



**ПОЛИТЕХ**  
Санкт-Петербургский  
политехнический университет  
Петра Великого

На правах рукописи

**ХРАПУНОВ ЕВГЕНИЙ ФЕДОРОВИЧ**

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
СТРУКТУРЫ СВОБОДНОКОНВЕКТИВНОГО ТЕЧЕНИЯ НАД  
ЛОКАЛЬНО НАГРЕТОЙ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ**

Специальность 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Научный руководитель доктор физико-математических наук, профессор  
**Чумаков Юрий Сергеевич**

**Исаев Сергей Александрович**

доктор физико-математических наук, профессор,  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации», заведующий НИЛ фундаментальных исследований

**Черкасов Сергей Гелиевич**

доктор физико-математических наук, профессор,  
Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации «Исследовательский центр имени М.В. Келдыша», главный научный сотрудник отделения ракетных двигателей на твердом топливе

**Шеремет Михаил Александрович**

доктор физико-математических наук, доцент,  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», заведующий научно-исследовательской лабораторией моделирования процессов конвективного теплопереноса

Защита диссертации состоится «27» сентября 2021 г. в 16:00 часов на заседании диссертационного совета У.01.02.05 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, 1-й корпус, 3-й этаж, ауд. 348-8.

С диссертацией можно ознакомиться на сайте [www.spbstu.ru](http://www.spbstu.ru) и в библиотеке СПбПУ.

Ваши отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, СПбПУ, ученому секретарю диссертационного совета У.01.02.05

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета У.01.02.05  
к.ф.-м.н.

  
Гусева Е.К.

**Актуальность темы диссертационного исследования.** В последние десятилетия наблюдается повышение интереса к изучению свободноконвективных течений, формирующихся в результате возникновения неоднородностей в поле плотности. Связано это с тем, что механизмы свободной конвекции являются определяющими в процессах, имеющих важное значение в природе и различных технических приложениях. Действительно, естественноконвективные процессы являются доминирующими в большинстве метеорологических, геофизических, океанических процессах. В технических приложениях учет свободноконвективного движения необходим при проектировании систем вентилирования, кондиционирования, создания микроклимата, при решении задач повышения эффективности работы разнообразных теплообменных аппаратов.

Анализ исследований в области свободноконвективного теплообмена показывает, что свободноконвективный пограничный слой, формирующийся вдоль вертикальной нагретой поверхности, является уже хорошо изученным. Иначе обстоит дело, когда нагреваемая поверхность расположена горизонтально. При подобном положении источника нагрева восходящее течение формируется лишь над небольшим его участком. Над остальной частью поверхности формируется пристенное течение, характеристики которого сильно зависят от формы поверхности, ее температуры, угла наклона относительно уровня горизонта. Иными словами, при изучении подобных течений необходимо учитывать совокупное влияние пристенной области, области восходящего потока, а также области перехода от пристенного течения к восходящему. В дальнейшем для обозначения подобных течений будет использован термин «свободноконвективный факел».

Важнейшим источником информации о характеристиках свободноконвективного потока над локально нагретой горизонтальной поверхностью до сих пор остается физический эксперимент. Однако учитывая активное развитие методов численного решения уравнений Навье-Стокса, в настоящее время наиболее перспективным для получения исчерпывающей информации о характеристиках течений данного вида представляется совмещение двух подходов – физического эксперимента и численного моделирования.

Для стационарных свободноконвективных факелов наиболее изученными являются область пристенного течения и область развитой восходящей струи. Во

многим это связано со справедливостью приближения пограничного слоя в обеих областях. Тем не менее, информация о границах областей над нагреваемой поверхностью конечных размеров, в которых применимы полученные в XX веке зависимости, в литературе отсутствует.

Следует отметить, что большинство современных исследований свободноконвективных факелов ограничиваются только анализом поля скоростей, не уделяя должного внимания эволюции поля температуры. Отсутствие информации о распределении температуры, в свою очередь, не позволяет уточнить представления о характеристиках теплообмена, сформировавшиеся в 50 – 80 годах прошлого века. Однако результаты современных работ указывают на то, что наблюдаемая ранее в экспериментах интенсификация теплообмена может быть вызвана развитием крупномасштабных вихревых структур и сменой режима течения в зоне формирования восходящего течения, а не переходом к развитой турбулентности в пристенной области, как это предполагалось ранее. Смена режимов течения после ее обнаружения в свободноконвективных факелах получила название «пуффинга» – в результате визуальной схожести с процессами, характерными для диффузионных пламён.

Характеристики пуффинга, который является частным случаем бифуркации Хопфа и возникает в свободноконвективном течении, формирующемся над локально нагретым участком горизонтальной поверхности, остаются слабоизученными. В частности, в литературе чрезвычайно мало данных об изменении полей температуры при смене режима течения, и полностью отсутствует информация о влиянии автоколебаний факела на характеристики теплообмена. Также не до конца проясненными остаются собственно сценарии смены режима течения. В немногочисленных работах, посвященных изучению бифуркации применительно к рассматриваемому классу свободноконвективных потоков, по сути лишь в общих чертах охарактеризованы основные стадии смены режима течения. Недостаточная проработанность данного вопроса является следствием отсутствия комплексного анализа характеристик потока в пристенной области.

Приведенное выше не оставляет сомнений в **актуальности проведения исследований** свободноконвективных потоков, формирующихся над локально нагретой горизонтальной поверхностью.

**Степень разработанности научной проблемы.** Анализ литературных источников показывает, что случай *стационарного* свободноконвективного течения, формирующегося над горизонтально локально нагретой поверхностью, является подробно описанным. Имеется большое количество экспериментальных и расчетных данных, описывающих как тепловые и динамические поля в восходящей части потока, так и характеристики течения в пристенной области. Среди них можно выделить исследования Й. Джалурии, Б. Гебхарта, Б.Р. Мортон, Д. Тейлора, В.М. Эльтермана, В.В. Тарасюка, Д.Д. Юсефа, Г.К. Бэтчелора, В.М. Левандовски, Д.Х. Меркина, Л. Перы, С. Прето, З. Ротема, Ф. Кимуры, Ф. Таманини и др.

Характеристики обнаруженной в последнее время бифуркации течения, выражающейся сменой устойчивого стационарного течения устойчивым периодическим, в современных исследованиях представлены слабо, в основном с точки зрения эволюции полей скорости. К наиболее актуальным исследованиям свободноконвективных факелов на разном этапе их формирования следует отнести работы Д.М. Лопеза, Ф. Плудре, М.В. Фама, С.Д. Кима, Т. Хаттори, С.Е. Норриса, А. Кондрашова, И. Сбоева, П. Дунаева, М.П. Киркпатрика, С.В. Армфелда. Изменение характеристик теплообмена при бифуркации течения не освещены в известной нам литературе.

**Цель и задачи диссертационного исследования.** Основной целью настоящего исследования является получение новых данных фундаментального характера о структуре ламинарного свободноконвективного потока, формирующегося над локально нагретой поверхностью в условиях реализации стационарного и автоколебательного режимов течения, а также данных по влиянию смены режимов течения на локальные и интегральные характеристики теплообмена.

Для достижения поставленных целей необходимо было решить следующие основные задачи:

– Создать и протестировать экспериментальный стенд, генерирующий над горизонтальной локально нагретой поверхностью свободноконвективный поток, характеристики которого сохраняются длительное время;

– Провести визуализацию течения, с целью получения информации об общей структуре потока в исследуемом диапазоне числа Грасгофа. В частности, установить

конфигурацию потока в пристенной области, области восходящего течения, а также на участке перехода пристенного слоя в восходящее течение;

– Провести измерения мгновенных и осредненных значений температуры на различных высотах над нагретой поверхностью и при различных значениях числа Грасгофа;

– Получить новые экспериментальные данные о характеристиках теплообмена, а также оценить влияние изменений в структуре течения на теплообмен;

– Отработать методику численного моделирования трехмерного нестационарного течения, провести методические расчеты по выявлению влияния схемных факторов на получаемое численное решение;

– Провести численное моделирование различных режимов свободноконвективного течения над горизонтальной поверхностью; сопоставить экспериментальные и расчетные данные о тепловых полях, дополненные расчетными данными для скоростных полей;

– На основе совместного анализа данных физического эксперимента и численного моделирования охарактеризовать явления, присущие смене стационарного режима течения нестационарным периодическим;

– Посредством численного моделирования оценить влияние слабого наклона нагреваемой поверхности относительно горизонта на изменения в структуре свободноконвективного факела при автоколебательном режиме течения, а также на характеристики локальной и интегральной теплоотдачи.

**Обоснованность и достоверность результатов исследования.** В работе используются апробированные методы измерения температуры в воздухе, а также фундаментальные соотношения теории теплообмена. В соответствующем разделе диссертации оценены неопределенности измерения температуры факела в фиксированной точке пространства. Также в соответствующем разделе работы представлены результаты методического исследования, позволяющие установить отсутствие влияния схемных факторов на получаемое численное решение. Достоверность результатов подтверждается сопоставлением экспериментальных и расчетных данных (мгновенных и осредненных), а также сопоставлением полученных результатов с результатами, представленными в литературе.

**Научная новизна результатов исследования.** Проведены согласованные расчетно-экспериментальные исследования характеристик стационарного свободноконвективного факела при различных значениях числа Грасгофа; в результате анализа полученных данных предложены соотношения для количественной оценки протяженности пристенного слоя вдоль нагретой поверхности.

Впервые подробно описана эволюция полей скорости и температуры в пристенной области факела для автоколебательного режима течения, именуемого пуффингом, а также определена характерная безразмерная частота разрушения пристенного слоя.

Получены новые данные о теплообмене в свободноконвективном факеле, включая оценку влияния смены режима течения на локальную и интегральную теплоотдачу с нагреваемой поверхности.

Впервые оценена степень влияния небольшого наклона нагреваемой поверхности на структуру ламинарного свободноконвективного факела и характеристики теплообмена при автоколебательном режиме.

**На защиту выносятся:**

- Результаты детальных измерений температуры в пространстве формирования факела при реализации автоколебательного режима течения;
- Установленный факт слабой зависимости безразмерной характерной частоты автоколебательного режима течения от числа Грасгофа в интервале  $Gr$  от  $7 \times 10^6$  до  $10,5 \times 10^6$ ;
- Установленный факт существенного влияния периодического разрушения пристенного слоя факела на характеристики теплообмена;
- Уточненная схема стационарного свободноконвективного факела, включающая определенные в работе границы применимости автомодельных закономерностей;
- Установленное влияние небольшого угла наклона поверхности на структуру и характеристики теплообмена свободноконвективного факела при автоколебательном режиме.

**Теоретическая и практическая значимость исследования.** Полученные в работе данные позволяют существенно расширить фундаментальные представления

о структуре свободноконвективных течений, формирующихся над локально нагретыми горизонтальными поверхностями.

Результаты параметрических исследований стационарных свободноконвективных факелов позволяют определить границы применимости автомоделных решений для описания профилей температуры и скорости.

Результаты детальных измерений полей могут служить для валидации вычислительных моделей, разрабатываемых для предсказания характеристик течений данного типа.

Полученные данные о характеристиках теплообмена могут быть использованы при подборе оптимальных условий работы нагреваемых элементов, установленных на изолированных горизонтальных поверхностях.

**Методология и методы исследования.** В работе использованы следующие подходы к получению информации о характеристиках свободноконвективного течения:

- Данные о распределении температуры получены в результате использования метода термометра сопротивления и аппаратного комплекса, позволяющего достаточно точно позиционировать датчик в пространстве, задавать параметры сбора данных, собирать и расшифровывать данные о мгновенных значениях температуры в точке измерения, сохранять полученную информацию;

- Экспериментальные данные по теплоотдаче получены на основании предположения о наличии тонкого теплопроводного слоя вблизи поверхности диска;

- Для проведения численного моделирования свободноконвективного течения, формирующегося над локально нагретой горизонтальной поверхностью, использована коммерческая платформа ANSYS Fluent;

- Применимость использованной численной модели подтверждается методическими исследованиями, в результате которых установлена независимость получаемого решения от схемных факторов;

- Обработка результатов выполнена с использованием разработанного автором программного обеспечения, а также с использованием пакетов CFD-Post, Tecplot, Grapher.

**Личный вклад автора** состоит в настройке экспериментального стенда, проведении визуализации свободноконвективного факела, обработке и анализе

экспериментальных данных об эволюции поля температуры в пространстве формирования течения; постановке, проведении и обработке результатов численного моделирования; проведении сопоставления экспериментальных и численных данных; определении степени влияния обнаруженных нестационарных процессов на характеристики теплообмена.

#### **Апробация результатов исследования.**

Отдельные результаты и разделы работы докладывались и обсуждались:

– Семинаре по фундаментальным проблемам аэродинамики в формате видеоконференции ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского, ИТПМ СО РАН, СПбПУ, ИМех МГУ, 21 января 2020 г;

– Всероссийской конференции с элементами научной школы для молодых ученых «XXXV Сибирский теплофизический семинар», посвященной 75-летию Заслуженного деятеля науки РФ Терехова В.И., Новосибирск, 27 – 29 августа 2019 г;

– 9th International Seminar on Fire and Explosion Hazards, Санкт-Петербург, 21 – 26 апреля 2019 г;

– XXII школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках», Москва, 20 – 24 мая 2019 г;

– Седьмой Российской национальной конференции по теплообмену (РНКТ – 7), Москва, 22 – 26 октября 2018 г;

– Научной конференции с международным участием «Неделя науки СПбПУ», Санкт-Петербург, 2016, 2017, 2018 гг;

– International conference PhysicA.SPb, Санкт-Петербург, 24 – 26 октября 2017 г;

– Юбилейной конференции национального комитета РАН по тепло- и массообмену «Фундаментальные и прикладные проблемы теплообмена» и XXI школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках», Санкт-Петербург, 20 – 24 мая 2017 г;

– XV научно-технической конференции «Молодежь в науке», Саров, 25 – 27 октября 2016 г;

Результаты работы частично получены при поддержке РФФИ в рамках проекта 18-31-00130, выполненного в 2018-2019 годах.

По теме работы опубликовано 10 работ. Три работы опубликованы в рецензируемых научных журналах, рекомендуемых перечнем ВАК, шесть – в одну из баз данных и систем цитирования Web of Science, Scopus.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, 1 приложения и списка литературы, состоящего из 131 наименования. Работа изложена на 162 страницах машинописного текста, содержит 76 рисунков и 4 таблицы.

### **Основные положения и результаты исследования**

**Во введении** обоснована актуальность проводимых исследований свободноконвективного факела, формирующегося над локально нагретой горизонтальной поверхностью. Сформулированы цели исследования, его задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимости, методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов, полученных в диссертации.

**Первая глава** диссертации носит обзорный характер и посвящена анализу результатов экспериментальных и численных исследований свободноконвективных факелов в период с середины двадцатого века до настоящего времени. Оценка общего уровня экспериментально-численных исследований подобных течений свидетельствует:

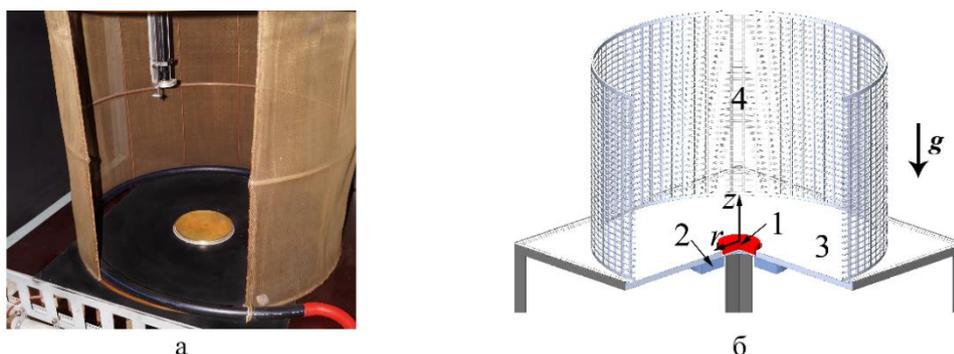
– об отсутствии параметрических исследований стационарных свободноконвективных факелов, проводимых с целью определения границ областей применимости автомодельных решений;

– об отсутствии экспериментальных данных о мгновенных и осредненных значениях температуры в области формирования потока при автоколебательном режиме течения;

– о крайней ограниченности данных о бифуркации течения. Практически не изучено влияние колебаний в факеле на характеристики теплообмена с нагреваемой поверхностью. В целом состояние исследований бифуркации может быть оценено как находящееся на начальном этапе.

Результаты представленного в главе анализа обосновывают актуальность настоящего исследования.

**Вторая глава** посвящена описанию экспериментального стенда и оборудования, используемого при проведении экспериментальных исследований. Основное требование, выдвигаемое к стенду – возможность длительное время поддерживать неизменными условия формирования свободноконвективного факела. Особое внимание уделено описанию конструкции установки и принципам работы нагревательного элемента, позволяющего равномерно нагревать и длительное время поддерживать заданную температуру диска диаметром 190 [мм]. Фото стенда и его схема представлены на рисунке 1. В главе также представлено описание разработанного метода визуализации течения. Описано координатное устройство, позволяющее перемещать зонд в исследуемом пространстве с точностью до 0,05 [мм]. Подробно описана процедура и алгоритм измерения мгновенных и осредненных значений температуры. В главе приведены результаты расчета неопределенностей величин, измеряемых в эксперименте.



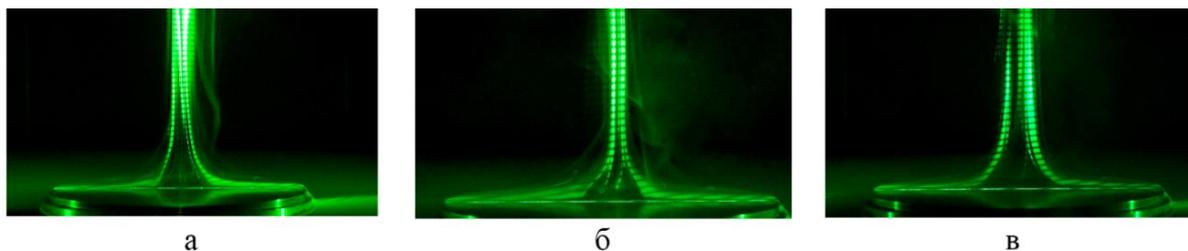
а – фото экспериментального стенда; б – схема экспериментального стенда  
(1 – нагреваемый диск; 2 – элемент теплообменника; 3 – прилегающая, горизонтальная, охлаждаемая плоскость; 4 – защитная сетка)

Рисунок 1. Экспериментальный стенд

**Третья глава** посвящена описанию процедуры численного моделирования. В рамках задачи численного моделирования рассматривается цилиндрическая область, нижняя граница которой представляет собой твердую стенку с локально нагретым круглым участком. Размеры расчетной области соответствуют размерам области, ограниченной сеткой в экспериментальном стенде. При проведении численного моделирования решаются трехмерные уравнения Навье-Стокса в приближении Буссинеска для описания массовой силы. В главе представлены результаты исследований по выявлению зависимости получаемого решения от схемных факторов: количества элементов расчетной сетки и шага по времени.

Показано, что используемые при проведении основной серии расчетов сетка и размер шага по времени не оказывают влияния на получаемое решение.

**Четвертая глава** посвящена описанию результатов экспериментально-численного моделирования свободноконвективного факела в диапазоне значений числа Грасгофа  $[0,9...5,8] \times 10^6$ . Для вычисления числа Грасгофа в качестве линейного масштаба используется радиус диска. Некоторые из результатов визуализации течения представлены на рисунке 2.



а –  $Gr = 1,8 \times 10^6$ ; б –  $Gr = 3,5 \times 10^6$ ; в –  $Gr = 5,8 \times 10^6$

Рисунок 2. Фотографии стационарного свободноконвективного факела

Полученные результаты экспериментального исследования полей температуры, а также характеристик теплообмена, находятся в хорошем соответствии как с данными других авторов, так и с данными проведенного численного моделирования. В частности, над частью поверхности диска обнаружен участок практически автомодельного течения, для определения протяженности которого используется разработанный подход, основанный на анализе распределения продольной (радиальной) компоненты скорости.

Возможность получения достаточно подробных результатов в процессе физического и численного моделирования позволяет уточнить схему стационарного течения. В качестве характеристик стационарного течения используются значения границы пристенного слоя  $r_{bl}^*$ , координаты начала линейного роста динамического и теплового радиуса восходящей части факела ( $z_{up}^{*U}$  и  $z_{up}^{*T}$  соответственно), а также координаты начала автомодельных участков в восходящей части  $z_{auto}^{*U}$  и  $z_{auto}^{*T}$ . Символом «\*» обозначены безразмерные величины. В качестве линейного масштаба выбран радиус диска. Уточненная схема представлена на рисунке 3.

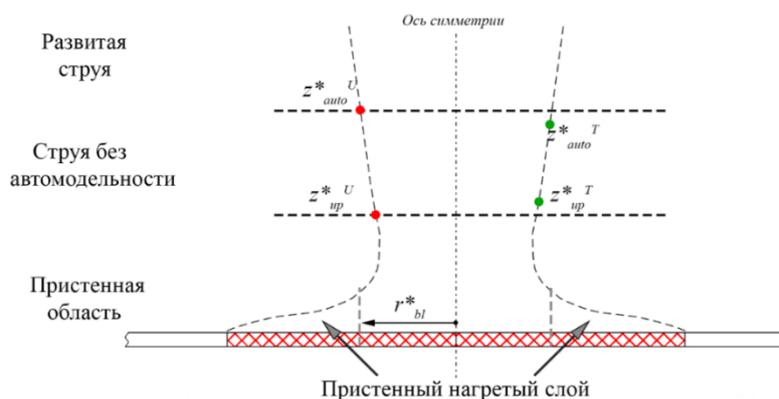


Рисунок 3. Уточненная схема течения при числах Грасгофа  $[0,9...5,8] \times 10^6$ .  
Зависимости координат границ характерных участков в диапазоне чисел  
Грасгофа  $[0,9...5,8] \times 10^6$  свободноконвективного факела представлены  
соотношениями (1) – (3).

$$\begin{aligned} z_{up}^* U &= 1,1 \cdot \exp(1,3 \times 10^{-7} Gr); \\ z_{auto}^* U &= 3,3 \cdot \exp(1,3 \times 10^{-7} Gr); \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} z_{up}^* T &= 0,12 \cdot \ln(Gr) + 0,23; \\ z_{auto}^* T &= 0,6 \cdot \ln(Gr) - 4,50; \end{aligned} \quad (2)$$

$$r_{bl}^* = 2,62 \cdot Gr^{0,125}. \quad (3)$$

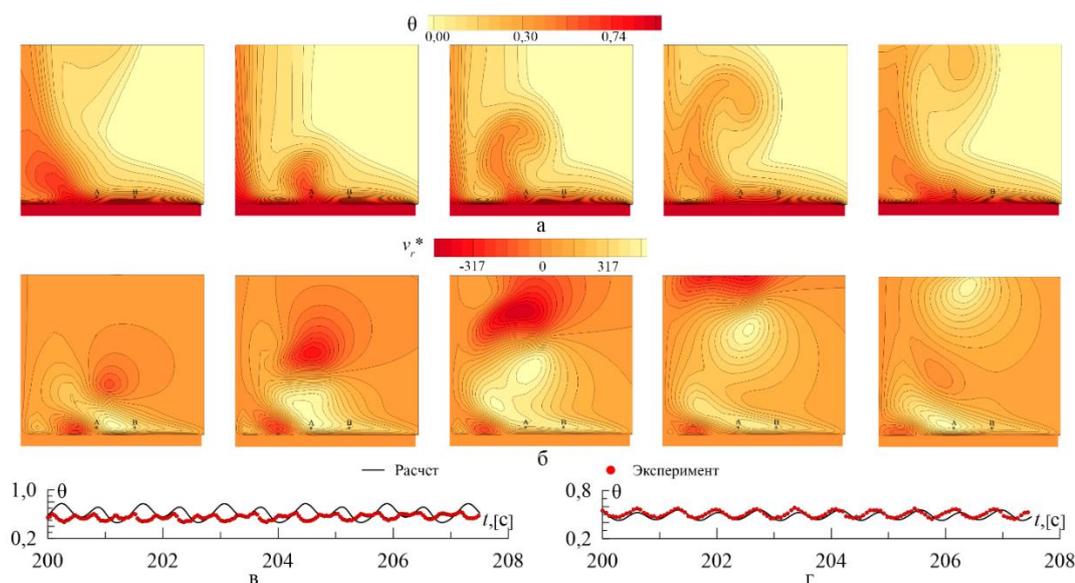
**Пятая глава** посвящена описанию результатов экспериментально-численного моделирования автоколебательного режима факела, называемого пуффингом, над горизонтальной и слегка наклонной поверхностью. Полученные результаты демонстрируют, что при числах Грасгофа в диапазоне от  $6,2 \times 10^6$  до  $15,7 \times 10^6$  происходит периодическое разрушение пристенного слоя, от поверхности диска всплывают перегретые воздушные массы, которые сливаются вниз по течению (вверх от поверхности диска). Фрагменты расчетных полей вблизи поверхности диска в рамках одного периода колебаний представлены на рисунке 4. В качестве безразмерной температуры используется величина  $\theta = (T - T_a) / (T_w - T_a)$ . В качестве масштаба скорости используется отношение кинематической вязкости к радиусу диска.

В результате проводимых исследований установлено, что число Струхаля, характеризующее автоколебательный процесс над горизонтальным нагреваемым

диском, слабо зависит от числа Грасгофа (в диапазоне от  $6,2 \times 10^6$  до  $15,7 \times 10^6$ ) и составляет порядка 0,26. На рисунке 5 представлены значения чисел Струхала при различных числах Грасгофа. Число Струхала вычисляется по радиусу нагреваемого диска и скорости плавучести  $U_b = \sqrt{|g| \cdot \beta \cdot (T_w - T_a) \cdot R}$ .

На основе анализа полученных данных можно заключить, что основная причина возникновения пuffedинга – это неустойчивость пристенного слоя, а ведущей частотой рассматриваемого периодического процесса при  $Gr = 7,9 \times 10^6$  является частота порядка 1,45 [Гц]. При этом отметим, что в рамках численного моделирования частота порядка 1,45 [Гц] соответствует частоте утолщения пристенного слоя, а торообразные вихри формируются с в два раза меньшей частотой. В то же время при проведении экспериментальных исследований установлено, что торообразный вихрь формируется при каждом утолщении пристенного слоя. Подобная разница может быть объяснена, например, повышенным уровнем внешних возмущений, характерным для физического эксперимента.

Полученное значение характерной частоты удовлетворительно согласуется с результатами решений уравнений типа уравнений Орра-Зомерфельда для плоского пристенного свободноконвективного слоя, выполненного в ранних исследованиях других авторов.



а – температура, б – радиальная скорость, в – точка «А»  $(r^*, z^*) = (0,4; 0,04)$ ;  
 г – точка «В»  $(r^*, z^*) = (0,6; 0,04)$

Рисунок 4. Фрагменты полей температуры и радиальной скорости в рамках одного периода колебаний факела при  $Gr = 7,9 \times 10^6$

Несмотря на то, что в случаях  $Gr \in [6,2 \dots 15,7] \times 10^6$  периодический отрыв вихревых колец существенно нарушает картину течения, внутри пристенной области имеется участок автомодельности в температурном поле, о чем можно судить по данным, представленным на рисунке 6.а. Отметим, что вид автомодельной функции, описывающей изменение температуры в пристенном слое, одинаков как для стационарного ( $Gr = 3,5 \times 10^6$  на рисунке 6.а), так и для автоколебательного режима факела. Автомодельная переменная  $\eta$  строится по аналогии с работой [Rotem&Claassen J. Fluid Mech., vol. 38, 1969].

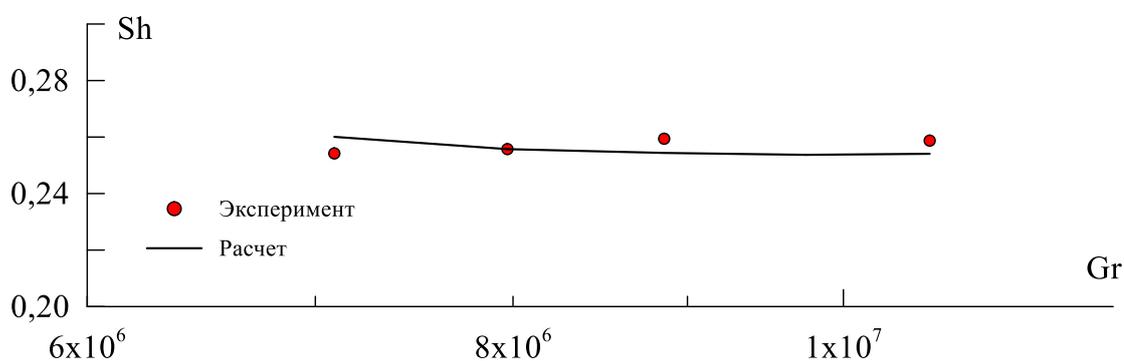
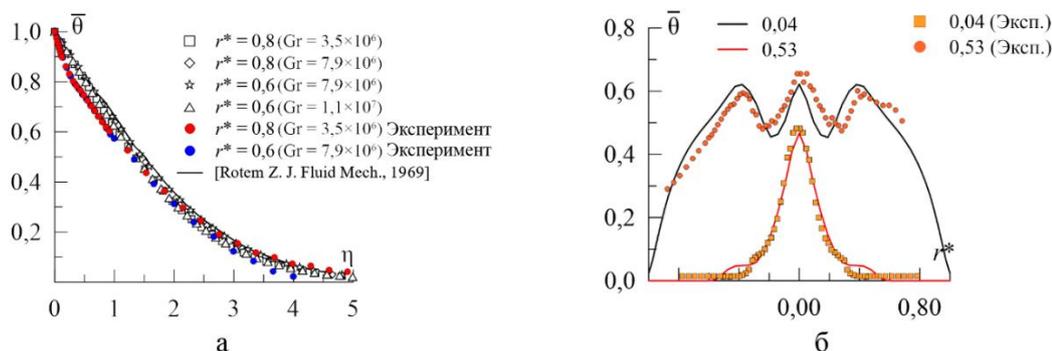


Рисунок 5. Зависимость числа Струхала от числа Грасгофа

При наличии периодического режима течения протяженность пристенного слоя резко сокращается (по сравнению со стационарными случаями). Координата границы протяженности пристенного слоя становится слабо зависимой от изменения числа Грасгофа.

На рисунке 6.б представлены профили безразмерной температуры в пристенной ( $z^* = 0,04$ ) и восходящей ( $z^* = 0,53$ ) областях факела при  $Gr = 7,9 \times 10^6$ . При наличии автоколебаний средняя температура в пристенном слое факела в радиальном направлении изменяется немонотонно. Температура на оси потока не является максимальной, на некотором удалении от оси наблюдаются симметрично расположенные локальные максимумы. По мере удаления от поверхности диска ( $z^* = 0,53$ ) профиль температуры принимает колоколообразную форму. Нарушение монотонности изменения температуры вдоль радиуса наблюдается только на периферии восходящей части факела. Данные эксперимента хорошо согласуются с данными численного моделирования.

Результаты анализа характеристик теплообмена при наличии пуффинга указывают на кардинальное изменение теплообмена у нагреваемой поверхности. Действительно, в процессе периодического отрыва торообразных вихрей к центру диска увлекается воздух комнатной температуры, что приводит к существенным изменениям коэффициента теплоотдачи  $h$ . На рисунке 7 представлено изменение среднего (вдоль радиуса диска) коэффициента теплоотдачи во времени, а также мгновенные распределения коэффициента теплоотдачи вдоль радиуса диска. Осреднение представленного коэффициента  $h$  проведено для диапазона безразмерных радиусов  $r^* \in [0,0 \dots 0,4]$ , поскольку на больших радиусах коэффициент  $h$  практически не изменяется во времени. Возникновение локального минимума в распределении коэффициента  $h$  вблизи  $r^* = 0,5$  в момент времени, обозначенный цифрой 1 на рисунке 7, обусловлено появлением области локального перегрева воздуха в пристенном слое. В рамках одного периода колебаний мгновенные значения коэффициента  $h$  увеличиваются в три-четыре раза, средние – в 1,7 раза.



а – автомодельность поперек слоя; б – профили вдоль диаметра диска  
 Рисунок 6. Распределения осредненной во времени температуры в свободноконвективном факеле при  $Gr = 7,9 \times 10^6$

Анализ предыдущих исследований показывает, что в случае стационарного свободноконвективного факела наибольшее влияние на подобные течения оказывает наклон первоначально горизонтальной поверхности на углы, не превышающие  $5^\circ$ . В то же время в литературе не представлены результаты исследований, посвященных изучению влияния угла наклона на автоколебания факела. В рамках настоящей работы рассмотрено влияние малых углов наклона горизонтальной поверхности на общую структуру факела при наличии автоколебательного режима.

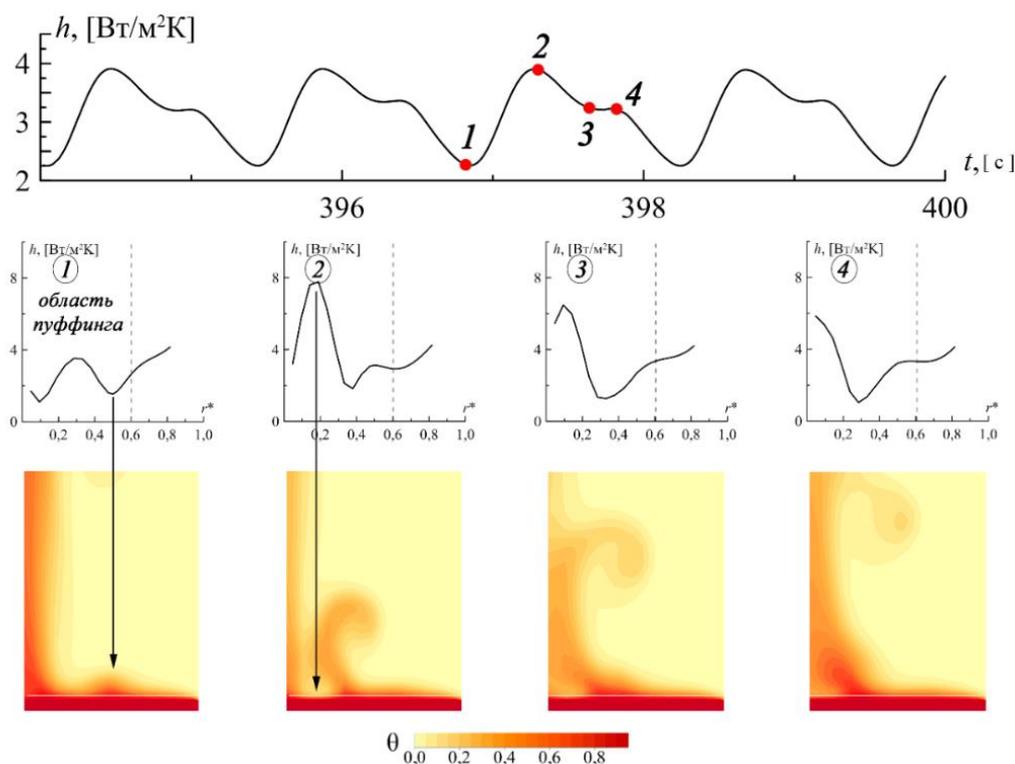


Рисунок 7. Характеристики теплообмена при нестационарном режиме течения

Анализ результатов проведенных расчетов позволяет сделать вывод о том, что при наличии периодического режима течения, можно подобрать угол наклона поверхности для достижения наиболее эффективного теплообмена, как это показано на рисунке 8. Кроме того, при этом на поверхности диска возникает область максимума коэффициента теплоотдачи, что также может быть использовано при разработке систем эффективного охлаждения реальных элементов.

Примечательным также является тот факт, что наклон горизонтальной поверхности на  $5^\circ$  является, по-видимому, предельным случаем наличия устойчивого периодического режима течения. При таком угле наклона в пристенной области наблюдается сложное вихревое движение, а точка перехода от пристенного слоя к восходящему течению смещается практически на границу диска.

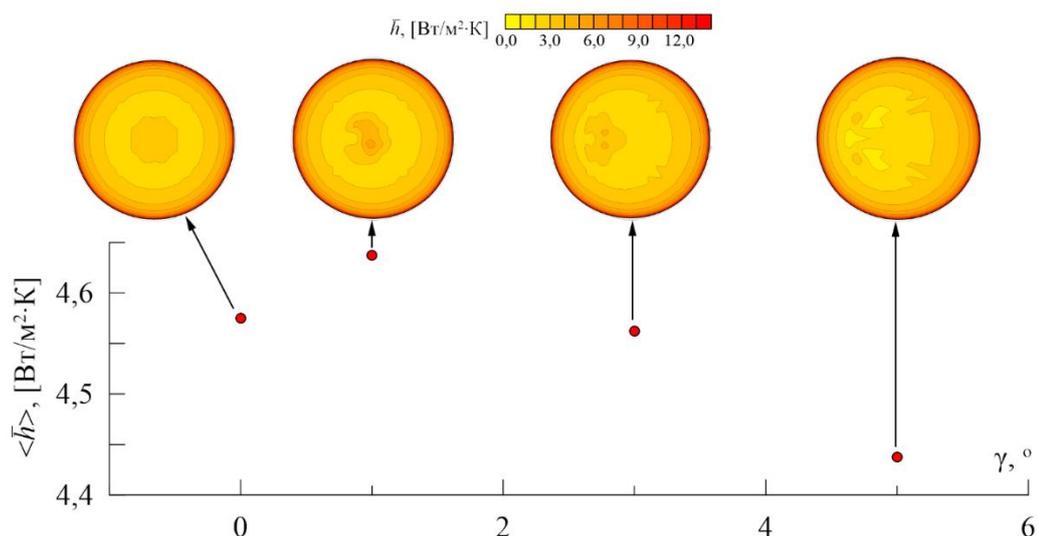


Рисунок 8. Влияние угла наклона поверхности на осредненные коэффициенты теплоотдачи

### Заключение

В ходе выполнения работы получены следующие основные результаты:

- С использованием созданного экспериментального стенда и разработанного метода визуализации течения подробно изучена структура свободноконвективного факела в широком диапазоне чисел Грасгофа. В частности показано, что при числах Грасгофа  $Gr \in [0,9 \dots 5,8] \times 10^6$  пристенное течение, возникающее у диска, плавно переходит в восходящее, формирующееся над небольшой центральной областью поверхности. Измеренные профили температуры в пристенном стационарном течении практически автомодельны на значительном по протяженности участке нагреваемой поверхности. Результаты экспериментальных измерений тепловой толщины пристенного слоя находятся в согласии с расчетными данными;

- Результаты параметрических исследований стационарного свободноконвективного факела позволили определить протяженность пристенного слоя вдоль поверхности диска, а также определить границы участка справедливости автомодельных решений. В восходящей части факела обнаружены области автомодельности по скорости и температуре. На основании полученных данных дополнена модель течения, описанная в ранних работах других авторов;

- При превышении числом Грасгофа некоторого критического значения, лежащего в интервале между  $6 \times 10^6$  и  $7 \times 10^6$ , в исследуемом течении наблюдается бифуркация, в ходе которой устойчивый стационарный режим течения сменяется

устойчивым периодическим – пуффингом. Данные визуализации показывают, что наиболее существенная отличительная черта нестационарного режима заключается в периодическом разрушении пристенного слоя горячими, всплывающими, торообразными вихревыми структурами;

– В результате экспериментального и численного исследования пуффинга в свободноконвективном факеле установлено, что безразмерное значение ведущей частоты периодического процесса практически постоянно в интервале числа Грасгофа  $[7 \dots 10,5] \times 10^6$ , для которого в экспериментах реализовывался этот режим;

– Показано, что и для режима с периодическим разрушением пристенного слоя в периферийной части диска можно выделить участок с практически автомодельными профилями температуры, протяженность которого, однако, существенно меньше, чем в случае стационарного свободноконвективного факела. При этом вид автомодельных переменных для двух режимов течения совпадает;

– Проведен анализ влияния автоколебательного режима течения на характеристики теплообмена. В частности установлено, что в режиме пуффинга значение коэффициента теплообмена вблизи центра диска (осредненное по времени и площади круга в 16% от площади диска) почти в два раза превышает среднее значение этого коэффициента, которое для той же области отвечало бы случаю стационарного течения. При этом в пределах одного периода пуффинга превышение над стационарным значением коэффициента составляет 4-5 раз. Полученные оценки позволяют предположить, что в результате дальнейших исследований пуффинга могут быть разработаны методы локальной интенсификации теплообмена над центральной частью нагреваемой поверхности.

14. Показано, что слабый наклон нагреваемой поверхности (до пяти градусов) можно рассматривать как эффективный метод управления структурой факела в режиме пуффинга и положением области интенсификации теплообмена.

**Основные положения и результаты диссертационной работы изложены в следующих публикациях:**

1. Храпунов, Е.Ф. Влияние угла наклона локально нагретой поверхности на теплообмен при бифуркации свободноконвективного факела / Е.Ф. Храпунов, Ю.С. Чумаков // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. – 2020. – т. 13(4). – сс. 77–88 (**ВАК, Scopus, Web of Science**)
2. Храпунов, Е.Ф. Структура свободноконвективного течения над горизонтальным нагретым диском при небольших числах Грасгофа / Е.Ф. Храпунов, Ю.С. Чумаков // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. – 2018. – т. 11(4). – сс. 47–60 (**ВАК, Scopus, Web of Science**)
3. Храпунов, Е.Ф. Естественная конвекция над горизонтальным нагретым диском / Е.Ф. Храпунов, Ю.С. Чумаков // Тепловые процессы в технике. – 2016. – т.8(2). – сс. 75–80 (**ВАК**)
4. Khrapunov, E. Structure of the natural convective flow above to the horizontal surface with localized heating / E. Khrapunov, Y. Chumakov // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2020. – vol. 152. – 12 p. (**Scopus**)
5. Khrapunov, E.F. Visualization of instability processes in pure thermal plume / E.A. Kuznetsov, E.V. Kolesnik, E.F. Khrapunov // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – vol. 1382. – 7 p. (**Scopus**)
6. Khrapunov, E.F. Unsteady processes in a natural convective plume / E.F. Khrapunov, Y.S. Chumakov // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – vol. 1038. – 6 p. (**Scopus**)
7. Khrapunov, E.F. Structure of a free convective flow over a horizontal heated surface under conditions of conjugate heat transfer / E.F. Khrapunov, I.V. Potechin, Y.S. Chumakov // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – vol. 891. – 7 p. (**Scopus**)