

*Дубко*

**ДУБКО ЕЛЕНА БОРИСОВНА**

**АНОМАЛЬНАЯ ИНТЕНСИФИКАЦИЯ  
ОТРЫВНОГО ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕНА НА ПЛАСТИНЕ  
С НАКЛОННЫМИ ОВАЛЬНО-ТРАНШЕЙНЫМИ ЛУНКАМИ**

1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А.А. Новикова»

Научный руководитель: **Исаев Сергей Александрович**  
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Емельянов Владислав Николаевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры А9 «Плазмогазодинамика и теплотехника» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова», г. Санкт-Петербург.

**Иванов Николай Георгиевич**, кандидат физико-математических наук, доцент, директор Высшей школы прикладной математики и вычислительной физики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «**Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ**», г. Казань.

Защита состоится «12» марта 2025 года в 11 часов 00 минут на заседании Диссертационного совета У.1.3.14.07 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, ул. Политехническая, д.29 литера Б, Механический корпус, аудитория 14.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте [www.spbstu.ru](http://www.spbstu.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 г.

Ученый секретарь,  
диссертационного совета У.1.3.14.07  
к.т.н.



Сероштанов Владимир Викторович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Аномальная интенсификация отрывного течения и теплообмена в наклонных канавках с полусферическими окончаниями открыта в каналах для водного и воздушного теплоносителя. В однорядных и уединенных наклонных канавках генерируются смерчеобразные вихри при взаимодействии входящих пристеночных потоков с наветренными склонами канавок во входных частях. Экстраординарные сосредоточенные перепады давления между зонами торможения потоков и областями низкого отрицательного давления в ядрах смерчей обуславливают ультравысокие скорости возвратного и вторичного течения, доходящие и превосходящие среднемассовые и максимальные скорости в плоскопараллельном канале. Возникающие минимумы отрицательного трения и максимумы теплоотдачи в донной части однорядных канавок на стабилизированном участке течения по абсолютным величинам многократно (в 4 - 5 и 6 - 7 раз) превосходят уровни трения и теплоотдачи от стенки плоскопараллельного канала. Особенно высоки указанные характеристики для плотных пакетов канавок. В единичных наклонных канавках на стенке узкого канала они более скромные – превосходство характеристик на дне канавки оценивается в 1,5 - 2 раза. Помимо аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена в канавках открыто явление локального ускорения в ядре канального потока. На стабилизированном участке канала над входными зонами наклонных канавок продольная составляющая скорости может до полутора раз превосходить максимальную скорость потока в плоскопараллельном канале.

Данная работа акцентирует внимание на численном моделировании аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена при обтекании воздухом единичных канавок на пластине с помощью специализированного пакета VP2/3 (Velocity-Pressure, 2D/3D). Рассматривается цифровой аналог аэродинамической установки НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова, в которой при числе Рейнольдса 67000 измерены распределения статического давления в канавках на пластине при варьировании углом их наклона от 0° до 90°. Также создан и испытан цифровой аналог теплофизического стенда СПбПУ Петра Великого с канавкой под углом наклона 45° на изотермическом участке в теплоизолированной пластине, на котором с помощью градиентных датчиков теплового потока осуществлены измерения относительной теплоотдачи внутри канавки при продувках воздуха в диапазоне изменения числа Рейнольдса от 1000 до 30000.

**Объект исследования** представляет собой – наклонные канавки (овально-траншейные лунки) с полусферическими окончаниями в каналах для водного и воздушного теплоносителя.

**Предметом исследования** являются – отрывные течения и теплообмен в наклонных овально-траншейных канавках на пластине.

**Целью диссертации** является обоснование явления аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена в лунке при изменении различных параметров.

### **Основные задачи:**

1. Составить обзор по вихревой интенсификации теплообмена на энергоэффективных структурированных поверхностях с вихревыми генераторами. Эволюция от лунок к наклонным канавкам.

2. Осуществить валидацию основанного на многоблочных вычислительных технологиях пакета VP2/3 на задачах аномальной интенсификации отрывных течений и теплообмена в наклонных канавках на пластине. Провести расчеты на цифровых аналогах аэродинамической установки НИИ механики МГУ и теплофизического стенда СПбПУ.

3. Обосновать явление аномальной интенсификации теплообмена в наклонных канавках под углом наклона 45° при варьировании числом Рейнольдса от 5000 до 30000, изменении глубины канавки  $\Delta$  от 0 до 0,35 (в долях ширины) и длины траншеи  $L$  от 0 до 5.

**Научная новизна** состоит из следующих пунктов:

1. Обоснована приемлемость подхода, основанного на решении осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS) при их замыкании модифицированной моделью переноса сдвиговых напряжений с помощью пакета VP2/3, при анализе явления аномальной интенсификации отрывного течения при генерации смерчей в единичных наклонных канавках на пластине. Численные прогнозы удовлетворительно согласуются с измерениями статического давления на поверхности канавок. Подтверждены экстраординарные перепады давления во входной части канавки при изменении углов наклона канавки от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ , выполненные в НИИ механики МГУ.

2. Установлен диапазон чисел Рейнольдса от  $5 \times 10^3$  до  $3 \times 10^4$ , в котором максимум теплоотдачи на дне канавки достигает 1,5 - 2, что соответствует режиму аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена в единичной канавке.

3. Продемонстрирована интенсификация отрывного течения, возвратных, нисходящих, восходящих и закрученных потоков в канавке с ростом глубины. Отмечается формирование первичного спиралевидного вихря, который, начиная с глубины – 0,25, покидает канавку, не доходя до ее конца. За узкой зоной возвратных токов во входной части канавка становится проточной.

4. Установлены две группы углублений: наклонные овальные лунки с длиной траншейной вставки  $L = 0,05 \dots 1$  и наклонные канавки с  $L$  свыше – 2, кардинально различающиеся по структуре вихревого течения в углублении.

5. Продемонстрирован прогресс и установление экстраординарного (порядка – 0,35 в отношении к удвоенному скоростному напору) сосредоточенного перепада давления между зоной торможения потока на наветренном склоне и расположенной поблизости на входном сферическом сегменте области отрицательного давления в месте генерации смерчевой структуры. Именно этот перепад давления обуславливает интенсификацию вихревого течения в канавке.

6. Относительная теплоотдача от внутренней поверхности наклонной канавки оптимальна при длине траншеи – 2,5 и значительно превосходит уровень суммарной относительной теплоотдачи от нагретого квадратной участка пластины с канавкой.

7. Установлен физический механизм ускорения пристеночного течения над входной частью наклонной канавки в режиме аномальной интенсификации теплообмена, связанный с увеличением продольной составляющей скорости на срезе длинной канавки почти до 60% от скорости набегающего потока и утончением пограничного слоя.

**Степень разработанности темы** обуславливается большим количеством работ, посвященных повышению энергоэффективности и энергосбережению с помощью управляющих механизмов вихревой интенсификации теплообмена в мультимасштабных каналах энергетических установок и устройств микроэлектроники при использовании структурированных поверхностей. При проектировании и разработке теплообменных аппаратов применяется большое количество способов интенсификации, большая часть которых основывается на увеличении площади поверхности теплообмена путем ее оребрения: увеличением шероховатости поверхностей теплообмена, применением криволинейных каналов; уменьшением диаметра каналов и др. Все эти мероприятия, как правило, ограничены ростом сопротивления потокам рабочего тела в теплообменных каналах, что приводит к росту энергетических затрат на побуждение его к движению. В связи с этим внимание ученых привлекли процессы турбулизации потоков рабочих тел охлаждающих систем.

В последнее время (10 – 20 лет) широкое распространение получили готовые пакеты вычислительных программ для решения задач в области гидро-газодинамики, тепломассообмена, прочности, электродинамики и т.п., предназначенные для автоматизации инженерных расчетов. В этих программах используются как метод сеток, так и метод конечных элементов, которые

позволяют производить дискретизацию расчетных областей и отслеживать движение частиц среды с любой, наперед заданной, точностью. Эффективность этих методов подтверждается многими исследованиями современных ученых. Стремительное развитие вычислительной мощности современного программного обеспечения, дала возможность точного численного моделирования турбулентных режимов теплового потока.

Следует подчеркнуть, что при исследовании интенсификации теплообмена выступами в центре внимания находится увеличение теплоотдачи, а возникающие отрывные течения и формирующиеся вихревые структуры рассматриваются в контексте анализа тепловых потоков. При изучении гидродинамики и теплообмена в лунках самостоятельный интерес вызывают физические механизмы генерации струйно-вихревых структур в их пределах, оказывающие определяющее влияние на интенсификацию процессов переноса тепла и импульса, в том числе с учетом турбулентного характера движения теплоносителя. Пионерские работы по данной тематике были экспериментальными и вполне понятно, что выполнялись в узких диапазонах варьируемых определяющих параметров, были нацелены в основном на получение интегральных характеристик и содержали весьма ограниченные по объему иллюстративные материалы. Прогресс в компьютерах, пакетных технологиях и совершенствование инженерных дифференциальных моделей физических процессов позволил в начале XXI века произвести численное моделирование управляющих механизмов вихревой генерации в отрывных течениях. Сделанные численные прогнозы в значительной мере дополнили и расширили известные эксперименты, углубили понимание физической природы рассматриваемых явлений вихревой интенсификации.

**Теоретическая значимость работы** представлена в следующих пунктах:

1. Обоснована аномальная интенсификация теплообмена внутри наклонных канавок в широком диапазоне чисел Рейнольдса от  $5 \times 10^3$  до  $3 \times 10^4$  при сравнении численных прогнозов на основе RANS-подхода с результатами уникальных измерений градиентными датчиками теплового потока на теплофизическом стенде СПбПУ Петра Великого. Обнаружен двукратный рост относительной теплоотдачи на дне канавки при  $Re = 30000$ .

2. Установлена взаимосвязь экстраординарных сосредоточенных перепадов во входной части наклонной канавки на пластине, определяющих аномальную интенсификацию отрывного течения, и генерации смерчевой структуры в ней при углах наклона от  $40^\circ$  до  $70^\circ$ .

3. Утончение пограничного слоя вплоть до его исчезновения на пластине над входной частью наклонной канавки объясняет сопутствующий эффект ускорения пристеночного потока над пакетом однорядных наклонных канавок на стенке.

4. Продемонстрирована приемлемость RANS-подхода для прогнозирования характеристик высокоинтенсивных закрученных потоков и теплообмена.

**Практическая значимость** представлена в следующих пунктах:

1. Представляются новые перспективные тесты для пакетных технологий и моделей турбулентности, базирующиеся на расчетах высокоинтенсивных вихревых течений и теплообмена около структурированных энергоэффективных поверхностей.

2. Установлены геометрические размеры канавок (длины и глубины), при которых наблюдается открытое численно явление аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена ( $\Delta$  свыше  $-0,15$  и длина траншеи  $L$ , начиная  $-2$ ).

3. Интегральные характеристики по тепловой эффективности выделенных участков пластины с канавкой демонстрируют интенсификацию теплообмена с ростом глубины. Так, для квадратного участка с размером стороны 7 получается 13% рост суммарной относительной теплоотдачи для наиболее глубокой канавки. Максимальный показатель для участка, ограничивающего канавку, несколько лучше – 32%. Правда, при этом наблюдается двукратный

рост относительного сопротивления участка и 7,5-кратный для участка, ограничивающего канавку.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Определена минимальная относительная глубина канавки, равная – 0,2, начиная с которой наблюдается явление аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена в входной части наклонной канавки на нагретой пластине. Это явление характеризуется минимальными величинами относительного трения, приближающимися к -2, и двукратным ростом относительной теплоотдачи в срединном сечении канавки. Для него характерен большой перепад давления между зоной торможения входящего в канавку потока на наветренном склоне и областью разрежения с отрицательным избыточным давлением в месте генерации торнадоподобного вихря (при глубине – 0,35 перепад составляет – 0,35).

2. Установлено увеличение скорости закрученного потока по мере его развития вдоль канавки (при глубине – 0,35 максимум поперечной составляющей скорости при переходе от центра характерного поперечного сечения к центру канавки увеличивается от 0,5 до 0,7).

3. Во входной части канавки наблюдается существенное утончение пристеночного слоя с ростом глубины, в то время в центре и на выходе из канавки пристеночный слой заметно утолщается.

4. При переходе от сферической лунки к наклонной овальной лунке и от нее к наклонной канавке с полусферическими концами на пластине показано возникновение, развитие и установление аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена, связанной с самоорганизацией смерчевой структуры в наклонной канавке.

5. В длинной наклонной канавке отмечается полуторакратный рост максимальной скорости возвратного течения и трехкратное возрастание максимальной скорости закрученного потока по сравнению с аналогичными параметрами в сферической лунке.

6. В срединном сечении входной части длинной канавки минимум отрицательного трения почти вдвое, а максимум теплоотдачи более полтора раз превосходят по абсолютной величине трение и теплоотдачу на пластине.

**Обоснованность и достоверность результатов**, полученных в ходе выполнения научно-исследовательской работы, основана на строгом математическом описании и проверенных применяемых численных алгоритмов, которые неоднократно были верифицированы на данных физического эксперимента и других численных тестовых задач, выполненных другими авторами.

**Личный вклад.** Автор внес существенный вклад в исследование, предложив план и определив задачи на всех этапах работы, которые были реализованы им в сотрудничестве с научным руководителем. Постановка задач и толкование результатов, полученных в ходе физического эксперимента, были адаптированы под особенности темы исследования, а также проведена верификация и тестирование численной модели лично соискателем. Обсуждение полученных выводов и подготовка публикаций по теме диссертации осуществлялись в тесном сотрудничестве с научным руководителем и соавторами.

**Апробация работы.** Все представленные для защиты результаты являются математически обоснованными фактами, подтвержденными результатами аэродинамических и теплофизических экспериментов, проведенных в НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова и СПбПУ. Выводы работы опубликованы в рецензируемых журналах, и их обоснование было подвергнуто многократной проверке специалистами в соответствующих областях. Результаты диссертации были представлены и обсуждены на следующих международных и российских конференциях:

- XXVI Всероссийский семинар с международным участием по струйным, отрывным и нестационарным течениям в Санкт-Петербурге, 27 июня – 1 июля 2022 года;

- Девятая российская конференция «Вычислительный эксперимент в аэроакустике и аэродинамике», г. Светлогорск, Калининградской области, 26 сентября – 1 октября 2022 г;
- Модели и методы аэродинамики. Материалы Двадцать третьей международной школы-семинара. Жуковский, 05 – 09 июня 2023 года;
- XIII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, Санкт-Петербург, 21– 25 августа 2023 года.

**Публикации:** По теме диссертации опубликовано 7 статей, из которых, три статьи входят в базу данных RSCI (входят в перечень ВАК), а также 4 статьи тезисов доклада, индексируемых в базе РИНЦ.

**Диссертация состоит** из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Она включает в себя 134 страницы основного текста с 37 рисунками и 9 таблицами. Список литературы содержит 124 наименования.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, ее научная и практическая значимость, сформулирована цель и основные задачи исследования.

**В первой главе** представлен обзор, который позволяет выделить несколько актуальных тематических направлений, сосредоточив внимание на единичных наклонных канавках на пластине. Применение для анализа открытого явления аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена при генерации смерчей в наклонных канавках методов численного моделирования, основанных на использовании осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS), потребовало экспериментального подтверждения и сравнения численных прогнозов экстраординарных перепадов давления с данными физических экспериментов при изменении углов наклона канавки от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ , выполненными в НИИ механики МГУ. Уникальные измерения градиентными датчиками теплового потока на теплофизическом стенде СПбПУ открыли перспективу обоснования интенсификации теплообмена внутри наклонных канавок в широком диапазоне чисел Рейнольдса. Установление геометрических размеров канавок (длины и глубины), при которых наблюдается открытое численно явление аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена, представляет несомненный практический и фундаментальный интерес. И, наконец, утончение пограничного слоя вплоть до его исчезновения на пластине над входной частью наклонной канавки объясняет сопутствующий эффект ускорения пристеночного потока над пакетом однорядных наклонных канавок на стенке.

**Вторая глава** посвящена тестированию пакетных технологий на задачах смерчевой генерации в наклонных канавках при возникновении экстраординарного сосредоточенного перепада давления.



Рисунок 1.1 – Аэродинамическая труба А4 с расположенной в рабочей части пластиной с наклонной канавкой

Серия экспериментов, представленная в [5] проведена на аэродинамической трубе А4 НИИ механики МГУ, в рабочей части которой размещается пластина с канавкой длиной – 6, шириной – 1 и глубиной – 0,25 (Рисунок. 1.1). Ширина канавки выбрана в качестве характерного масштаба, к которому отнесены все линейные размеры. Число Рейнольдса внешнего потока  $6.7 \times 10^4$ , а толщина пограничного слоя в районе канавки – 0,17. Угол наклона варьируется от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ . В расчетной модели радиус скругления кромки канавки принят равным – 0,02. Также рассматривается обтекание единичной наклонной канавки на стенке плоскопараллельного канала. На экспериментальном стенде Института механики МГУ [5] шириной – 0,2 м, высотой – 0,05 м и длиной – 0,6 м проведены измерения распределений статического давления на поверхности лунки шириной – 0,03 м и относительными длиной – 5, глубиной – 0,25 (в долях ширины) под различными углами наклона  $\theta$  в диапазоне изменения от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ . Лунки с острой кромкой располагаются в середине канала на расстоянии – 0,3 м от входного сечения. Число Рейнольдса, определенное по скорости потока и высоте канала, составляет  $1,65 \times 10^5$ . Толщина пограничного слоя на входе в рабочий участок канала имеет величину порядка – 0,1 в долях высоты канала.

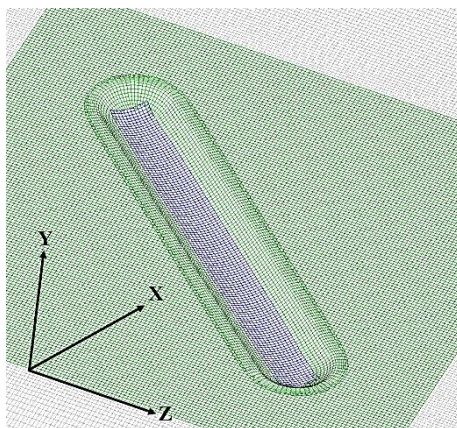


Рисунок 1.2 – Цифровой аналог наклонной канавки, расположенной на пластине в аэродинамической трубе, с декартовой системой координат  $x, y, z$

В качестве цифрового аналога пластины рассматривается прямоугольный участок плоской стенки длиной – 22 и шириной – 12,3 (Рисунок 1.2). Декартовы составляющие скорости  $u, v, w$  и давление  $p$  определяются по характерной скорости, в качестве которой выбирается скорость равномерного потока на входе в область. На боковых границах ставятся условия симметрии. На выходной границе задаются условия продолжения решения.

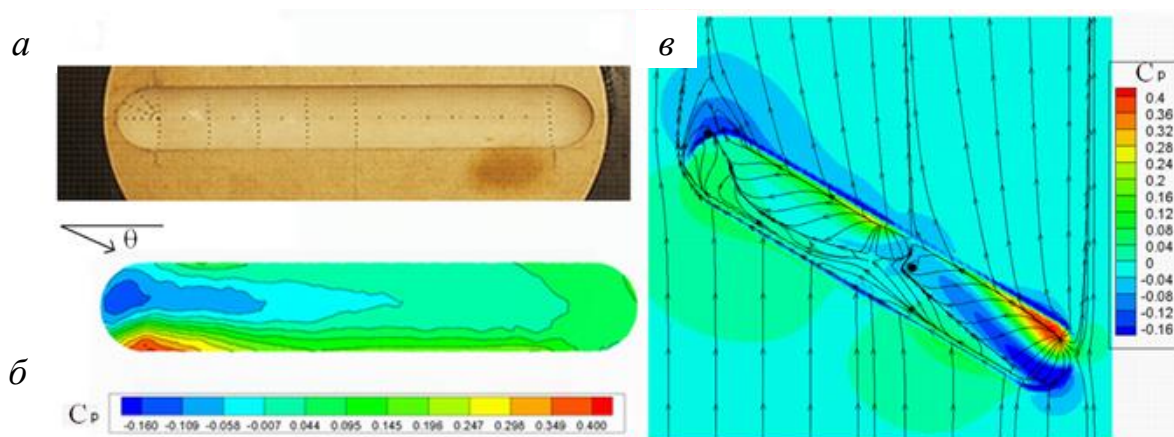


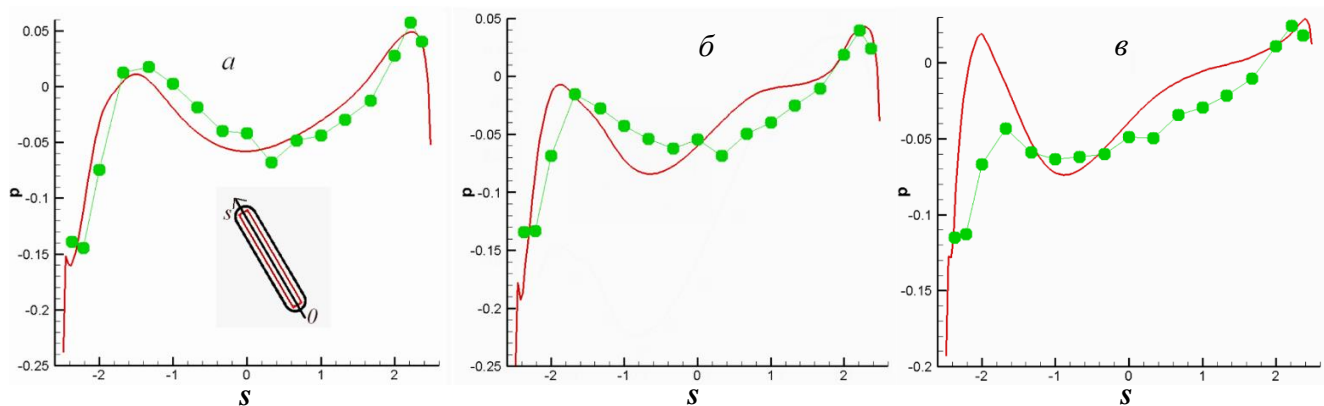
Рисунок 2 – Дренированная ОТЛ расположенная на пластине (а), экспериментально измеренные значения (б) и рассчитанное (в) поле коэффициента давления  $C_p$  в ОТЛ под углом наклона  $\theta = 60^\circ$ .



Низкоскоростное стационарное турбулентное течение воздуха около пластины с наклонной канавкой описывается стационарными осредненными по Рейнольдсу уравнениями Навье-Стокса (RANS) для вязкой несжимаемой жидкости, которые замыкаются уравнениями модифицированной модели переноса сдвиговых напряжений (MSST). В отличие от предложенных Ф. Менгером стандартных моделей MSST 1993 и MSST 2003 года в последнюю модель вводится поправка на кривизну линий тока. Корректируется поле вихревой вязкости:  $\mu_t = \mu_{t0} / (1 + C_c Ri_t)$ . Здесь  $\mu_{t0}$  – рассчитанная по стандартной модели вихревая вязкость,  $C_c$  – дополнительная полуэмпирическая константа, равная – 0,02, определенная из условия наилучшего согласования численных прогнозов с имеющимися и специально полученными данными для ряда калибровочных экспериментов,  $Ri_t$  – турбулентное число Ричардсона.

Как подтверждено многочисленными тестами применение стандартной SST-модели 2003 года приводит к ложной накачке вихревой вязкости в ядра крупномасштабных вихрей и к чрезмерному уровню вихревой вязкости в целом. Описанный обобщенный подход Роди-Лещинера-Исаева (RLI) позволяет избежать нефизической накачки вихревой вязкости. Поправка на кривизну линий тока в рамках подхода RLI введена в пакеты VP2/3 (Velocity-Pressure, 2D/3D) и sigma-flow.

Специальная обработка данных дренажных испытаний позволила получить поля распределения коэффициента давления по её поверхности в виде зависимости  $C_p$  от угла наклона вектора скорости набегающего потока для дискретного множества дренажных точек на поверхности модели (Рисунок 2, а). Рассчитанное поле коэффициента давления с картиной линий тока по поверхности пластины и канавки показано на рисунке 2, б, в и хорошо согласуется с экспериментальным. Возникновение зоны значительного избыточного отрицательного давления на входе в наклонную канавку является довольно неожиданным. Экстраординарный перепад давления предопределяет формирование вихревой структуры с интенсивными вторичным (закрученным) и возвратным высокоградиентным течением, которое характеризуется высокими скоростями. В данном случае максимальные абсолютные величины вторичного и возвратного токов доходят до 70% и 40% скорости внешнего потока.



$a - \theta = 35^\circ$ ;  $b - \theta = 45^\circ$ ;  $v - \theta = 55^\circ$

Рисунок 3 – Сравнение рассчитанных (линии) и измеренных (точки) распределений давления в срединном продольном сечении канавки на стенке канала при различных углах наклона  $\theta$ .

На рисунке 3 представлены сравнения измерений статического давления, отнесенного к удвоенному скоростному напору, с численными прогнозами отрывного течения в единичных канавках на стенке канала при числе Рейнольдса  $Re = 1.65 \times 10^5$ . В работе рассматриваются характерные сечения канавки в связанной системе координат  $s, t$ .

Как видно из визуализации отрывного течения в канавке на рисунке 4, зона отрицательного давления соответствует месту генерации торнадоподобного вихря на входном сферическом

сегменте, а зона торможения возникает в результате взаимодействия входящего в канавку потока с ее наветренным склоном. Локальный максимум статического давления в срединном сечении входной части канавки объясняется этим торможением.

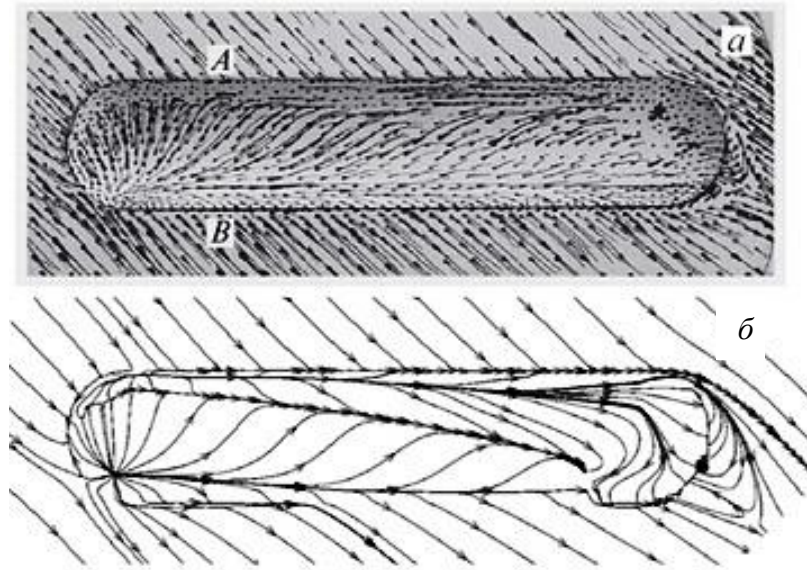
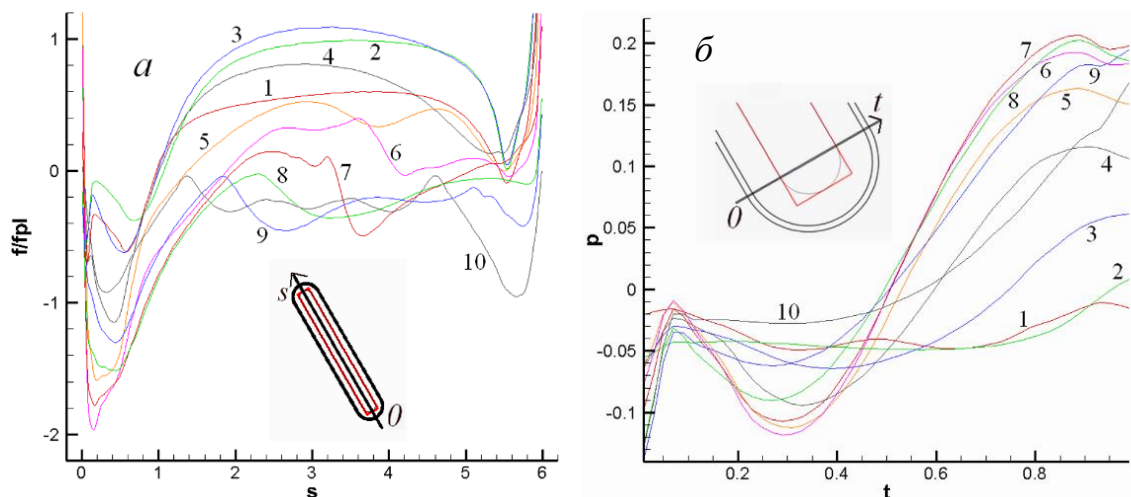


Рисунок 4 – Сопоставление экспериментальной картины линий тока на поверхности ОТЛ (а), с  $\theta = 45^\circ$ , на стенке канала с рассчитанной картиной визуализации отрывного течения в канавке (б) для цифрового аналога экспериментального стенда (А – передняя, В – задняя кромка).

На рисунке 5 анализируются распределения относительного трения  $f/f_{pl}$ , где  $f_{pl}$  определяется на плоской стенке, и статического давления  $p$ , отнесенного к удвоенному скоростному напору, построенные в системе координат  $s, y, t$ , связанной с наклонной канавкой. На рис.6 профили продольной составляющей скорости в связанной системе координат  $Q = U\cos\theta + W\sin\theta$  рассчитываются в центре характерного сечения в месте соединения сферического сегмента канавки и цилиндрической траншеи.



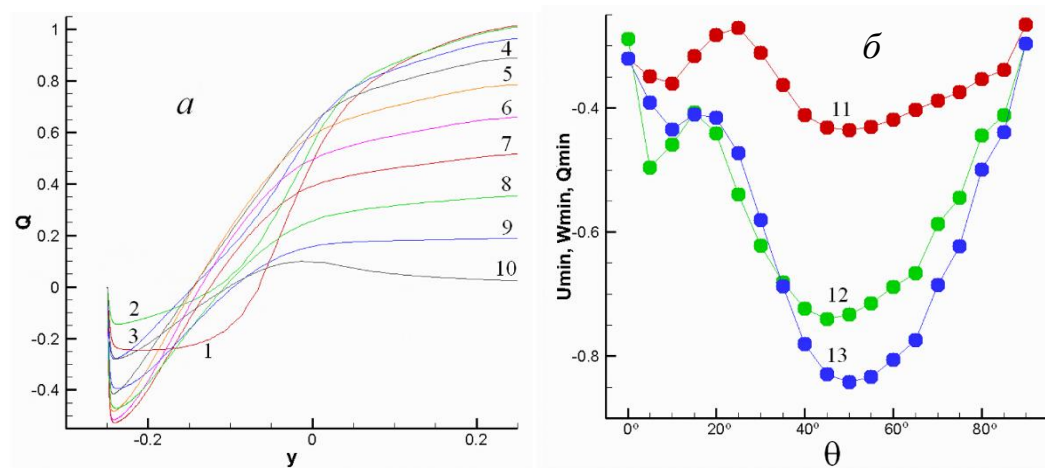
1 –  $\theta = 0^\circ$ ; 2 –  $10^\circ$ ; 3 –  $20^\circ$ ; 4 –  $30^\circ$ ; 5 –  $40^\circ$ ; 6 –  $50^\circ$ ; 7 –  $60^\circ$ ; 8 –  $70^\circ$ ; 9 –  $80^\circ$ ; 10 –  $90^\circ$

Рисунок 5 – Влияние угла наклона  $\theta$  на распределения относительного трения  $f/f_{pl}(s)$  в продольном поперечном сечении канавки (а) и статического давления  $p(t)$  в сечении перехода от входного сферического сегмента к цилиндрической траншее (б).

Диапазон углов наклона  $\theta$ , в котором наблюдается значительное (в 1,5 - 2 раза) снижение минимальной величины  $f/f_{pl}$ , простирается от  $40^\circ$  до  $70^\circ$  (рисунок 7, а). При изменении  $\theta$  от  $0^\circ$  до  $30^\circ$

происходит трансформация безотрывного проточного течения в длинной канавке умеренной глубины в закрученный поток. При  $\theta = 30^\circ$   $(f/f_{pl})_{min} = -1,15$  и почти вдвое ниже чем, при  $\theta = 0$ . Дальнейшее увеличение  $\theta$  характеризуется преобразованием колоколообразного распределения  $f/f_{pl}(s)$  к распределению с двумя монотонно уменьшающимися горбами, причем с ростом  $\theta$  второй горб смещается к входной части канавки.  $(f/f_{pl})_{min}$  достигается при  $\theta = 50^\circ$  и оказывается близкой к -2. Свыше  $70^\circ$  интенсивность возвратного течения в отрывной зоне снижается, хотя  $(f/f_{pl})_{min}$  остается значительной и близкой к -1 при  $\theta = 90^\circ$ .

Взаимосвязь перепада давления и перестройки структуры вихревого течения в единичной канавке на пластине анализируется на рисунке 5, б. При малых  $\theta$  перепады давления поперек канавки незначительны, хотя при  $10^\circ$  возникает пик давления на наветренной кромке, который при дальнейшем возрастании  $\theta$  свыше  $40^\circ$  достигает величин 0,15...0,2. При переходе  $\theta$  от  $20^\circ$  к  $30^\circ$  в подветренной части формируется зона отрицательного давления (порядка -0,09). При  $\theta$  свыше  $40^\circ$  ее размеры практически не меняются,  $p_{min}$  достигает -0,12 при  $\theta = 50^\circ$ . Максимальный перепад давления между зонами торможения на наветренном склоне и разрежения в подветренной части канавки при аномальной интенсификации отрывного течения оказывается порядка 0,33.



1 –  $\theta = 0^\circ$ ; 2 –  $10^\circ$ ; 3 –  $20^\circ$ ; 4 –  $30^\circ$ ; 5 –  $40^\circ$ ; 6 –  $50^\circ$ ; 7 –  $60^\circ$ ; 8 –  $70^\circ$ ; 9 –  $80^\circ$ ; 10 –  $90^\circ$ ;  
11 –  $U_{min}$ ; 12 –  $W_{min}$ ; 13 –  $Q_{min}$

Рисунок 6 – Влияние угла наклона  $\theta$  на эволюцию профилей (кривые 1-10) составляющей скорости  $Q(y)$  вдоль  $s$  в связанной системе координат (а) и на экстремальные характеристики  $U_{min}$ ,  $W_{min}$ ,  $Q_{min}$  (кривые 11-13) (б).

Разворот канавки от направления по потоку к поперечному положению относительно внешнего потока кардинально изменяет вихревую структуру и интенсивность течения во входной части канавки (Рисунок 6). Профили отрывного течения  $Q(y)$  на рисунке 6, а в диапазоне от 0 до  $20^\circ$  резко изменяются, причем точка с нулевой скоростью приближается к дну канавки. Указанная трансформация профиля скорости связана с самоорганизацией смерчеобразной вихревой структуры, которая приводит к развитию закрученного потока и формированию возвратного придонного течения в канавке, которое усиливается с ростом  $\theta$ .  $Q_{min}$  достигает величины порядка -0,5 при  $\theta = 50...60^\circ$ .

Численные прогнозы  $U_{min}$  и  $W_{min}$  позволили дать оценку экстремальных величин встречного тока  $Q_{min} = U_{min} \cos\theta + W_{min} \sin\theta$  (Рисунок 6, б). Максимальная абсолютная величина скорости оказывается близкой к характерной скорости внешнего потока. Для диапазона  $\theta$  от  $35$  до  $70^\circ$   $Q_{min}$  оказывается ниже -0,7.

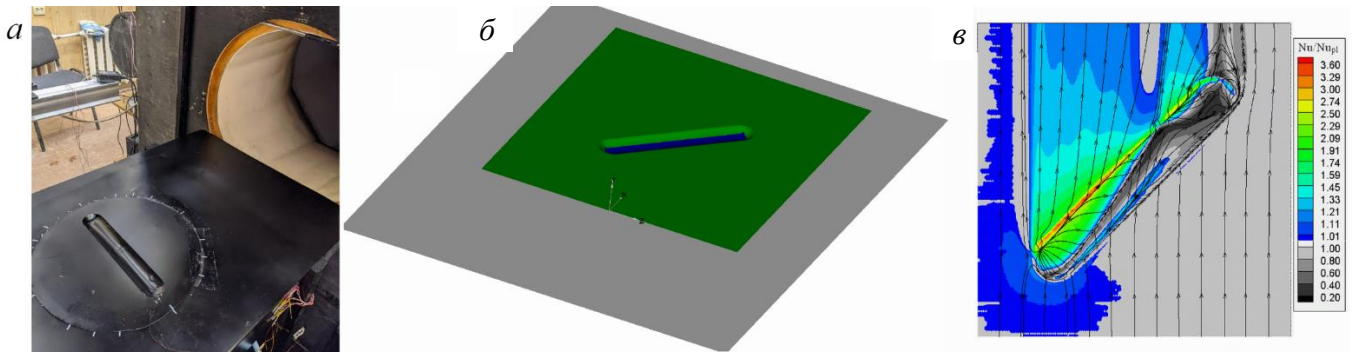
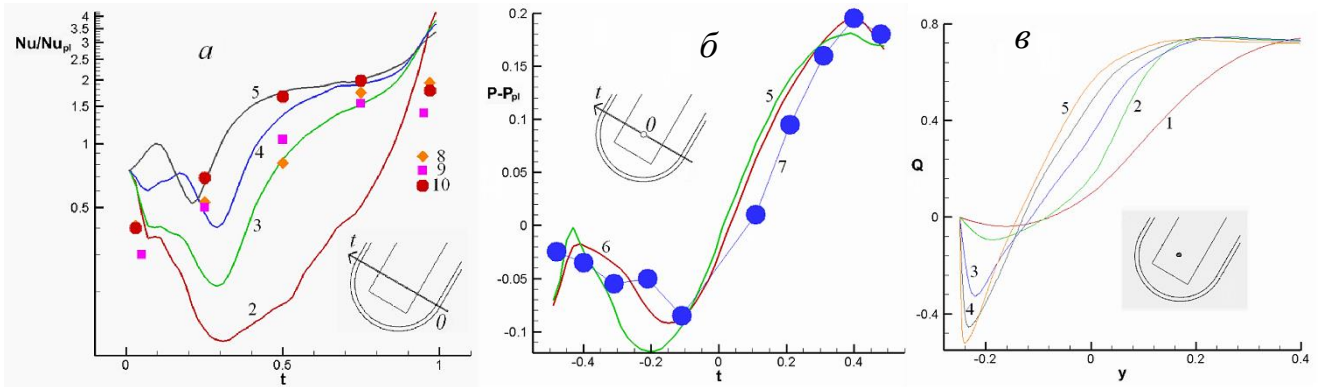


Рисунок 7 – Фотография теплофизического стенда (а) и расчетный аналог экспериментальной теплоизолированной пластины с нагреваемым изотермическим участком с  $T = 373\text{K}$ , в центре которого располагается наклонная канавка (б), а также поле  $Nu/Nu_{pl}$  с нанесенной картиной растекания воздуха в окрестности канавки при  $Re = 3 \times 10^4$  (в).

В третьей главе собраны материалы по аномальной интенсификации теплообмена в канавке на нагретом участке пластины. Рассматривается конвективный теплообмен при стационарном обтекании воздухом единичной канавки под углом наклона  $45^\circ$  на нагретой пластине цифровом аналоге теплофизического стенда СПбПУ Петра Великого (рисунок 7, а), соответствующего проведенным опытам. В качестве характерных параметров выбираются ширина канавки  $D$  и скорость набегающего потока  $U_o$ . Ламинарное течение воздуха рассматривается при  $Re = 1000$  и  $5000$ . Моделирование турбулентного течения выполнено при числах  $Re$   $5000$ ,  $10000$  и  $30000$ . Цилиндрическая канавка образована соединением двух половинок сферической лунки диаметром –  $1$  и глубиной –  $0,25$  с траншеей длиной –  $5$ . Степень турбулентности задается близкой к экспериментальной ( $1\%$ ), а масштаб турбулентности принимается порядка характерного размера. Относительный радиус скругления кромки не велик и равен –  $0,025$ . Число Прандтля  $Pr$  принимается равным –  $0,71$ . В качестве компьютерного аналога пластины рассматривается прямоугольный участок плоской стенки длиной –  $19,625$  и шириной –  $15,675$ . Центр канавки располагается на расстоянии –  $12,688$  от входного сечения, в котором формируется равномерный поток (рисунок 7, б). Верхняя граница изотермическая с температурой  $T_{ref}$ , принятой в качестве масштаба обезразмеривания ( $293\text{K}$ ). На входе температура  $T$  задается постоянной и равной  $T_{ref}$ , а на выходе из расчетной области для  $T$  ставятся мягкие граничные условия. Безразмерная температура на изотермическом участке стенки принимается равной –  $1,273$ . Численно анализируются экстремальные локальные и интегральные характеристики течения и теплообмена на пластине с канавкой. В их число входят продольные и поперечные распределения перепада статического давления  $P-P_{pl}$ , относительной теплоотдачи  $Nu/Nu_{pl}$ , относительного трения  $ff_{pl}$  в характерных сечениях омываемой пластины с канавкой, осредненные по поперечным полосам относительные числа Нуссельта  $Nu_m/Nu_{mpl}$  для контрольного участка и прямоугольного контура, окружающего канавку. Индекс  $pl$  относится к параметрам на гладкой пластине.

Поле относительных чисел Нуссельта с нанесенными линиями тока в пристеночном слое (компьютерной визуализации картины растекания воздуха по криволинейной стенке), рассчитанное при  $Re = 3 \times 10^4$ , отражает взаимосвязь структуры вихревого течения и теплообмена вблизи изотермической стенки (рисунок 7, в). Внутри канавки формируется сложное пространственное течение с линией отрыва набегающего потока, совпадающей с подветренной кромкой. Ярко выраженная линия присоединения располагается вблизи наветренной кромки, причем отмечается точка растекания входящего в канавку потока на наветренном склоне и довольно узкая зона возвратного придонного течения. Зона наветренной кромки теплонапряженная с максимальным уровнем относительной теплоотдачи порядка –  $3,6$ . На входе в канавку возникает высокоинтенсивный торнадоподобный вихрь, зона отрицательного давления в

ядре которого способствует эжекции возвратного пристеночного потока. Вихрь формирует закрученный ускоряющийся поток в канавке, причем перед подветренным склоном он отрывается и возникает зона пониженной теплоотдачи. Эта зона распространяется до конца канавки. Важно подчеркнуть, что аномально высокая по сравнению с лунками теплоотдача в канавке с уровнем порядка  $\sim 2$  характерна для области интенсивного закрученного потока, покидающего канавку, не доходя до ее конца. Также существенно отметить следовую область интенсификации теплообмена, в которой теплосъем падает по мере удаления от наветренной кромки.



1 –  $Re = 10^3$ ; 2 –  $5 \times 10^3$  (1,2 – ламинарный режим); 3,8 –  $5 \times 10^3$ ; 4,9 –  $10^4$ ; 5,10 –  $3 \times 10^4$ ; 6,7 –  $6,7 \times 10^4$  [87] (3-10 турбулентный режим).

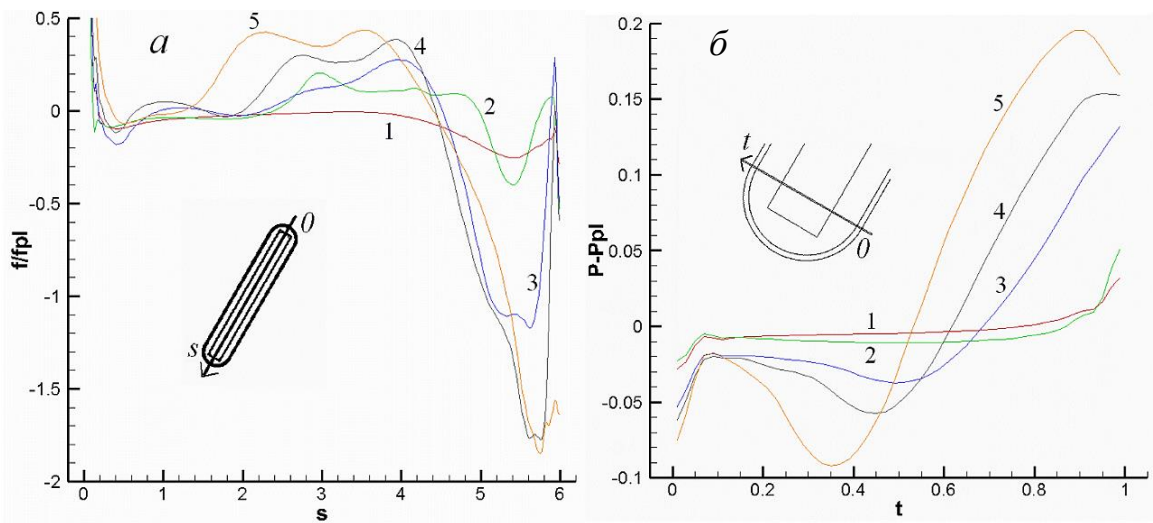
Рисунок 8 – Сравнительный анализ рассчитанных (1-6) и измеренных (7-10) относительных чисел Нуссельта  $Nu/Nu_{pl}$  (а) и перепадов статического давления  $P-P_{pl}$  (б)

в характерном сечении перехода от входного сферического сегмента к цилиндрической траншее, а также профилей продольной составляющей скорости  $Q$  ( $y$ ) в связанной системе координат  $(s, y, t)$  в центральной точке характерного сечения (в) при различных числах Рейнольдса.

Наиболее важное место в данной работе представляет сравнение измеренных и рассчитанных зависимостей относительных чисел Нуссельта  $Nu/Nu_{pl}(t)$  в характерном поперечном сечении перехода от входного сферического сегмента к цилиндрической траншее при числах Рейнольдса в диапазоне  $(5...30) \times 10^3$  (рисунок 8, а). Достижение близкого к двукратному росту относительной теплоотдачи на дне канавки при  $Re = 3 \times 10^4$  является центральным результатом проведенного экспериментального исследования. Подтверждено явление аномальной интенсификации теплообмена, ранее открытое методами численного моделирования. С ростом  $Re$  установлено заметное усиление относительной теплоотдачи. Так, при  $Re = 10^4$  в срединном сечении уровень теплоотдачи заметно ниже, чем при  $3 \times 10^4$ , а при  $Re = 5 \times 10^3$   $Nu/Nu_{pl} < 1$ . На подветренном склоне наблюдается угнетение теплообмена, а на наветренном склоне происходит интенсификация теплообменных процессов. Численные прогнозы на основе RANS подхода удовлетворительно согласуются с данными измерений тепловых потоков, что является обоснованием его применимости для интерпретации рассматриваемого сложного типа вихревого теплообмена.

Экстраординарные перепады давления в канавке обуславливают управляющие механизм аномальной интенсификации и теплообмена в наклонной канавке на пластине при высоком числе Рейнольдса ( $\sim 67000$ ). Важно подчеркнуть, что они возникают между областью торможения входящего в канавку потока и зоной отрицательного избыточного давления в самоорганизующемся торнадоподобном вихре на поверхности сферического сегмента. На рисунке 8, б сравниваются полученные результаты расчетов перепада давления в характерном сечении канавки при  $Re = 3 \times 10^4$  с численными прогнозами и замерами статического давления в такой же канавке при близких условиях обтекания ( $Re = 6,7 \times 10^4$  и толщина турбулентного пограничного

слоя – 0,17). Отмечается хорошее согласие представленных данных, что указывает на их достоверность, а также на сочетание интенсификации тепловых и гидродинамических процессов.



1 –  $Re = 10^3$ ; 2 –  $5 \times 10^3$  (1,2 – ламинарный режим); 3 –  $5 \times 10^3$ ; 4 –  $10^4$ ;  
5 –  $3 \times 10^4$  (3-5 турбулентный режим).

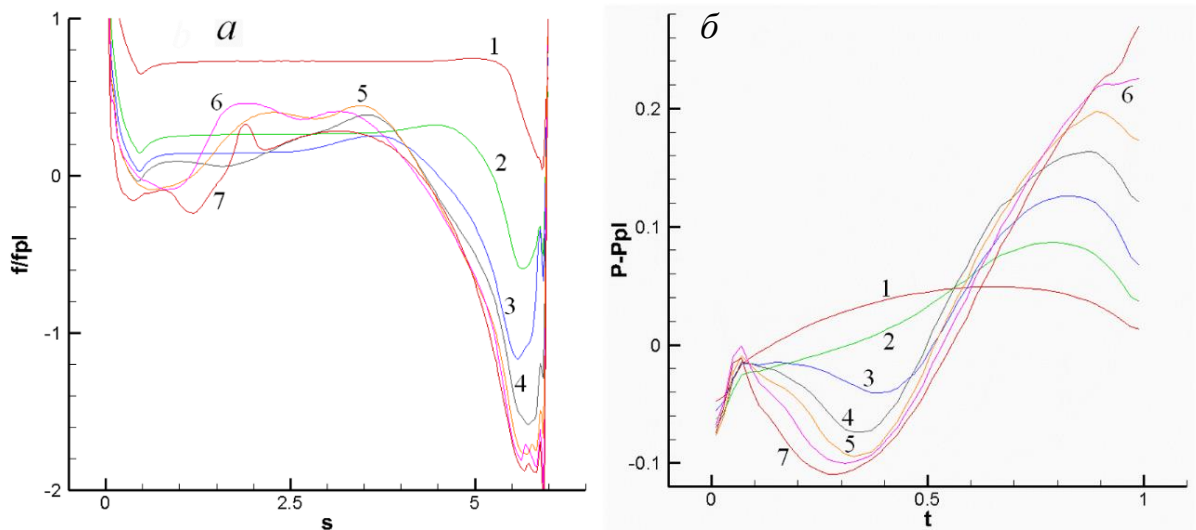
Рисунок 9 – Сравнение рассчитанных распределений относительного трения  $f/f_{pl}$  (a) и перепада статического давления  $P-P_{pl}$  (б) в продольном срединном сечении канавки (a) и характерном сечении перехода от входного сферического сегмента к цилиндрической траншее (b) при различных числах Рейнольдса.

Анализ профилей продольной составляющей скорости  $Q(y)$  в связанной системе координат (Рисунок 8, в), построенных в центре характерного поперечного сечения канавки при различных числах Рейнольдса от  $10^3$  до  $3 \times 10^4$ , показывает их хорошее согласие с аналогичными профилями в канавке при варьировании углом наклона от  $0$  до  $90^\circ$  при  $Re = 6,7 \times 10^4$ . Слабое отрывное течение при ламинарных числах  $Re$  с неразвитыми профилями скорости скачкообразно трансформируется в сложное турбулентное течение, профиль которого сочетает пристеночный профиль усиливающегося возвратного потока со струйным профилем развивающегося закрученного течения возрастающей интенсивности. Точка нулевой скорости  $Q(y)$  с ростом  $Re$  приближается к стенке, а минимальная скорость возвратного тока приближается к  $-0,5$ .

Установлен диапазон чисел Рейнольдса от  $5 \times 10^3$  до  $3 \times 10^4$ , в котором минимум относительного трения на дне канавки в поперечном характерном сечении приближается к  $-2$  (Рисунок 9, a). При этом на наветренном склоне и в конце канавки отмечается возрастание относительного трения до величин  $\sim 4$ .

Аномально высокие экстраординарные перепады статического давления формируются при турбулентном обтекании наклонной канавки (Рисунок 9, б). С ростом  $Re$  отрицательное давление на входе в канавку значительно снижается. Наиболее показательные перепады давления возникают в характерном поперечном сечении канавки в месте перехода от сферического сегмента к траншее. С ростом  $Re$  в турбулентном режиме они возрастают от  $0,13$  до  $0,29$ .

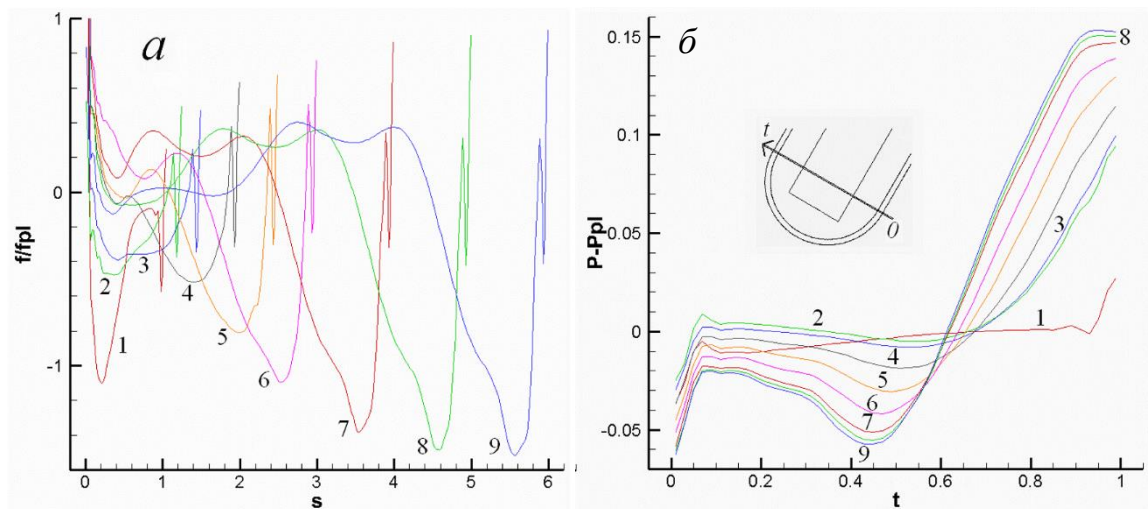
Изменения давления и относительного трения в продольном срединном и поперечном характерном сечениях канавки по мере роста глубина анализируются на рисунке 10 при  $Re = 3 \times 10^4$ . Ярво выраженная интенсификация отрывного течения наблюдается после  $\Delta = 0,2$ . Для нее характерны провал относительного трения и отрицательного статического давления во входной части канавки, прилегающей к кромке, и возникновение перепада давления в поперечном характерном сечении канавки.  $(f/f_{pl})_{min}$  приближается к  $-2$ , причем стабилизации происходит, начиная с  $\Delta = 0,25$ . Перепад статического давления (Рисунок 10, б) достигает  $-0,35$  при  $\Delta = 0,35$ .



1 –  $\Delta = 0,05$ ; 2 – 0,1; 3 – 0,15; 4 – 0,2; 5 – 0,25; 6 – 0,3; 7 – 0,35

Рисунок 10 – Влияние  $\Delta$  на распределения  $f/f_{pl}$  (а) и  $P-P_{pl}$  (б) в продольном срединном (а) и поперечном характерном (б) сечениях ОТЛ.

Изменения давления и относительного трения в продольном срединном и поперечном характерном сечениях канавки по мере роста длины траншейной вставки  $L$  анализируются на рисунке 11 при  $Re = 10^4$ .



1 –  $L = 0,05$ ; 2 – 0,25; 3 – 0,5; 4 – 1; 5 – 1,5; 6 – 2; 7 – 3; 8 – 4; 9 – 5.

Рисунок 11 – Сравнение зависимостей относительного трения  $f/f_{pl}$  (а) и статического давления  $P-P_{pl}$  (б) в продольном срединном (а) и поперечном характерном (б) сечениях дна канавки при различных длинах траншеи.

Для первой группы овальных лунок, характеризующихся отрывным обтеканием (кривые 1-4), распределения  $f/f_{pl}$  находятся в отрицательной зоне. Начиная с  $L = 1,5$ , в срединном сечении на дне канавки регистрируется зона положительных значений  $f/f_{pl}$ . Для канавок с  $L = 3..5$  (кривые 7-9) наблюдается установление вихревого течения во входных частях канавок. В характерном поперечном сечении канавки с ростом  $L$  формируется S-образный профиль статического давления с максимумом на наветренном склоне и минимумом отрицательного давления на дне канавки (Рисунок 11, б).

Линейные распределения проинтегрированных по поперечным полосам относительных чисел Нуссельта определяют степень неоднородности тепловой эффективности структурированной поверхности (Рисунки 12...14).

При ламинарном режиме течения ( $Re = 10^3$ ) интенсификация теплообмена в окрестности канавки незначительная, причем в полосе входа в канавку наблюдается существенное снижение относительной теплоотдачи (на 10% при  $Re = 10^3$  и на 14% при  $Re = 5 \times 10^3$ ). Внутри канавки вблизи входа в нее осредненный по ширине канавки тепловой поток снижается на 60% в отношении теплового потока на гладкой стенке ( $s$  отсчитывается от конца канавки). За провалом относительной теплоотдачи на входе в канавку на поперечной полосе контрольного участка и, что примечательно, внутри канавки для ламинарного (при  $Re = 5 \times 10^3$ ) и турбулентного ( $Re$  свыше  $5 \times 10^3$ ) режимов течения установлено увеличение относительной теплоотдачи примерно на 20% для контрольного участка и на 20-75% для внутренней поверхности канавки. За центром канавки относительная теплоотдача снижается, однако в окрестности задней кромки имеет место пик теплоотдачи. На контрольном участке в окрестности канавки  $Nu_m/Nu_{mpl}$  превышает 1, что свидетельствует о компенсации снижения относительной теплоотдачи ее повышением в следе за наклонной канавкой.

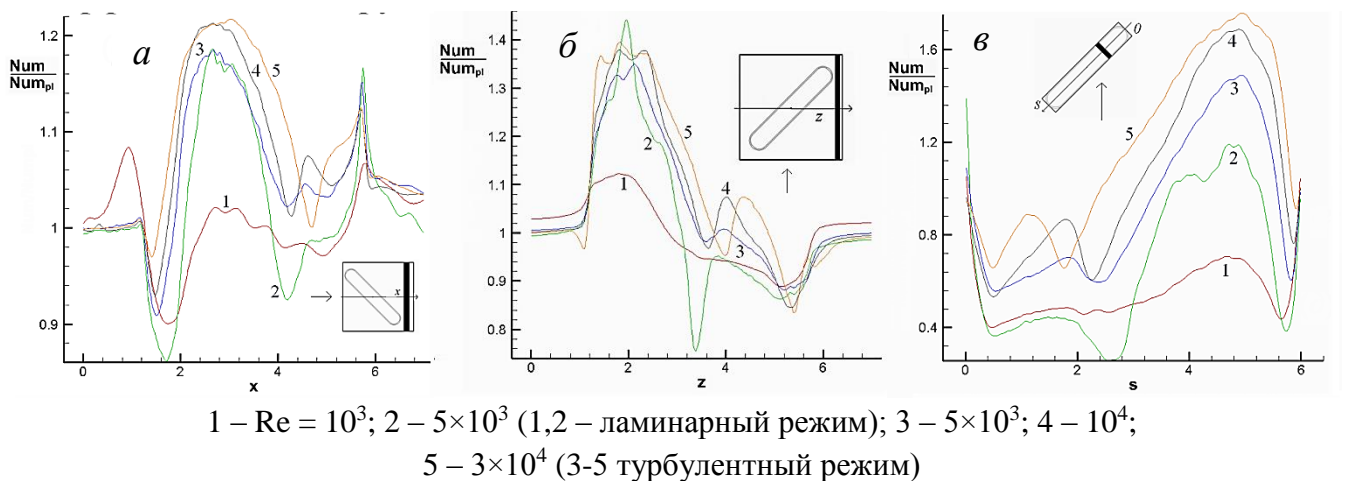
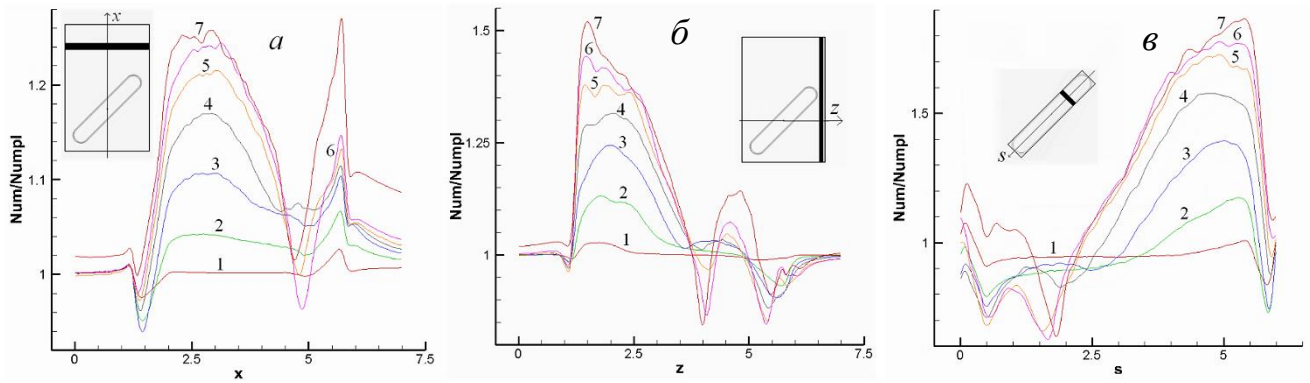


Рисунок 12 – Сравнение рассчитанных распределений осредненных по поперечным полосам относительных чисел Нуссельта  $Nu_m/Nu_{mpl}$  вдоль (а, в) и поперек (б) контрольного участка с наклонной канавкой (а, б) и участка, ограниченного контуром канавки (в), при различных числах Рейнольдса.

Линейные распределения осредненных по продольным полосам относительных чисел Нуссельта поперек контрольного участка с канавкой (координата  $z$ ) лучше всего демонстрируют зоны наиболее интенсивного теплообмена. Интересно отметить, что достигнутый уровень максимальной осредненной теплоотдачи  $Nu_m/Nu_{mpl}$  для обоих участков оказался вдвое выше по сравнению осреднением по поперечным полосам, а именно, примерно 1,4 и 3,6. Пик относительной теплоотдачи на квадратном участке пришелся на входную часть канавки и следовую зону повышенного теплосъема. Важно подчеркнуть, что с правосторонней окрестности канавки, а также в ее придонной части и на подветренном склоне теплообмен угнетен и  $Nu_m/Nu_{mpl}$  снижается меньше 1. Уровень падения  $Nu_m/Nu_{mpl}$  для окрестности канавки не велик и составляет 15% независимо от  $Re$ . А вот внутри канавки он сильно зависит от  $Re$  и минимален для ламинарного теплообмена при  $Re = 5 \times 10^3$ , принимая значение 0,2. С ростом  $Re$  уровень минимальной относительной теплоотдачи повышается, причем при  $Re = 3 \times 10^4$  он приближается к 1.

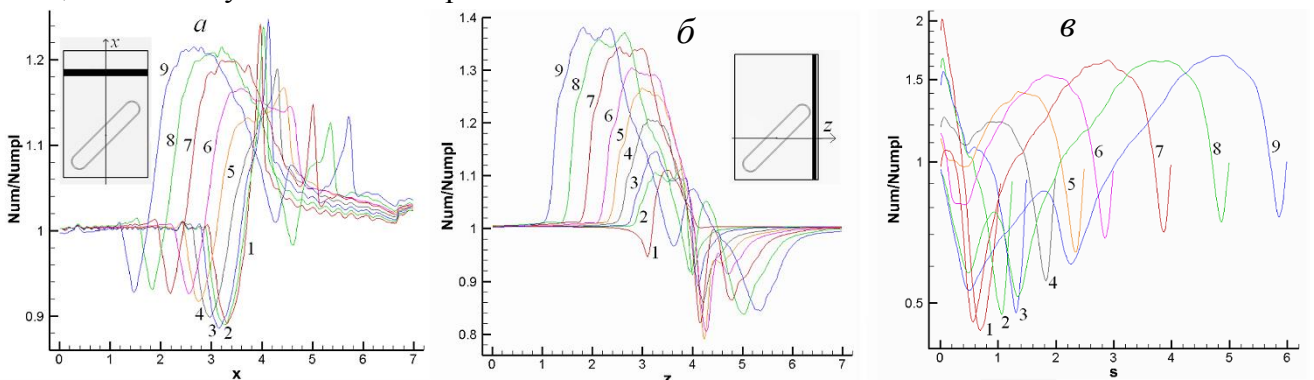




1 –  $\Delta = 0,05$ ; 2 – 0,1; 3 – 0,15; 4 – 0,2; 5 – 0,25; 6 – 0,3; 7 – 0,35

Рисунок 13 – Влияние глубины  $\Delta$  на распределения осредненных по поперечным полосам относительных чисел Нуссельта  $Nu_m/Nu_{mpl}$  в продольном и поперечном направлениях участка с канавкой  $x$  (а) и  $z$  (б), а также вдоль направления вдоль  $s$  (в).

Интересно отметить, что для мелкой канавки практически роста теплоотдачи от участка не происходит (Рисунок 13, а). С увеличением  $\Delta$  имеет место постепенное нарастание относительной теплоотдачи от стенки, доходящей примерно до 26% при  $\Delta = 0,35$ . Скорость роста значительная до  $\Delta = 0,2$ , а дальше она существенно снижается. В поперечном направлении  $z$  контрольного участка с канавкой проинтегрированные по продольным полосам числа Нуссельта  $Nu_m/Nu_{mpl}$  концентрируются в полосе, проходящей через входную часть канавки (Рисунок 13, б). Максимальный рост относительной теплоотдачи от полос одинаковой длины с полосами в продольном направлении достигает величины несколько больше 50% при наибольшей глубине канавки. Зоны угнетенного теплообмена развиваются не только в выходной части канавки, но и в зоне распространения выходящего первичного спиралеобразного вихря. Проинтегрированные по поперечным полосам относительные числа Нуссельта  $Nu_m/Nu_{mpl}$  на участке, ограниченном контуром канавки, в продольном направлении  $s$  (Рисунок 13, в) демонстрируют аномальную интенсификацию теплообмена во входной части канавки. При отрывном обтекании наклонной канавки в зоне возвратных токов при генерации торнадоподобного вихря внутри контура канавки возникает поперечная полоса высоких суммарных тепловых потоков, превосходящих тепловые потоки на плоской стенке на 90% (т.е. почти вдвое). Интенсификация теплообмена охватывает переднюю часть канавки, в конце ее образуется зона угнетенного теплообмена с некоторым подъемом  $Nu_m/Nu_{mpl}$  для глубокой канавки с  $\Delta = 0,35$ . Темп роста тепловых потоков высокий до  $\Delta = 0,2$  и далее с увеличением  $\Delta$  резко падает.



1 –  $L = 0,05$ ; 2 – 0,25; 3 – 0,5; 4 – 1; 5 – 1,5; 6 – 2; 7 – 3; 8 – 4; 9 – 5.

Рисунок 14 – Сравнение зависимостей  $Nu_m/Nu_{mpl}$ , проинтегрированных по поперечным (а, в) и продольным (б) полосам на участке нагретой пластины с наклонной канавкой (а, б) и участке, ограниченном контуром канавки (в), при различных длинах траншеи.

Для первой группы наклонных овальных лунок с длиной  $L$  траншейной вставки в диапазоне изменения от 0,05 до 0,5 кривые 1-3 на рисунке 14, а оказались очень близкими по характеру поведения и имеют почти одинаковые экстремумы  $Nu_m/Nu_{mpl}$ . Максимумы порядка 1,25 достигаются в зоне проекции выходной кромки лунки, и минимумы порядка 0,89 располагаются в узкой области на входе в лунку. При переходе к  $L = 1$  максимум снижается до 1,18, а минимум слегка увеличивается до 0,9 (кривая 4). Для лунки с  $L = 1$  отмечается перестройка распределения  $Nu_m/Nu_{mpl}(x)$  с образованием двух максимумов (кривая 5), причем передний из них при дальнейшем возрастании  $L$  постепенно увеличивается, смещается навстречу набегающему потоку и устанавливается на уровне 1,21. Локальный минимум в окрестности передней кромки нарастает и стабилизируется на уровне 0,93. Довольно острый пик на уровне 1,13 относительной суммарной теплоотдачи наблюдается на выходе из канавки. Распределения  $Nu_m/Nu_{mpl}(z)$ , проинтегрированные по продольным полосам участка с наклонной канавкой, демонстрируют прогрессирующий рост относительной теплоотдачи в канавке и на пластине в следе за ней (рисунок 14, б). С правой стороны выходной части овальной лунки и наклонной канавки относительная теплоотдача оказывается меньше единицы. Как и раньше, было установлено кардинальное различие группы овальных лунок с  $L = 0,05...1$  и канавок с длинами траншей 1,5...5. Для овальных лунок максимальное увеличение относительной теплоотдачи происходит в диапазоне 1,1...1,2, но при этом оно компенсируется снижением относительной теплоотдачи в зоне выхода из лунки, достигающей уровня 0,8.

С ростом  $L$  свыше 1,5  $(Nu_m/Nu_{mpl})_{max}$  повышается с 1,26 до 1,37, причем зона повышенной теплоотдачи расширяется, а максимум смещается влево и соответствует перемещению входа в канавку. С правой стороны от канавки с ростом  $L$  расширяется зона пониженной теплоотдачи (со стабилизацией минимума на уровне 0,86). Распределения по продольной координате  $z$  относительной теплоотдачи  $Nu_m/Nu_{mpl}$  (Рисунок 14, в) качественно согласуются с продольным распределением  $Nu/Nu_{pl}$  в срединном сечении канавки (Рисунок 14, а).

С ростом  $L$  минимум  $Nu_m/Nu_{mpl}$  на входе в овальную лунку увеличивается с уровня 0,45 при  $L = 0,05$  до  $\sim 0,8$  при  $L = 5$ . Начиная  $L = 0,5$  (кривая 3), на кривых  $Nu_m/Nu_{mpl}(s)$  во входной части овальной лунки, а затем канавки за отмеченным минимумом образуется локальный максимум, причем  $(Nu_m/Nu_{mpl})_{max} = 1,1$  при  $L = 0,5$ . С ростом  $L$  максимум возрастает и затем его величина стабилизируется, достигая величины порядка 1,7 при  $L = 5$ . С ростом  $L$   $(Nu_m/Nu_{mpl})_{max}$  монотонно уменьшается от 2 до  $\sim 1,5$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Задачи, поставленные в диссертации, полностью выполнены.

1. Составлен обзор по вихревой интенсификации теплообмена на энергоэффективных структурированных поверхностях с вихревыми генераторами. Показана эволюция от лунок к наклонным ОТЛ.

2. Осуществлена валидация основанного на многоблочных вычислительных технологиях пакета VP2/3 на задачах аномальной интенсификации отрывных течений и теплообмена в наклонных ОТЛ на пластине. Проведены расчеты на цифровых аналогах аэродинамической установки НИИ механики МГУ и теплофизического стенда СПбПУ.

3. Обосновано явление аномальной интенсификации теплообмена в наклонных ОТЛ под углом наклона  $45^\circ$  при варьировании числом Рейнольдса от 5000 до 30000, изменении глубины канавки  $\Delta$  от 0 до 0,35 (в долях ширины) и длины траншеи  $L$  от 0 до 5.

Научно-практические достижения работы суммируются в нескольких разделах.

1.1. Обоснована приемлемость подхода, основанного на решении осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS) при их замыкании модифицированной моделью переноса сдвиговых напряжений с помощью пакета VP2/3, при анализе явления аномальной интенсификации отрывного течения при генерации смерчей в единичных наклонных ОТЛ на пластине. Численные прогнозы удовлетворительно согласуются с измерениями статического давления на поверхности канавок. Подтверждены экстраординарные перепады давления во входной части канавки при изменении углов наклона канавки от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ , выполненные в НИИ механики МГУ.

1.2. Представляются новые перспективные тесты для пакетных технологий и моделей турбулентности, базирующиеся на расчетах высокоинтенсивных вихревых течений и теплообмена около структурированных энергоэффективных поверхностей.

1.3. Продемонстрирована приемлемость RANS-подхода для прогнозирования характеристик высокоинтенсивных закрученных потоков и теплообмена.

2.1. Продемонстрирована интенсификация отрывного течения, возвратных, нисходящих, восходящих и закрученных потоков в канавке с ростом глубины. Отмечается формирование первичного спиралевидного вихря, который, начиная с глубины 0,25, покидает канавку, не доходя до ее конца. За узкой зоной возвратных токов во входной части канавки становится проточной.

2.2. Установлены две группы углублений: наклонные овальные лунки с длиной траншейной вставки  $L = 0,05...1$  и наклонные овальные лунки с длиной траншейной вставки  $L$  свыше 2, кардинально различающиеся по структуре вихревого течения в углублении.

2.3. Установлено увеличение скорости закрученного потока по мере его развития вдоль канавки (при глубине 0,35 максимум поперечной составляющей скорости при переходе от центра характерного поперечного сечения к центру канавки увеличивается от 0,5 до 0,7).

2.4. В длинной наклонной канавке отмечается полторакратный рост максимальной скорости возвратного течения и трехкратное возрастание максимальной скорости закрученного потока по сравнению с аналогичными параметрами в сферической лунке.

2.5. Установлена взаимосвязь экстраординарных сосредоточенных перепадов во входной части наклонной канавки на пластине, определяющих аномальную интенсификацию отрывного течения, и генерации смерчевой структуры в ней при углах наклона от  $40^\circ$  до  $70^\circ$ .

2.6. Продемонстрирован прогресс и установление экстраординарного (порядка 0,35 в отношении к удвоенному скоростному напору) сосредоточенного перепада давления между зоной торможения потока на наветренном склоне и расположенной поблизости на входном сферическом сегменте области отрицательного давления в месте генерации смерчевой структуры. Именно этот перепад давления обуславливает интенсификацию вихревого течения в канавке.

3.1. При переходе от сферической лунки к наклонной овальной лунке и от нее к наклонной канавке с полусферическими концами на пластине показано возникновение, развитие и установление аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена, связанной с самоорганизацией смерчевой структуры в наклонной канавке.

3.2. Определена минимальная относительная глубина канавки, равная 0,2, начиная с которой наблюдается явление аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена в входной части наклонной канавки на нагретой пластине. Это явление характеризуется минимальными величинами относительного трения, приближающимися к -2, и двукратным ростом относительной теплоотдачи в срединном сечении канавки. Для него характерен большой перепад давления между зоной торможения входящего в канавку потока на наветренном склоне и областью разрежения с отрицательным избыточным давлением в месте генерации торнадоподобного вихря (при глубине 0,35 перепад составляет 0,35).

3.3. В срединном сечении входной части длинной канавки минимум отрицательного трения почти вдвое, а максимум теплоотдачи более полтора раз превосходят по абсолютной величине трение и теплоотдачу на пластине.

3.4. Обоснована аномальная интенсификация теплообмена внутри наклонных канавок в широком диапазоне чисел Рейнольдса от  $5 \times 10^3$  до  $3 \times 10^4$  при сравнении численных прогнозов на основе RANS подхода с результатами уникальных измерений градиентными датчиками теплового потока на теплофизическом стенде СПбПУ.

3.5. Установлены геометрические размеры канавок (длины и глубины), при которых наблюдается открытое численно явление аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена ( $\Delta$  свыше 0,15 и длина траншеи  $L$ , начиная 2).

3.6. Установлен диапазон чисел Рейнольдса от  $5 \times 10^3$  до  $3 \times 10^4$ , в котором максимум теплоотдачи на дне канавки достигает 1,5...2, что соответствует режиму аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена в единичной канавке.

3.7. Относительная теплоотдача от внутренней поверхности наклонной канавки оптимальна при длине траншеи 2,5 и значительно превосходит уровень суммарной относительной теплоотдачи от нагретого квадратной участка пластины с канавкой.

3.8. Интегральные характеристики по тепловой эффективности выделенных участков пластины с канавкой демонстрируют интенсификацию теплообмена с ростом глубины. Так, для квадратного участка с размером стороны – 7 получается – 13% рост суммарной относительной теплоотдачи для наиболее глубокой канавки. Максимальный показатель для участка, ограничивающего канавку, несколько лучше – 32%. Правда, при этом наблюдается двукратный рост относительного сопротивления участка и 7,5-кратный для участка, ограничивающего канавку.

3.9. Установлен физический механизм ускорения пристеночного течения над входной частью наклонной канавки в режиме аномальной интенсификации теплообмена, связанный с увеличением продольной составляющей скорости на срезе длинной канавки почти до 60% от скорости набегающего потока и утончением пограничного слоя.

4.1 Утончение пограничного слоя вплоть до его исчезновения на пластине над входной частью наклонной канавки объясняет сопутствующий эффект ускорения пристеночного потока над пакетом однорядных наклонных канавок на стенке.

4.3. Во входной части канавки наблюдается существенное утончение пристеночного слоя с ростом глубины, в то время в центре и на выходе из канавки пристеночный слой заметно утолщается.

### **Основные результаты диссертации отражены в работах**

1. Исаев С.А., Судаков А.Г., Никущенко Д.В., Усачов А.Е., Чулюнин А.Ю., Дубко Е.Б. RANS расчеты интенсивных отрывных и смерчевых течений на структурированных пластинах и стенках каналов в цифровых двойниках экспериментальных стендов Института механики МГУ и КазНЦ РАН // Вычислительный эксперимент в аэроакустике и аэродинамике: Девятая российская конференция, г. Светлогорск Калининградской области, 26 сентября - 1 октября 2022 г.: Сборник тезисов. – М.: ИПМ им. Келдыша РАН, 2022. С.151-155.

2. Исаев С.А., Никущенко Д.В., Дубко Е.Б., Харченко В.Б., Зубин М.А. Обоснование аномальной интенсификации отрывного течения в наклонной канавке на пластине при высоких числах Рейнольдса // XXVI Всероссийский семинар с международным участием по струйным, отрывным и нестационарным течениям: Материалы докладов. Санкт-Петербург, 27 июня – 1 июля 2022 года / Сост.: М. В. Чернышов, Ю. В. Каун, К. Э. Савелова, А. А. Яценко – СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2022. С.103-104.

3. Исаев С.А., Никущенко Д.В., Судаков А.Г., Гувернюк С.В., Синявин А.А., Зубин М.А., Чулюнин А.Ю., Михеев Н.И., Душин Н.С., Усачов А.Е., Харченко В.Б., Тряскин Н.В., Грицкевич М.С., Дубко Е.Б., Егорова А.А. Энергоэффективные структурированные поверхности с зигзагообразными наклонными канавками (Приоритет 2030) // XIII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, Санкт-Петербург, 21-25 августа 2023 года. С.

4. Isaev S. A., Guvernyuk S. V., Nikushchenko D. V., Sudakov A. G., Sinyavin A. A., Dubko E. B. Correlation between the abnormal enhancement of the separated flow and extraordinary pressure drops in the groove on the plate when the angle of inclination changes from 0 to 90°. *Technical Physics Letters Electronic* ISSN 1090-6533 Print ISSN 1063-7850, 2023, Vol. 49, No. 8, P.33-36. 10.21883/PJTF.2023.15.55863.19560.

5. Isaev S.A., Sudakov A.G., Nikushchenko D.V., Usachov A.E., Zubin M.A., Sinyavin A.A., Chulyunin A.Yu., and Dubko E.B. Tests for validation problems of anomalous intensification of separation flow and heat transfer on structured surfaces with extraordinary pressure differences // *Fluid Dynamics*. 2023. Vol. 58. No. 5. P. 894–905. DOI: 10.1134/S001546282360133X

6. Исаев С.А., Никущенко Д.В., Душин Н.С., Дубко Е.Б., Егорова А.А. Аномальная интенсификация ламинарного теплообмена при обтекании воздухом наклонных овально-траншейных лунок в разреженном пакете на стенке канала с увеличением их длины при постоянной площади пятна на стабилизированном гидродинамическом участке // *Модели и методы аэродинамики. Материалы Двадцать третьей международной школы-семинара. Жуковский*, 2023, С. 35-36.

7. Isaev S.A., Sapozhnikov S.Z., Nikushchenko D.V., Mityakov V.Yu., Seroshtanov V.V. Anomalous Enhancement of Vortex Heat Transfer in the Case of Separated Air Flow over an Inclined Groove in a Heated Isothermal Region of a Flat Plate. // *Fluid Dynamics*. 2024. Vol. 59. P. 49-59. DOI: 10.1134/S0015462823602310