

УТВЕРЖДАЮ
Проректор МГУ имени М.В.
Ломоносова

доктор физико-математических
наук, профессор

А.А. Федянин

«7» ноября 2019 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова" о диссертационной работе Кондрашова Александра Николаевича «Динамика конвективного течения над локализованным источником тепла», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Актуальность темы. Работа А.Н. Кондрашова посвящена исследованию поведения конвективных структур над локализованным источником тепла в областях ограниченного объема. Изучены процессы формирования структур на начальных стадиях развития, а также и установившиеся конвективные течения. Проанализирована возможность использования узкой конвективной ячейки с локализованным источником тепла в качестве датчика наклона или акселерометра. Работа сочетает применение методов лабораторного и численного эксперимента. Решение рассмотренных в диссертации задач актуально для проблем геофизики и экологии, а также при проектировании компактных электронных устройств с пассивным охлаждением.

Научная новизна диссертационного исследования состоит в анализе явлений, связанных с формированием течения и соответствующего поля температуры над нагревателями круглой, треугольной, квадратной и пятиугольной форм; в выводе формулы для скорости роста теплового плюма в узких вертикальных ячейках в условиях постоянной температуры нагревателя; в

получении карты стационарных конвективных режимов в узком плоском вертикальном слое при локализованном нагреве снизу; в экспериментальном изучении чувствительности конвективного акселерометра на основе узкого слоя жидкости с компактным источником тепла.

Научная и практическая значимость. Знание закономерностей возникновения течений над нагревателями в форме многоугольников может оказаться полезным при проектировании компактных электронных устройств с пассивным охлаждением, а также при решении практических задач, требующих эффективного управления течением и тепломассопереносом. Результаты изучения роста теплового плюма в узких слоях могут быть интересны специалистам по теории конвекции, а также в области геологии. Исследования установившегося течения и его устойчивости решают прикладную задачу оптимизации рабочих параметров конвективных акселерометров. Лабораторный образец конвективного акселерометра, созданный в рамках выполнения работы, может быть использован в качестве сейсмологического датчика низкочастотных ускорений или угломера.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы представлены на всероссийских и международных конференциях.

Публикации. В ходе выполнения работы опубликовано восемь статей, шесть из которых напечатаны в журналах, входящих в перечень ВАК и базу данных Web of Science.

Достоверность результатов обеспечивается продуманными методиками, устранением случайных ошибок в лабораторных экспериментах, применением корректных постановок и методов дискретизации, подтверждается сравнением результатов лабораторных и численных экспериментов, согласием с известными результатами других работ.

Оценка содержания диссертации. Диссертационная работа А.Н. Кондрашова характеризуется полнотой и завершенностью, написана ясно, грамотно и достаточно подробно, хорошо иллюстрирована графиками и рисунками. Текст диссертации включает описание лабораторных установок, постановок задач, описание применяемых методов исследования, изложен на требуемом научном уровне.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка

литературы, списка иллюстративных материалов и списка таблиц.

Во введении обсуждается актуальность темы работы, сформулированы цели и задачи исследования, изложены научная новизна и положения, выносимые на защиту, дана общая характеристика работы.

В первой главе описано современное состояние тематики конвективных течений над локализованными источниками тепла, а также указаны направления, требующие дальнейшего, более детального изучения.

Во второй главе изучена начальная стадия эволюции конвективного течения над нагревателем круглой или многоугольной формы. Для круглого нагревателя в лабораторном эксперименте, связанном с визуализацией течения и температурного поля, обнаружены различные сценарии формирования конвективной структуры: при малых числах Рэлея образуется одиночный плюм, при больших – раздвоенный. Определена область существования данных режимов в плоскости параметров число Прандтля – число Рэлея. В ходе численного моделирования начальной стадии течения также получены структуры в виде одиночного и раздвоенного плюмов. Исследовано возникновение течения над нагревателями в форме правильного многоугольника: в эксперименте для треугольника и четырехугольника; в численном моделировании для треугольника, четырехугольника и пятиугольника. Показано, что использование в качестве управляющего параметра эффективного числа Рэлея, позволяет свести все экспериментальные зависимости к универсальной.

В третьей главе диссертации изучена скорость распространения теплового плюма в узком вертикальном плоском слое (толщина слоя много меньше его горизонтального и вертикального размеров). Сначала обсуждаются результаты эксперимента, характеризующие скорость всплытия плюма. Заметное отличие от формулы Бэтчелора, объясняется наличием времени прогрева нагревателя и возрастанием гидродинамического сопротивления на боковых гранях. В дальнейшем проведено численное моделирование, результаты которого совпадают с данными лабораторного эксперимента. Для случая постоянной температуры нагревателя получена формула, характеризующая скорость всплытия плюма. Степенные зависимости этой скорости от интенсивности нагрева, размера источника и характеристик жидкости подтверждены в

численном эксперименте. Также отмечено, что толщина слоя сильнее сказывается на развитии теплового факела в жидкостях с высокой вязкостью и температуропроводностью.

В четвертой главе изучены стационарные режимы конвективных течений, сформировавшиеся над локализованным источником тепла в плоском вертикальном слое. В ходе лабораторного эксперимента и численного моделирования на основе анализа поля скоростей и температур показано, что в зависимости от степени подогрева, в данной системе существуют два интенсивных режима течения: симметричный и асимметричный. Показано, что число Рэлея разделяющее, области существования данных режимов уменьшается с ростом толщины слоя. В численном моделировании получены зависимости чисел Рэлея, ограничивающих область существования симметричного режима от аспектного соотношения слоя в плоскости широких граней. Кроме того, проанализирована зависимость степени асимметрии течения от числа Рэлея. Показано, что критическое число Рэлея, соответствующее переходу от симметричного к асимметричному течению не зависит от тепловых условий на боковых границах. В то же время, скорость роста степени асимметрии в случае теплопроводных границ (при постоянной температуре) значительно превосходит скорость роста в случае теплоизолированных боковых границ.

В пятой главе диссертации обсуждается лабораторный образец конвективного акселерометра, созданного на основе тонкого вертикального слоя с локальным нагревом. На основе численного моделирования определено оптимальное расположение термопар для более точного измерения температурных искажений, связанных с изменением структуры конвективного течения вследствие наклона ячейки, либо действия инерционных ускорений. Проведены оценки изменения угла наклона ячейки или ускорений, которые может измерить предлагаемый прибор.

В заключении приведены итоги проделанной работы, а также перспективы дальнейшей разработки темы.

В диссертационной работе получены новые важные результаты:

1. Методами экспериментального и численного моделирования продемонстрировано, что формирование конвективного течения над

нагревателями круглой, квадратной, а также правильной треугольной и пятиугольной формы может протекать с образованием одиночного или раздвоенного плюма. Значение эффективного критического числа Рэлея, разделяющего области существования этих режимов, остается постоянным для всех нагревателей правильной многоугольной формы.

2. Сравнение результатов лабораторного эксперимента с данными численного моделирования позволило найти зависимость скорости роста теплового плюма от условий подогрева и геометрии задачи и получить формулу для скорости роста в случае постоянной температуры нагревателя.

3. Показано, что в узком плоском вертикальном слое жидкости при локальном подогреве существуют два интенсивных стационарных режима течения: зеркально-симметричный и асимметричный. Смена режимов происходит при превышении числом Рэлея критического значения, которое уменьшается ростом толщины и высоты слоя жидкости.

4. Показано, что узкие вертикальные слои жидкости можно применять в качестве измерительных компонентов конвективных низкочастотных датчиков сильных ускорений или угломеров. Проведены оценки чувствительности потенциальных приборов.

По содержанию диссертации можно сделать следующие замечания:

1. При численном моделировании начальной стадии формирования течений в гл. 2 используется условие постоянства температуры на нижней границе ячейки, между тем, условия лабораторного эксперимента п.2.1.1 (стр. 34) предполагают скорее отсутствие потока тепла на дне ячейки вне нагревателя. Насколько, по мнению автора, изменение тепловых граничных условий может повлиять на результат?

2. В некоторых местах диссертации изложение недостаточно подробно, что затрудняет ее чтение. Так, отсутствуют информация о тепловых граничных условиях на боковых границах ячейки (гл.2, стр. 46). На стр. 51 обсуждается граница между режимами формирования одиночного и раздвоенного плюмов в зависимости от числа Прандтля и указано, что «отношение вязкости к температуропроводности изменялось от 5 до 10^3 ».

Хотелось бы видеть в тексте информацию о том, для скольких значений числа Прандтля был проведен расчет, тем более, что в лабораторном эксперименте эта зависимость исследована достаточно подробно (рис. 2.7, стр. 39).

3. На Рис. 3.8 (стр. 66) приведено сравнение зависимости квадрата скорости распространения фронта тепловой волны, определенной в эксперименте и рассчитанной для случая учета прогрева источника из уравнений (3.5). В уравнение (3.5) входит время, то есть значение скорости распространения фронта изменяется с течением времени. Какому значению времени соответствуют точки на рис. 3.8, рассчитанные по формуле (3.5)?

4. В главе 5 приведена оценка точности регистрации разницы различных ускорений с помощью конвективного акселерометра. Хотелось бы, чтобы автор более подробно обосновал эту оценку.

Необходимо отметить, что сделанные замечания не изменяют общего положительного впечатления о диссертационной работе и в некоторой мере являются пожеланиями на будущее.

Диссертационное исследование выполнено автором на современном уровне и является завершенной научно-исследовательской работой в области экспериментального и теоретического исследования конвективных течений, возникающих в замкнутых областях над локализованным источником тепла. Представленные в диссертации результаты достоверны, выводы обоснованы. Применяемые в работе подходы могут быть использованы при изучении актуальных задач конвекции и теплопереноса.

Диссертационная работа содержит достаточное количество рисунков и графиков, представляющих результаты экспериментальных исследований и численного моделирования. После каждой главы имеются выводы. В целом по работе сформулированы итоги.

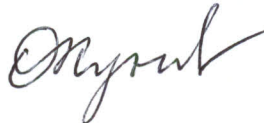
Содержание диссертации достаточно полно и правильно отражено в автореферате.

Таким образом, представленная диссертация «Динамика конвективного течения над локализованным источником тепла» удовлетворяет всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденных постановлением Правительства РФ N842 от 24.09.2013, а ее автор – Кондрашов Александр Николаевич – заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости,

газа и плазмы.

Отзыв составлен заведующим лабораторией общей аэродинамики Научно-исследовательского института механики Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова доктором физико-математических наук Никитиным Николаем Васильевичем. Отзыв обсужден и утвержден на семинаре «Неустойчивость и турбулентность» в НИИ механики МГУ 5 ноября 2019г. Протокол №37.

Директор НИИ механики МГУ,
кандидат физико-математических наук



Юрий Михайлович Окунев

Заведующий лабораторией общей аэродинамики
НИИ механики МГУ,
доктор физико-математических наук



Николай Васильевич Никитин

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (Научно-исследовательский институт механики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова)

Адрес: 119192 Москва, Мичуринский проспект, д. 1

Телефон: (495) 939-31-21

E-mail: common@imec.msu.ru