \pm 0.03$
Расчет	$0.568 \pm 0.004$	$0.565 \pm 0.004$	$0.563 \pm 0.004$	$0.565 \pm 0.004$

Среднее значение –  $k = 0.56 \div 0.57$  хорошо согласуется с известными результатами для осесимметричного плюма.

В четвертой главе описаны результаты лабораторного и численного экспериментов, направленных на изучение установившегося конвективного течения от компактного нагревателя в прямоугольной полости. Показано существование, как минимум, двух конвективных режимов, сменяющих друг друга по мере увеличения числа Рэлея, которое в данной и следующей главах определено по высоте ячейки. Изучено влияние толщины рабочего слоя, теплопроводности боковых стенок, а также интенсивности подогрева на структуру конвективного течения.

Так как основная интенсивность рассматриваемого течения происходит в плоскости широких граней, численная задача решается в двухмерной постановке, а соответствующая геометрия представляет собой прямоугольник высотой  $H$  и шириной  $L$ . Течение создается нагревателем радиусом  $R$ , центр которого совпадает с началом координат.

Для имитации третьего измерения тонкого вертикального слоя в уравнение движения жидкости добавляется объемная сила  $\vec{F} = -12 \frac{\nu \vec{u}}{d^2}$ , которая отвечает

за вязкое трение о широкие грани ячейки. Течение жидкости внутри расчетной области предполагается ламинарным, а диссипация энергии за счет сил внутреннего трения не учитывается. В этом приближении течение описывается системой уравнений Навье–Стокса в приближении Буссинеска.

На твердых границах задается условие прилипания. Верхняя граница считается изотермической и выполняет роль холодильника  $T(y = H) = T_0$ . На боковых стенках ( $x = \pm L/2$ ), в зависимости от реализации, задаются либо адиабатические условия ( $\nabla T_n = 0$ ), либо постоянная температура, равная температуре верхней границы  $T_0$ . На нижней границе задается распределение температуры, призванное симитировать локализованный подогрев внутри области полуширины  $R$ . В задаче моделируется поведение жидкой среды с постоянными свойствами, приближенными к свойствам воды. В ходе численного эксперимента варьируются температура нагревателя  $\Delta T$ , размер нагревателя  $R$ , а также аспектное соотношение сторон  $A = L/H$ .

Численный расчет сопровождается проведением лабораторного эксперимента. Вертикальная кювета, заполненная дистиллированной водой, имеет высоту  $H = (28.0 \pm 0.1)$  мм и ширину  $L = (24.0 \pm 0.1)$  мм. Толщины рабочего слоя  $d_z$ :  $(2.0 \pm 0.1)$  мм,  $(4.0 \pm 0.1)$  мм,  $(6.0 \pm 0.2)$  мм или  $(8.0 \pm 0.2)$  мм. Широкие грани кюветы закрыты кристаллическим стеклом из фторида лития  $LiF$  толщиной  $(6.0 \pm 0.1)$  мм. Верхней границей служит массивный алюминиевый теплообменник, выполняющий роль холодильника. С боков полость ограничена стенками из органического стекла толщиной  $(10.0 \pm 0.5)$  мм.

Полагается, что верхняя граница находится при комнатной температуре, в то время как боковые обеспечивают достаточную теплоизоляцию. Нагрев осуществляется снизу компактным нагревателем, представляющим собой медный диск радиусом  $R = 1$  мм, вмонтированный в плексигласовую плиту. Диск приводится в контакт с электрическим источником тепла. Степень нагрева регулируется изменением величины тока, текущего через резистор, и контролируется дифференциальной термопарой. Постоянная температура нагревателя обеспечивается ПИД-регуляцией.

Для визуализации возникающего течения используются полистироловые светорассеивающие частицы, освещенные со стороны узких прозрачных граней ячейки лазерным ножом. Полученные последовательности изображений обрабатываются корреляционными методами PIV. Кроме того, прозрачные в инфракрасном диапазоне литийфторидные стекла позволяют измерить распределение температуры на границе соприкосновения рабочей среды и широкой стенки при помощи тепловизора.

Как показывают проведенные эксперименты, в зависимости от условий стационарный поток может иметь разную структуру. На рис. 8 показаны поля скорости и температуры симметричного и асимметричного режимов. Сформировавшаяся симметричная конвективная структура (рис. 8 а) представляет собой два вала, вращающихся в плоскости широких граней полости в противоположных направлениях от центра к периферии. Соответствующее распределение

температуры принимает форму конвективного факела, представляющего собой своеобразный канал, увенчанный тепловой ”шапкой”.

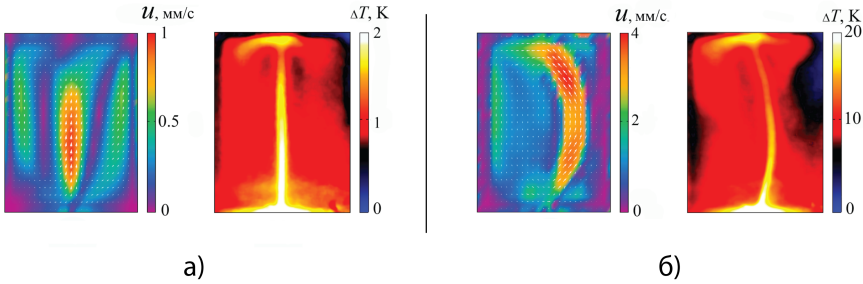


Рис. 8 — Экспериментальные поля скорости и температуры.  $A = 6/7$ ,  $R = 1$  мм и  $d = 4$  мм. а)  $\Delta T = 2$  К, симметричный двухваликовый режим. б)  $\Delta T = 20$  К, асимметричный режим.

В случае превышения температурой нагревателя некоторого критического значения в эксперименте наблюдается нарушение симметрии двухваликового течения (рис. 8 б). По мере усиления теплового напора конвективный факел начинает постепенно отклоняться в сторону, усугубляя асимметрию. Похожие изменения течения предсказываются и результатами численного моделирования. Так, в ячейке с аспектным соотношением  $A = 6/7$  и размером нагревателя  $R = H/10$  при числе Рэлея  $Ra = 10^5$  в расчете наблюдается симметричное двухваликовое течение. Как и в эксперименте, превышение числом Рэлея некоторого критического порога, приводит к отклонению конвективного факела в сторону одной из стенок.

Изменение структуры течения сказывается на интенсивности теплоотдачи. На рис. 9 а приведена зависимость числа Нуссельта  $Nu$  от числа Рэлея  $Ra$ , полученная в результате численного моделирования для  $A = 3/4$ ,  $R = H/10$  и  $d_z \rightarrow \infty$ .

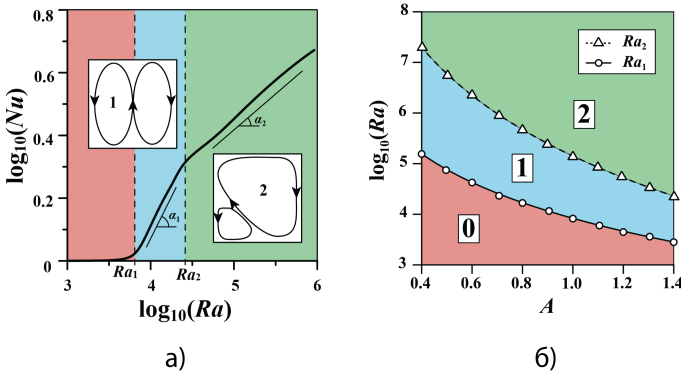


Рис. 9 — а) Зависимость числа Нуссельта от числа Рэлея. б) Зависимость критических значений числа Рэлея  $Ra_1$  и  $Ra_2$  от аспектного соотношения  $A$ .

Функция  $\log_{10} Nu = f(\log_{10} Ra)$  имеет два заметных изгиба. Первый, в области  $Ra \approx 10^{3.8}$ , возникает в момент возникновения интенсивного течения. Слева от него кривая остается практически параллельной горизонтальной оси  $Nu \approx 1$ . Там наблюдается медленное ползущее течение, оказывающее слабое влияние на тепловые процессы. Переход к интенсивному течению происходит по достижении некоторого критического значения числа Рэлея  $Ra_1$ . Справа от него реализуется симметричный конвективный  $Nu \sim Ra^{\alpha_1}$  режим. Второй изгиб функции для указанных геометрических параметров наблюдается при  $Ra_2 \approx 10^{4.5}$ . В этот момент симметрия двухваликового течения нарушается, и конвективный факел начинает отклоняться в сторону так, как это было описано выше.

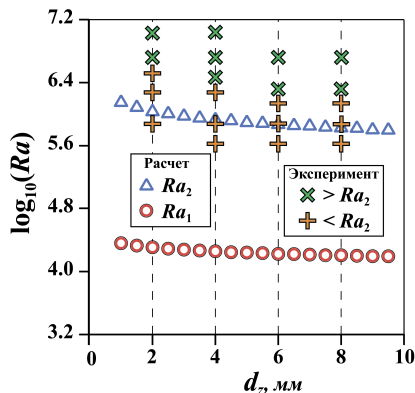


Рис. 10 — Зависимость расчетных и экспериментальных критических значений числа Рэлея от толщины рабочего слоя.  $R = H/10$ ,  $A = 6/7$ .

Уменьшение толщины слоя  $d_z$  приводит к увеличению гидродинамического сопротивления и поднимает границы существования режимов. Сравнение результатов численного моделирования и эксперимента приведено на рис. 10. Несмотря на качественное совпадение, с увеличением толщины рабочего слоя пороговые значения числа Рэлея уменьшаются, экспериментальные точки ложатся выше расчетных. Это вызвано использованием двухмерной математической модели.

**Пятая глава** посвящена исследованию возможностей использования узких слоев в качестве измерительных полостей конвективных акселерометров. Проведена оценка чувствительности таких приборов и приведено описание свойств лабораторного образца конвективного датчика сильных низкочастотных ускорений, разработанного и собранного в ходе выполнения диссертационной работы.

Математическая постановка численного эксперимента повторяет рассмотренную в предыдущей главе. В ходе проведения исследования отслеживались изменения структуры течения и теплового поля в результате увеличения угла

наклона плоскости широких граней  $\alpha$ . Управляющие параметры  $Ra = 5 \cdot 10^6$  и  $Pr = 6.9$  выбраны таким образом, чтобы в результате нагрева снизу в ячейке возникало двухваловое симметричное течение. Теплофизические параметры исследуемой жидкости соответствуют воде. Последовательность рассчитанных изотерм и линий тока приведены на рис. 11.

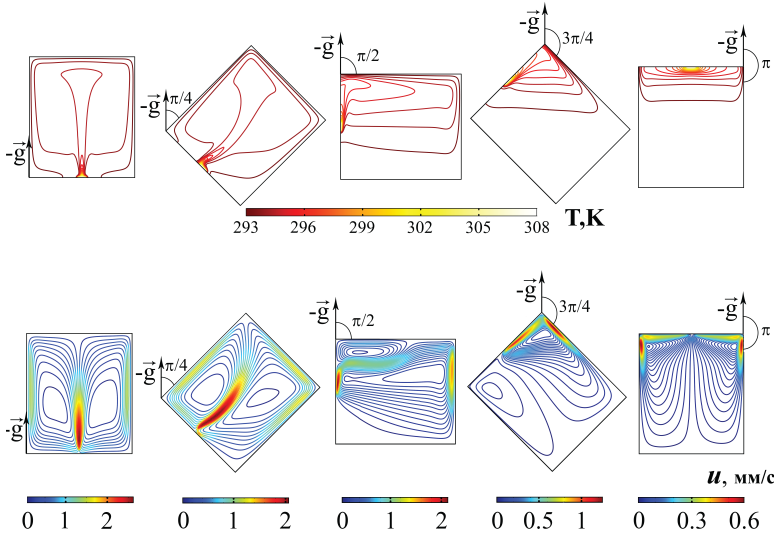


Рис. 11 — Изотермы и линии тока при различных значениях углов наклона.  
 $Ra = 5 \cdot 10^6$ ,  $Pr = 6.9$ .

В отсутствие наклона в ячейке реализуется симметричное подъемно-опускное течение, а конвективный факел направлен строго вверх. По мере увеличения угла  $\alpha$  факел начинает постепенно отклоняться в сторону и искривляться. Симметрия течения нарушается, и один из конвективных валов, тот что оказался снизу, увеличивается в размерах, вытесняя второй. Значение угла  $\alpha = \frac{\pi}{2}$  равносильно ситуации локального подогрева сбоку. Доминирующий конвективный вал занимает большую часть доступного пространства. Дальнейшее увеличение наклона приводит к ослаблению интенсивности конвективного течения вплоть до  $\alpha = \pi$ , когда нагреватель располагается сверху, и движение жидкости практически прекращается. Распределение температуры вновь возвращается в симметричное состояние. Отклонение оси ячейки от вертикали равноценно появлению дополнительной силы, направленной горизонтально в лабораторной системе координат. Поэтому наличие угла наклона и постоянного инерционного воздействия на практике должны быть неразличимы.

Способом оценки искривления поля температуры служат показания термопар, размещенных в измерительной полости. На рис. 12 приведены смоделированные сигналы термопар при различных расположениях спаев в ячейке при нагреве  $Ra = 10^7$ . Каждая кривая демонстрирует нелинейную зависимость –



имеет два локальных максимума и, благодаря зеркальной симметрии ячейки, обращается в нуль при значениях угла наклона  $\alpha = 0$  и  $\alpha = \pi$ . Немонотонность функции приводит к неоднозначности интерпретации показаний.

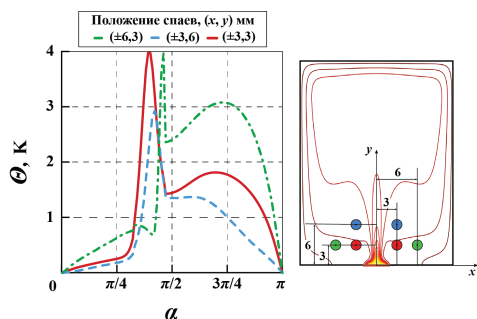


Рис. 12 — Смоделированные показания термопар в зависимости от угла наклона.  $Ra = 10^7$ ,  $Pr = 6.9$ .

на одинаковой высоте ближе к источнику тепла. Взаимное отдаление спаев от оси симметрии приводит к возникновению задержки и уменьшению сигнала в области малых углов (вплоть до  $\alpha < \pi/5$ ). Таким образом, измерительные спаи термопар следует размещать вблизи нагревателя, симметрично относительно вертикальной оси, и как можно ближе друг к другу. В лабораторной модели спаи измерительной термопары размещаются на расстоянии  $3.0 \pm 0.2$  мм от нижней границы и на расстоянии  $3.0 \pm 0.2$  мм по обе стороны от вертикальной оси. Проведенные оценки позволяют утверждать, что минимальная разница между углами, которую сможет измерить подобный прибор, принципиально не будет меньше  $\delta\alpha = 0.21^\circ$  или в терминах ускорений:  $\delta g \approx 0.19 \text{ м/с}^2$  или  $2 \cdot 10^{-2} g$ .

На основании математической модели была создана лабораторная модель конвективного датчика ускорений. Проведены исследования его чувствительности к углу наклона и внешнему инерционному воздействию в условиях постоянного и периодического нагрева. Рабочая полость лабораторной модели конвективного датчика представляет собой прямоугольный параллелепипед высотой  $h = 32$  мм, шириной  $l = 24$  мм, толщиной  $d = 4$  мм. Широкие грани полости ограничены массивом из кристаллического соляного стекла (натрий хлор) толщиной 6 мм, прозрачны в инфракрасной области спектра. Узкие грани изготавливались из алюминия. Рабочие жидкости – гептан и силиконовое масло.

Перепад температур в полости создается точечным нагревателем и холодильником в форме ребристого параллелепипеда со сторонами 15:24:16 мм. Нагревательный элемент выполнен в виде резистора с сопротивлением 1 кОм и встроен в плиту из плексигласа размерами 100:100:16 мм. Возникающий перепад температур  $\Delta T$  между нагревателем и холодильником регистрируется контрольной термопарой. Для изучения температурного поля используются горизонтальные сигнальные термопары, расположенные в центре ячейки и вблизи

Так, например, при сигнале  $\Theta = 1.6$  К ячейка может быть наклонена как под углом  $\pi/3$ , так и под углами  $\pi/2$  или  $3\pi/5$  к вертикали. Наиболее чувствительным к изменению угла измерительная система оказывается в области слева от первого пика, что накладывает существенные ограничения на область применимости конвективных систем в качестве акселерометров.

Максимальные значения смоделированного сигнала оказываются близкими для спаев, расположенных

нагревателя. Эксперименты, направленные на исследование влияния наклона кюветы относительно вертикали на конвективную систему в плоскости широких граней, проводились при различных перепадах температур между нагревателем и холодильником.

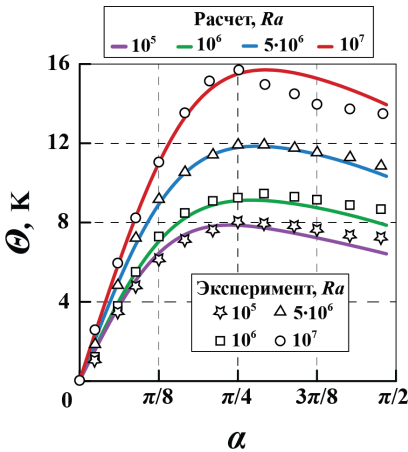


Рис. 13 — Рассчитанные и экспериментальные сигналы в зависимости от угла наклона.

Как и предсказывалось в расчетах, прибор имеет большую чувствительность при большей мощности нагрева. Так, при разнице температур в 100 К, прибор позволяет различить два близких угла, отличающиеся на  $0.44^\circ$ , а при перепаде 30 К чувствительность прибора –  $0.54^\circ$ , что хорошо согласуется с проведенными оценками.

В **заклЮчении** приведены основные результаты работы.

#### Итоги выполненного исследования:

1. Продемонстрировано, что возникновение конвективного течения над нагревателями круглой, квадратной, треугольной и пятиугольной форм может протекать с образованием одиночного или раздвоенного теплового плюма. Значение критического числа Рэлея, разграничивающего области реализации этих режимов, заключено в интервале  $Ra_{Nc} = (8.6 \pm 0.2) \cdot 10^2$  и остается постоянным для всех нагревателей правильной многоугольной формы.
2. Показано, что процесс эволюции теплового плюма в узком вертикальном слое качественно совпадает с осесимметричным случаем, однако, протекает значительно медленнее. Сравнение результатов эксперимента, с численным расчетом позволило выявить зависимость скорости роста теплового плюма от геометрии задачи и условий подогрева. Получена формула для скорости роста теплового плюма в случае постоянной температуры нагревателя.

Найдена зависимость среднего значения разницы температур между спаями сигнальных термопар  $\Theta$  от угла наклона кюветы  $\alpha$ . Результаты эксперимента приведены в сравнении с результатами численного моделирования на рис. 13. При перепаде температур между нагревателем и холодильником в 100 К ( $Ra = 10^7$ ) полученная зависимость имеет максимум при величине угла  $\pi/4$ , который несколько сглаживается при понижении мощности нагревателя. Появление максимума связано со сном растущего теплового факела в сторону от нагревателя, в результате чего оба спая дифференциальной термопары оказываются на одном конвективном валу, и разница температур между ними уменьшается.

3. Обнаружено, что в условиях локализованного подогрева снизу узкого вертикального слоя жидкости рост числа Рэлея приводит к смене зеркально-симметричного режима течения асимметричным. Показано, что с увеличением толщины рабочего слоя или аспектного соотношения сторон критическое число Рэлея, разделяющее области существования режимов, уменьшается. Результаты расчетов согласуются с данными натурного эксперимента.
4. Проанализирована возможность использования узких вертикальных слоев в качестве рабочего элемента конвективных акселерометров. Проведены оценки чувствительности потенциального прибора. Изучено влияние угла наклона кюветы, а также внешнего инерционного воздействия на поля температуры и скорости в локально подогреваемой ячейке Хеле-Шоу. Исследованные системы могут быть пригодны для измерения низкочастотных сильных ускорений.

### **Наиболее значимые публикации автора по теме диссертации**

1. *Kondrashov, A.* Stationary convective regimes in a thin vertical layer under the local heating from below / A. Kondrashov, E. Burkova // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2018. — Vol. 118. — P. 58—65. (WoS)
2. *Kondrashov, A.* Heater shape effects on thermal plume formation / A. Kondrashov, I. Sboev, P. Dunaev // International Journal of Thermal Sciences. — 2017. — Vol. 122. — P. 85—91. (WoS)
3. *Kondrashov, A.* Evolution of convective plumes adjacent to localized heat sources of various shapes / A. Kondrashov, I. Sboev, P. Dunaev // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2016. — Vol. 103. — P. 298—304. (WoS)
4. *Kondrashov, A.* Effect of boundary conditions on thermal plume growth / A. Kondrashov, I. Sboev, K. Rybkin // Heat and Mass Transfer. — 2016. — Vol. 52, no. 7. — P. 1359—1368. (WoS)
5. Развитие теплового плюма в узком вертикальном слое / И. А. Бабушкин [и др.] // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. — 2015. — 2 (34). — С. 14—25. ( )
6. Тепловая конвекция в ячейке Хеле-Шоу при действии центробежных сил / И. А. Бабушкин [и др.] // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. — 2012. — № 1. — С. 14—25. ( )
7. *Кондрашов, А.* Развитие конвективного факела в вертикальном слое / А. Кондрашов, И. Сбоев, И. Бабушкин // Вестник Пермского университета. Серия: Физика. — 2012. — № 4. — С. 101—105.
8. *Кондрашов, А. Н.* Влияние наклона и центробежных сил на конвекцию в ячейке Хеле-Шоу / А. Н. Кондрашов, И. А. Бабушкин // Вестник Пермского университета. Серия: Физика. — 2012. — № 1. — С. 23—28.

*Кондрашов Александр Николаевич*

Динамика конвективного течения над локализованным источником тепла

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать \_\_\_\_\_.\_\_\_\_\_.\_\_\_\_\_. Заказ № \_\_\_\_\_

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография \_\_\_\_\_