

На правах рукописи

Кон Дехай

**ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ ТУРБУЛИЗИРУЮЩИХ ПОРИСТЫХ  
ВСТАВОК НА ФАКТОР АНАЛОГИИ РЕЙНОЛЬДСА**

Специальность 01.04.14 –  
Теплофизика и теоретическая теплотехника

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Кон Дехай

Москва – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: **Афанасьев Валерий Никанорович,**  
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Терехов Виктор Иванович,**  
доктор технических наук, профессор кафедры технической теплофизики  
Федерального государственного бюджетного образовательного  
учреждения высшего образования «Новосибирский государственный  
технический университет»

**Решмин Александр Иванович,**  
кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник 103 лаборатории  
экспериментальной гидродинамики Научно-исследовательского института  
механики Федерального государственного бюджетного образовательного  
учреждения высшего образования «Московский государственный  
университет имени М.В. Ломоносова»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования «Казанский  
национальный исследовательский технический университет им.  
А.Н.Туполева – КАИ»


Защита состоится «15» мая 2019 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.141.08 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, Лефортовская набережная, д. 1, ф-т «Энергомашиностроение» ауд. 202Э.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.08.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_ 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.141.08  
кандидат технических наук, доцент

 Егоров К.С.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Разработка и создание высокоэффективных, компактных и надежных систем охлаждения является чрезвычайно актуальной проблемой теплоэнергетики любой страны. Решение этой проблемы достигается различными способами и в первую очередь путем использования наиболее эффективных методов интенсификации теплообмена, что ведет к значительной экономии топлива, металлов, затрат труда, росту надёжности оборудования, ресурса работы и т.п. При взаимодействии теплопередающей поверхности с омывающим ее потоком жидкости или газа основное гидродинамическое и термическое сопротивления оказывает пограничный слой, нарастающий на данной поверхности. Большой практический интерес вызывают методы, в которых предлагается воздействовать на поток, в первую очередь на пограничный слой, с помощью различных интенсификаторов, таких как: траншеи, упорядоченные пакеты сферических углублений, ребра, выступы, впадины различной геометрии и т.п. Обычно, для увеличения теплоотдачи используется турбулентный режим течения теплоносителя, поэтому знание гидродинамической структуры турбулентного потока и особенностей теплообмена в нём позволит установить области и методы воздействия на поток. Когда структура турбулентного потока в канале данного сечения, в котором требуется интенсифицировать теплоотдачу, изучена, возникают вопросы: Как увеличить интенсивность турбулентных пульсаций? В каких областях потока и где это даст наибольший эффект?

При разработке различных методов интенсификации теплоотдачи очень важно знать, в какой части пограничного слоя сосредоточены основные гидродинамические и термические сопротивления. Особый интерес вызывают методы интенсификации теплообмена, которые воздействовали бы на пристеночные слои жидкости на расстоянии порядка  $y^+ < 100$  от стенки, не оказывая влияния на ядро потока. Именно такой метод интенсификации теплообмена способен обеспечить опережающий рост теплоотдачи над ростом сопротивления трения. Следует отметить, что в работах, как правило, исследуются выступы и ребра относительно больших размеров – соизмеримых или больше толщины пограничного слоя. Как правило, анализ работ по теплообмену в отрывных зонах указывает на нарушение аналогии Рейнольдса в отрывной области не в пользу теплоотдачи.

Эффективным методом управляемого воздействия на структуру пристеночного турбулентного потока является организация отрывных зон и вихревых структур в нем. Одним из наиболее распространенных способов генерации вихрей являются поперечные выступы, размещаемые на поверхности теплообмена. Выступы могут иметь различную форму и размеры, что существенно сказывается на структуре пограничного слоя и процессах переноса тепла и импульса. В большинстве известных работ исследуются характеристики отрывных зон в каналах в зависимости от относительных геометрических размеров выступов, а при внешнем обтекании, как правило, исследуются выступы соизмеримые с толщиной пограничного слоя или превосходящие его. В то же время крайне мало исследований гидродинамики и теплообмена при внешнем обтекании по-

верхностей с выступами.

Как известно, при обтекании сплошного выступа впереди него и за ним образуются сложные отрывные и вихревые зоны, которые значительно ухудшают условия теплоотдачи в его окрестности. Исследования показали, что путем воздействия на геометрию выступа можно достигнуть уменьшения или удаления этих зон. Кроме того, несмотря на достигнутые в последние годы успехи в области физического и математического моделирования турбулентности до сих пор отсутствуют адекватные математические модели для расчета процессов переноса импульса и тепла в турбулентных отрывных течениях. Таким образом, поднятая в диссертационной работе проблема не только актуальна, но и она соответствует приоритетному направлению развития науки, технологий и техники РФ: «Энергоэффективность, энергосбережение и ядерная энергетика».

**Цель диссертационной работы.** Установление механизмов и физических закономерностей процессов увеличения эффективности теплоотдачи путем разработки методов воздействия на тепловые и динамические характеристики турбулентного пограничного слоя на плоской стенке путем установки различных выступов, а также оценка возможности применения той или иной математической модели применительно к рассматриваемым течениям и течениям, представляющим практический интерес в существующих или разрабатываемых конструкциях.

Для достижения этой цели в работе были поставлены и решены **следующие задачи:**

1. Анализ и сравнение существующих методов интенсификации теплообмена на поверхности с выступом.
2. Экспериментальное исследование процессов гидродинамики и теплообмена при турбулентном обтекании прямоугольных выступов различной геометрии высотой порядка  $y^+ < 100$ .
3. Верификация моделей турбулентности (линейные, нелинейные и дифференциальная модели) для расчета плоского отрывного турбулентного течения около одиночного прямоугольного выступа на пластине.
4. Верификация моделей для турбулентных тепловых потоков (простые модели с нулевым уравнением и сложные модели) для расчета турбулентного теплообмена в плоском отрывном потоке около одиночного прямоугольного выступа на пластине.
5. Экспериментальное исследование средних и пульсационных динамических и тепловых характеристик отрывного течения при обтекании одиночного прямоугольного щелевого выступа.
6. Численное исследование влияния формы и размеров щели между нижней стенкой выступа и пластиной на характеристики турбулентного течения и теплообмена.
7. Экспериментальное исследование структуры турбулентного пограничного слоя на плоской пластине с одиночным прямоугольным перфорированным выступом.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

1. Впервые получены экспериментальные данные по средним и пульсацион-

ным характеристикам в турбулентном пограничном слое при обтекании прямоугольных выступов (размером  $y^+ < 100$ ) без и со скруглением углов, расположенных на плоской пластине, обогреваемой по закону  $q_{\text{ст}} = \text{const}$ .

2. Проведена верификация двухпараметрических диссипативных моделей турбулентности и многопараметрической модели рейнольдсовых напряжений, реализованных в пакете ANSYS FLUENT с включением UDF, для расчета плоского отрывного турбулентного течения около прямоугольного выступа на пластине.
3. Проведена верификация ряда моделей для турбулентных тепловых потоков, которые включаются в простые модели с нулевым уравнением и сложные модели (двухпараметрические диссипативные модели, явные алгебраические модели и дифференциальная модель), реализованные в пакете ANSYS FLUENT с включением UDF, для расчета турбулентного теплообмена в плоском отрывном потоке около прямоугольного выступа на пластине.
4. Впервые получены экспериментальные данные по средним и пульсационным характеристикам скорости и температуры в сечениях турбулентного пограничного слоя при обтекании щелевых прямоугольных выступов в условиях  $q_{\text{ст}} = \text{const}$ .
5. Проведено детальное численное исследование влияния формы и размеров щели между нижней стенкой выступа и плоской пластиной на характеристику турбулентного течения и теплообмена.
6. Впервые получены экспериментальные данные по средним и пульсационным характеристикам скорости и температуры в сечениях турбулентного пограничного слоя при обтекании перфорированных с различной проницаемостью прямоугольных выступов в условиях  $q_{\text{ст}} = \text{const}$ .

**Достоверность и обоснованность** полученных результатов обеспечивается использованием современных аттестованных средств измерения и апробированных методов определения параметров, оценкой неопределенностей измерений, согласованием полученных экспериментальных данных с общеизвестными (как теоретическими, так и экспериментальными) данными других авторов.

**Теоретическая и практическая ценность** данной работы заключается в том, что получены **новые** экспериментальные данные по средним и пульсационным характеристикам скорости и температуры в турбулентном пограничном слое при обтекании прямоугольных выступов (сплошных, щелевых и перфорированных) размером  $y^+ < 100$ . Полученные в ходе численных и экспериментальных исследований данные могут быть использованы для более глубокого понимания структуры турбулентного течения и теплообмена, а так же при тестировании новых численных моделей (моделей турбулентности и моделей для турбулентных тепловых потоков).

**На защиту выносятся следующие положения диссертации:**

1. Методика экспериментального исследования средних, пульсационных, динамических и тепловых характеристик в отрывном турбулентном пограничном слое.
2. Верификация двухпараметрических диссипативных моделей турбулентности и многопараметрической модели рейнольдсовых напряжений для расчета плос-

кого отрывного турбулентного течения около прямоугольного выступа на пластине при  $q_{\text{ст}} = \text{const}$ .

3. Верификация ряда моделей для турбулентных тепловых потоков, которые включаются в простые модели с нулевым уравнением и сложные модели (двухпараметрические диссипативные модели, явные алгебраические модели и дифференциальная модель) для расчета турбулентного теплообмена в плоском отрывном потоке около прямоугольного выступа на пластине при  $q_{\text{ст}} = \text{const}$ .

4. Экспериментально получены данные по влиянию геометрии (сплошного, щелевого и перфорированного) выступа на средние, пульсационные, динамические и тепловые характеристики турбулентного пограничного слоя.

5. Численное моделирование процессов гидродинамики и теплообмена при турбулентном обтекании щелевых выступов на плоской пластине.

#### **Личный вклад автора:**

Диссертационная работа выполнялась на экспериментальном стенде кафедры Теплофизики МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор лично принимал участие в разработке общей концепции и методики проведения экспериментов; в создании рабочих участков стенда и их отдельных систем; в разработке программного обеспечения, необходимого для работы экспериментального стенда. Автор лично принимал участие в монтаже, доводке и тарировке измерительного оборудования стенда, в разработке и внедрении методики экспериментального исследования, а также в разработке, отладке и тестировании программ автоматизации эксперимента. Кроме того, автор лично провел верификацию моделей турбулентности (двухпараметрические диссипативные модели турбулентности и многопараметрическую модель рейнольдсовых напряжений) и моделей для турбулентных тепловых потоков (модели с нулевым уравнением, двухпараметрические диссипативные модели, явные алгебраические модели и дифференциальная модель), реализованных в пакете ANSYS FLUENT с включением UDF, для расчета плоского отрывного турбулентного течения и теплообмена около прямоугольного выступа на пластине. Получены новые экспериментальные данные влияния параметров выступов (формы, размеров щели, отверстий и их расположение) на средние, пульсационные, динамические и тепловые характеристики турбулентного пограничного слоя. Проведено численное исследование влияния формы и размеров щели между нижней стенкой выступа и пластиной на характеристики турбулентного течения и теплообмена.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались, обсуждались и получили положительную оценку на многих Международных и Республиканских конференциях и научных семинарах:

1. XXI Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева (г. Санкт-Петербург, 2017 г.).
2. Международная конференция «Современные проблемы теплофизики и энергетики» (г. Москва, 2017 г.);
3. 16th International Heat Transfer Conference (ИНТРС16, г. Пекин, 2018 г.).
4. XI Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (г. Москва, 2018 г.).

5. 7-ая Российская национальная конференция по теплообмену (РНКТ-7, г. Москва, 2018 г.).
6. Всероссийская студенческая конференция «Студенческая научная весна» (Москва, 2015, 2017, 2018 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 16 научных работ (8 статей, 8 тезисов докладов и материалов конференций), из них 5 статей в рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК РФ и 2 статьи из Перечня международных научных изданий, включенных в базу данных Web of Science, Scopus, общий объем 5,0 п.л.

**Структура и объём работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов и заключений и списка литературы из 208 наименований. Объем работы включает 193 страницы, 72 рисунка, 18 таблиц.

### Содержание работы

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, отражены практическая значимость, научная новизна полученных результатов, личный вклад автора, защищаемые положения, краткое содержание глав диссертации.

**В первой главе** представлен обзор опубликованных работ, посвященных численным и экспериментальным методам исследования теплообмена и сопротивления в отрывных потоках. Рассмотрены вопросы интенсификации теплообмена и изменения сопротивления при наличии выступов. Описана структура течения при обтекании одиночного выступа и приведены существующие методы для снижения сопротивления и увеличения теплоотдачи. Выявлены механизмы процессов переноса импульса и теплоты для управления отрывным потоком в целях интенсификации теплообмена. Обобщены результаты численных и экспериментальных исследований интенсификации теплообмена и изменения сопротивления на поверхности с выступами. Выявлены основные геометрические параметры выступа, влияющие на теплогидравлические характеристики потока. На основании анализа литературы сформулированы цель диссертационной работы и основные задачи для её достижения.

Использование выступов является одним из перспективных методов интенсификации теплообмена – как в каналах теплообменного оборудования, так и в каналах охлаждения энергоустановок. В значительном количестве работ исследуются характеристики отрывных течений и теплообмена в каналах в зависимости от относительных геометрических размеров выступов. Такие как: отношение высоты канала к его ширине, отношение высоты выступа к гидравлическому диаметру канала, шаг между выступами к высоте выступа, а также форма выступа, расположение его под разными углами к основному потоку и т.п. В то же время крайне мало исследований гидродинамики и теплообмена при внешнем обтекании поверхности с выступами. Мало изучена пристеночная область при  $y^+ < 100$  и связь между вихреобразованием и теплоотдачей. Следует отметить, что в работах исследуются выступы и ребра относительно больших размеров – соизмеримых или больше толщины пограничного слоя. Как правило, анализ работ по теплообмену в отрывных зонах указывает на наруше-



ние аналогии Рейнольдса в отрывной области не в пользу теплоотдачи.

В случае щелевого и перфорированного выступа, теплогидравлическая эффективность увеличивается, а эффективность теплоотдачи перед и непосредственно за выступом улучшается по сравнению со случаем сплошного выступа. Однако стоит отметить незначительность работ посвященных проницаемым выступам. Кроме того, в опубликованных работах, как правило, исследовались средние параметры в характерных точках (местах отрыва и присоединения потока), но отсутствуют детальные измерения характеристик потока по всей поверхности теплообмена, особенно за каждым выступом, а также отсутствуют пульсационные характеристики.

Обобщая результаты опубликованных работ, отмечается, что данные по осредненным значениям интенсификации теплообмена и увеличения сопротивления

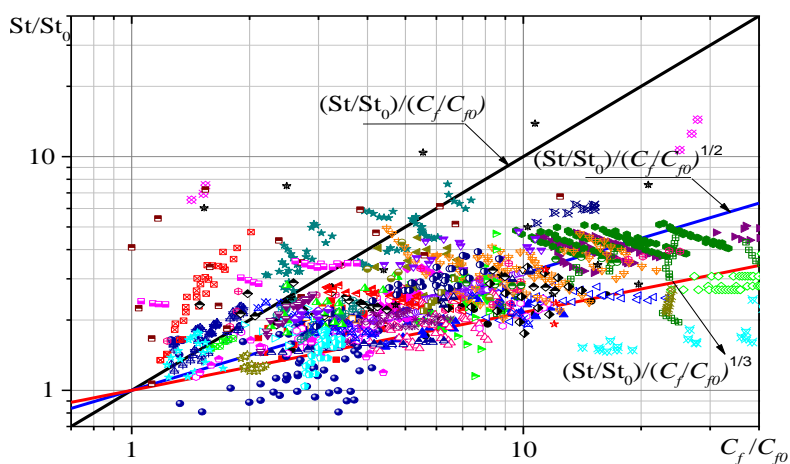


Рис. 1. Обобщенные данные по зависимости интенсивности теплообмена  $St/St_0$  от увеличения сопротивления  $C_f/C_{f0}$

находятся в диапазоне  $St/St_0 = 0,81-14,4$  и  $C_f/C_{f0} = 1,0-172,5$  (Рис. 1); данные по величине теплогидравлической эффективности  $(St/St_0)/(C_f/C_{f0})$  – в диапазоне 0,03-7,5. Исходя из представленного обзора опубликованных работ, делается вывод о необходимости проведения детального исследования структуры пограничного слоя в окрестности выступа для разработки методов интенсификации теплообмена и чис-

ленной оценки предлагаемых и совершенствования существующих полуэмпирических моделей расчета процессов гидродинамики и теплообмена.

**Вторая глава** содержит описание экспериментального стенда, методики экспериментальных исследований и математических моделей для расчета турбулентного течения и теплообмена. Экспериментальное исследование проводилось на дозвуковой низкотурбулентной ( $\epsilon = 0.2\%$ ) аэродинамической трубе открытого типа, работающей по принципу всасывания (Рис. 2).

Измерения выполнены с использованием, как микрозонда Пито-Прандтля с микротермопарой, так и термоанемометрического комплекса Dantec Dynamics, что позволило исследовать ламинарный подслой, переходную область пограничного слоя, а так же получить кроме средних характеристик течения также и пульсационные. Профили скорости (в невозвратных частях потока) и ее продольные пульсации в различных сечениях в пограничном слое измерялись с помощью однопиточного датчика с модулем Dantec Dynamics 90C10. Измерения температуры выполнены с использованием температурного модуля Dantec Dynamics 90C20. Неопределенности средней скорости и температуры были оценены  $\pm 4,0\%$  и  $\pm 3,6\%$  соответственно. Неопределенность измерения среднеквадратичной величины продольных пульсаций скорости и температуры оце-



нивалась соответственно в  $\pm 8,0\%$  и  $\pm 7,0\%$ .

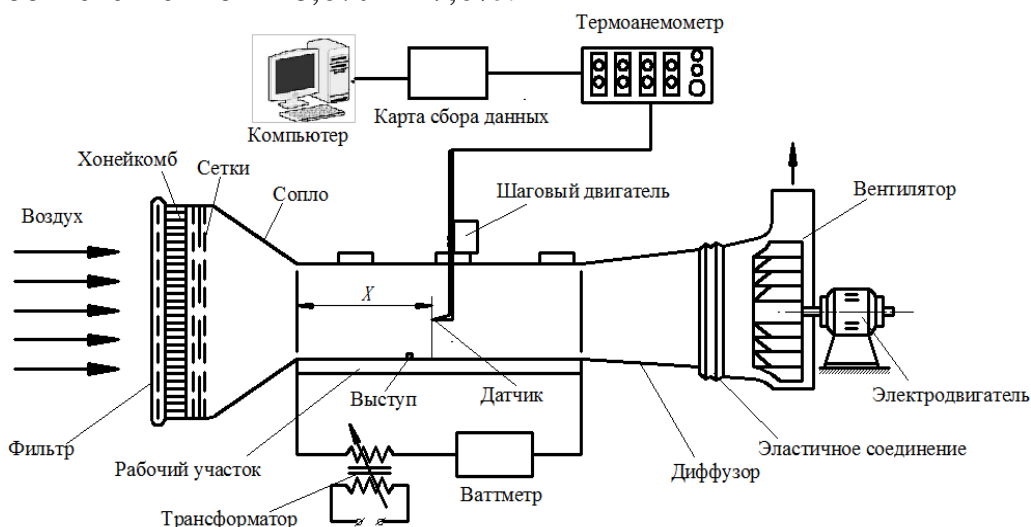


Рис. 2. Функциональная схема аэродинамической трубы

Локальные коэффициенты трения определялись методом Клаузера по логарифмической части скорости в пограничном слое и по наклону профиля скорости в ламинарном подслое и построены по толщине потери импульса. Локальные коэффициенты теплоотдачи рассчитаны по потере энергии и по наклону профиля температуры в ламинарном подслое. Неопределенность в определении относительных коэффициентов трения и теплоотдачи оценивалась соответственно в  $\pm 15,2\%$  и  $\pm 12,6\%$ .

Отмечена сложность разработки адекватной математической модели (модель турбулентности и модель для турбулентных тепловых потоков) для замыкания на основе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса и энергии. Подробно рассмотрены различные модели турбулентности (линейные и нелинейные модели вихревой вязкости, а так же дифференциальная модель) при анализе структуры турбулентного отрывного потока. Приведено описание различных моделей для турбулентных тепловых потоков: простая модель с нулевым уравнением и сложные модели (двухпараметрические диссипативные модели, явные алгебраические модели и дифференциальная модель).

**Третья глава** посвящена численному и экспериментальному исследованию процессов гидродинамики и теплообмена при турбулентном обтекании сплошных прямоугольных выступов.

**В параграфе 3.1** представлены экспериментальные результаты по средним и пульсационным характеристикам в турбулентном пограничном слое при обтекании прямоугольных выступов (размером  $y^+ < 100$ ) без и со скруглением углов, расположенных на плоской пластине, обогреваемой по закону  $q_{ст} = \text{const}$ .

Экспериментально полученные профили скорости и температуры в пограничном слое в сечениях 1–3 на гладкой пластине до установки выступа в этой области (Рис. 3, а) приближаются к закону одной седьмой, т.е. профили имеют вид характерный для плоской стенки, а исследуемый пограничный слой вполне развитый турбулентный. Продольные пульсации скорости и температуры в сечениях 1–3 (Рис. 3, б) имеют вид, характерный для турбулентного пограничного слоя при безградиентном обтекании пластины.

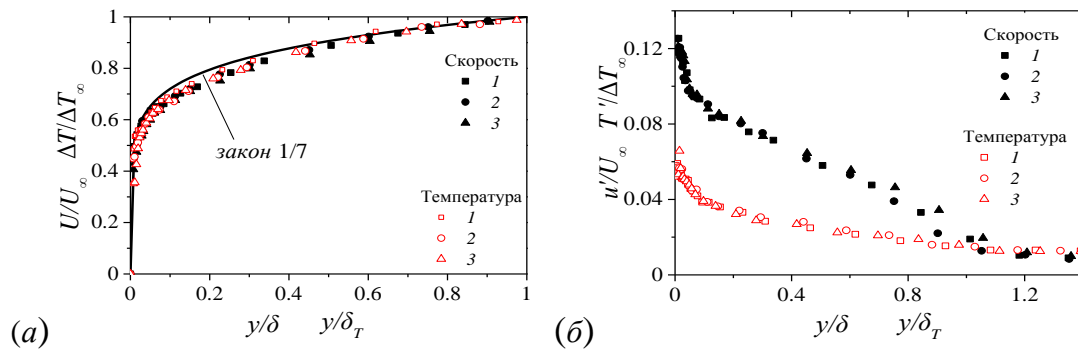


Рис. 3. Распределение средней скорости и температуры (а) и их пульсаций (б) в пограничном слое для плоской пластины

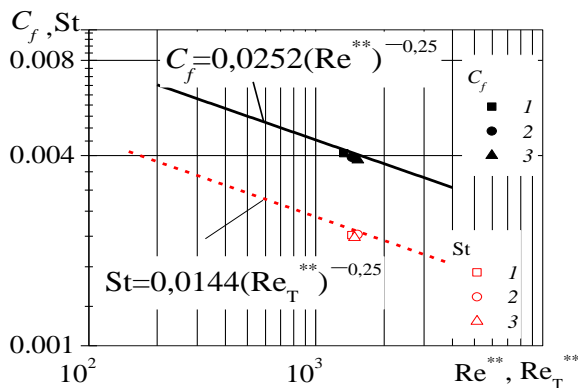


Рис. 4. Законы трения и теплообмена на плоской пластине

Приведенные на Рис. 4 значения локальных коэффициентов трения и теплоотдачи достаточно хорошо согласуются с известными законами трения и теплообмена при турбулентном обтекании пластины. Их хорошее согласование с известными законами свидетельствует о приемлемости используемых методик определения трения и коэффициентов теплоотдачи.

Выступ прямоугольной формы высотой  $h = 3,2$  мм и шириной  $b = 3,2$  мм устанавливался на нагреваемую нижнюю стенку перпендикулярно потоку на расстоянии  $l_x = 460$  мм от входа в рабочий участок. Схема установки выступа показана: на Рис. 5, а с прямоугольным выступом; на Рис. 5, б прямоугольным выступом со скругленными углами  $r = 0,5$  мм.

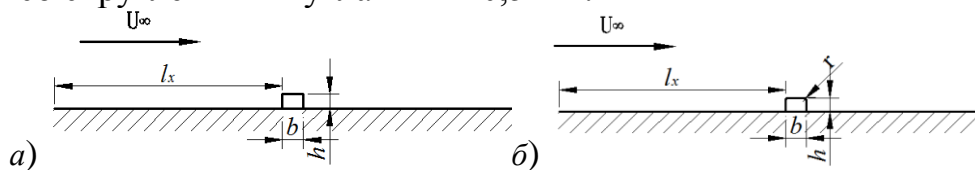


Рис. 5. Схема расположения выступов на пластине: а – прямоугольный выступ; б – прямоугольный выступ со скругленными углами

На Рис. 6 представлены распределения скорости, температуры и их пульсаций в пограничном слое в интервале  $-11,94 < x/h < 20,88$  для прямоугольного выступа и прямоугольного выступа со скруглением. Перед выступом профили температуры более заполнены, чем профили скорости, и они более консервативны к выступу и изменению его формы. За выступом образуется сложное вихревое течение, и в области между сечениями 7 и 8 ( $5,25 < x/h < 8,38$ ) находится место присоединения основного потока к поверхности пластины (Рис. 6, а). В отрывной зоне существенное изменение претерпевают пульсации скорости и температуры (Рис. 6, б), на что указывает появление вторых максимумов в их распределении.

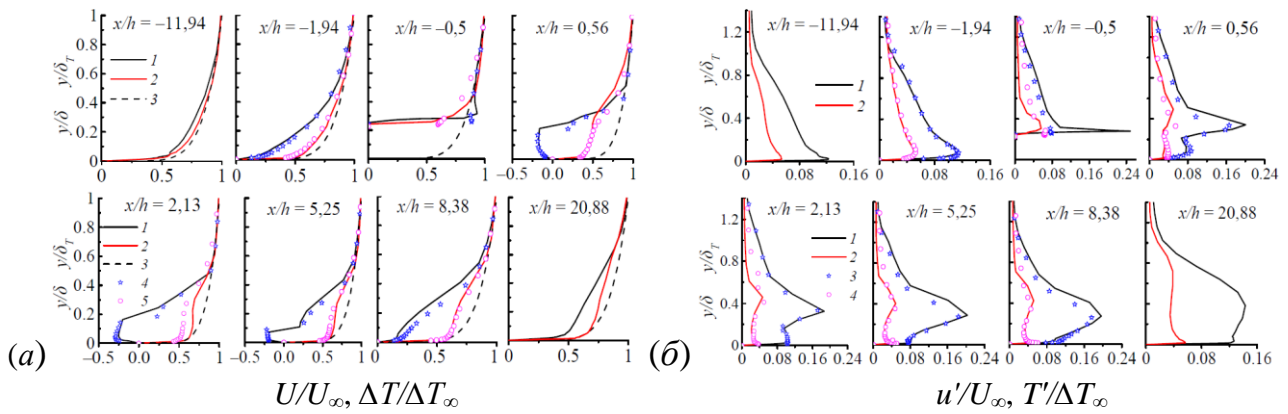


Рис. 6. Распределение скорости, температуры (а) и их пульсаций (б) в пограничном слое для прямоугольного выступа, а: 1 –  $U/U_\infty$ , 2 –  $\Delta T/\Delta T_\infty$ , 3 – «закон 1/7»; для выступа со скруглением: 4 –  $U/U_\infty$ , 5 –  $\Delta T/\Delta T_\infty$ ; б: 1 –  $u'/U_\infty$ , 2 –  $T'/\Delta T_\infty$ ; для выступа со скруглением: 3 –  $u'/U_\infty$ , 4 –  $T'/\Delta T_\infty$

Из рассмотрения приведенных значений локальных относительных коэффициентов трения и теплоотдачи (Рис. 7) видно, что в данных условиях рост коэффициента теплоотдачи превосходит рост коэффициента трения, кроме того, выступы со скруглением более предпочтительны.

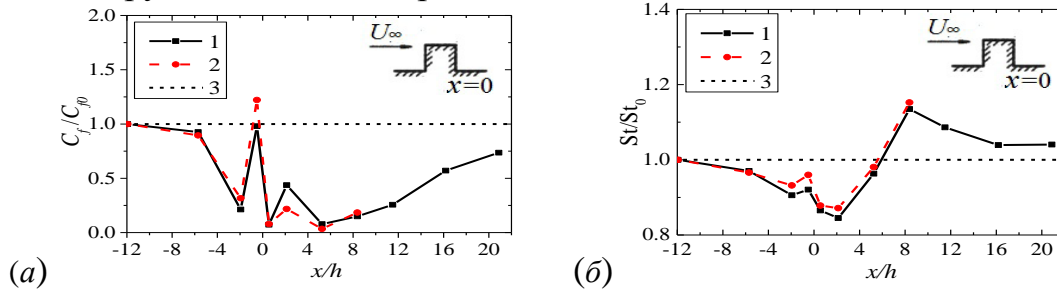


Рис. 7. Локальные относительные коэффициенты трения (а) и теплоотдачи (б) на поверхности пластины с выступом: 1 – прямоугольный выступ; 2 – прямоугольный выступ со скруглением; 3 – гладкая пластина

В параграфе 3.2 проведена верификация моделей турбулентности при анализе структуры турбулентного пограничного слоя около прямоугольного выступа на пластине. Исследование выполнено с использованием вычислительного программного пакета ANSYS FLUENT с включаем UDF. Рассматривается двумерное обтекание турбулентным потоком несжимаемой вязкой жидкости одиночного прямоугольного выступа, расположенного на нижней плоской стенке. Геометрические размеры модели соответствуют размерам экспериментального участка (Рис. 8).

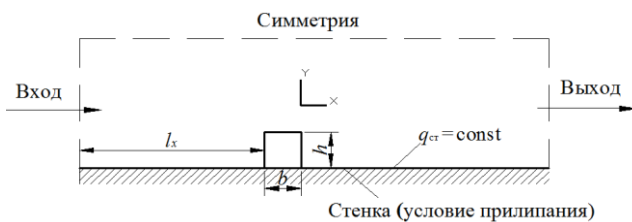


Рис. 8. Схема расчетной области для выступа

выступа, расположенного на нижней плоской стенке. Геометрические размеры модели соответствуют размерам экспериментального участка (Рис. 8).

Пять различных линейных моделей турбулентности, в том числе: стандартная  $k-\varepsilon$  модель с модификацией Като-Лаундера (SKE-KL), Realizable  $k-\varepsilon$  модель (RKE), низкорейнольдсовая AKN модель, четырех параметрическая модель  $v^2-f$  и алгебраическая модель напряжений рейнольдса в рамках приближе-

ния пограничного слоя (ASM-BL) – были выбраны для замыкания системы уравнений Навье-Стокса.

Линейные двухпараметрические модели базируются на предположении Буссинеска и имеют погрешности в представлении разностей нормальных рейнольдсовых напряжений. Уточнение определения генерации кинетической энергии турбулентности и учета ее анизотропии связано с построением нелинейных моделей вихревой вязкости (NLEVM), в которых вводятся дополнительные нелинейные члены. По сравнению с линейными моделями они обладают существенными преимуществами. Однако, при этом сохраняется реализованное в них предположение о квазиравновесности турбулентности. Таким образом, в работе сравниваются пять нелинейных  $k-\varepsilon$  моделей:

высокорейнольдсовая квадратная нелинейная модель (SZL модель), низкорейнольдсовая квадратная нелинейная модель (LRN-SSG модель), две высокорейнольдсовые кубические нелинейные модели (CLS модель, EM модель) и низкорейнольдсовая кубическая нелинейная модель (LRN-LCL модель). Кроме того, также рассмотрена дифференциальная

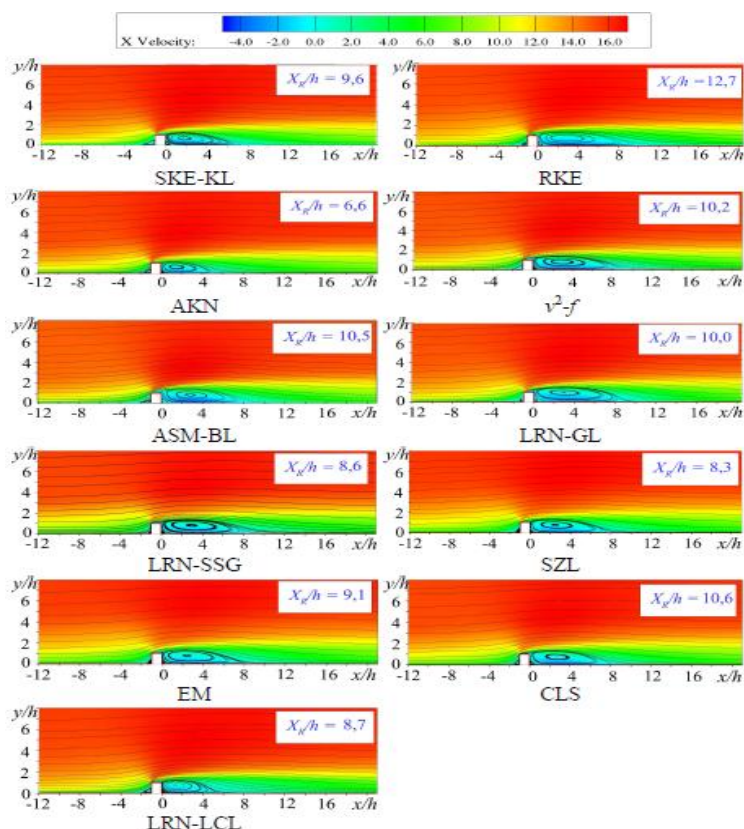


Рис. 9. Распределение продольной составляющей скорости и линии тока, рассчитанные одиннадцатью различными моделями для выступа

модель для напряжений Рейнольдса (DRSM) – модель Гибсона–Лаундера с низкорейнольдсовой модификацией Лаудер-Шима (LRN-GL).

На Рис. 9 представлены поле скоростей потока и картины течения около

одиночного прямоугольного выступа, рассчитанные по различным моделям. Как видно, рассчитанные длины отрывной зоны, определенные с помощью низкорейнольдсовых моделей (AKN, LRN-SSG, LRN-LCL), хорошо совпадают с экспериментальными данными ( $X_R/h \approx 8$ ), а модель RKE дает существенно завышенное значение ( $X_R/h = 12,7$ ). В целом, нелинейные модели более точно предсказывают длину отрывной зоны, чем линейные модели.

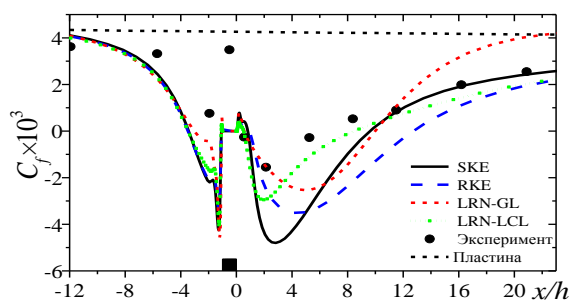


Рис. 10. Распределение локальных коэффициентов трения на поверхности пластины с прямоугольным выступом



Из сопоставления численных прогнозов и экспериментальных данных, полученных для коэффициентов трения (Рис. 10), следует предпочтительность выбора модели LRN-LCL.

**В параграфе 3.3** проведена верификация моделей для турбулентных тепловых потоков при обтекании прямоугольного выступа на пластине. Согласно Лаундеру, который отмечает, что в целом на качество прогноза характеристик теплообмена большее влияние оказывают модели турбулентности для поля скорости, чем тепловые модели для уравнения энергии. Поэтому, модели LRN-LCL и LRN-GL были выбраны для расчета поведения отрывных течений. Рассмотрены различные модели для турбулентных тепловых потоков:

- Аналогия Буссинеска (модель с нулевым уравнением);
- Модель с двумя уравнениями для теплообмена: высокорейнольдсовая модель AKN, низкорейнольдсовая модель SSZ и BCD;
- Явная алгебраическая модель турбулентных тепловых потоков (EАНFM): Рхее и Сунг модель (RS), модификационная модель Абэ и Суга (MAS), низкорейнольдсовая модель Юнис и др. (LRN-YSC);
- Дифференциальная модель для тепловых потоков: Шишов и Леонтьев модель (SL).

На Рис. 11 приведено сравнение расчетных и экспериментально полученных профилей пульсаций температуры в выбранных сечениях. Как видно, численные прогнозы, полученные с помощью BCD моделей для турбулентного теплового потока, хорошо согласуются с экспериментальными данными.

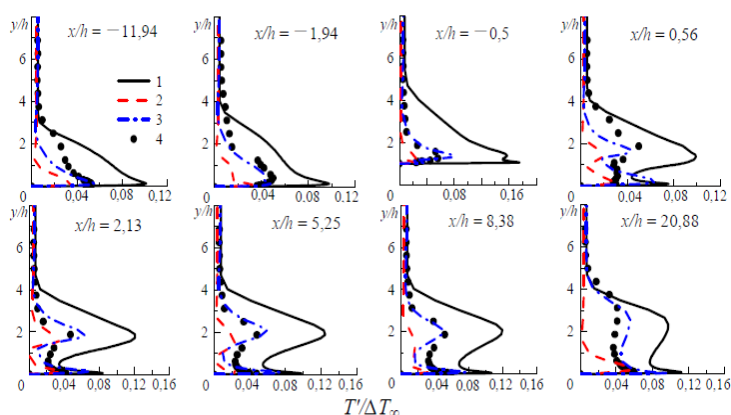


Рис. 11. Распределение пульсаций температуры при обтекании одиночного прямоугольного выступа: 1 – AKN, 2 – SSZ, 3 – BCD, 4 – эксперимент

базирующиеся на основе дифференциальной модели турбулентности (LRN-GL).

**В четвертой главе** представлены результаты экспериментальных и численных исследований процессов гидродинамики и теплообмена при турбулентном обтекании щелевого выступа на плоской пластине.

**В параграфе 4.1** экспериментально исследовались средние, пульсационные, динамические и тепловые характеристики течения при обтекании одиночных прямоугольных щелевых выступов с  $\delta/h \approx 4$  (Рис. 13) с конфузорной (Вариант B1), диффузорной (Вариант C1) щелью и щелью постоянного сечения (Ва-

Распределения относительных коэффициентов теплоотдачи, полученные с помощью модели с нулевым уравнением (Рис.12, а), базирующихся на основе различных моделей турбулентности, заметно отличаются за выступом от эксперимента. Значительно лучшее качественное и количественное совпадение соответствующих расчетных профилей с экспериментальными данными дают сложные модели (Рис.12, б), ба-

риант D1) в турбулентном пограничном слое, формирующемся при обтекании воздухом поверхности плоской пластины, нагреваемой при  $q_{\text{ст}} = \text{const}$ .

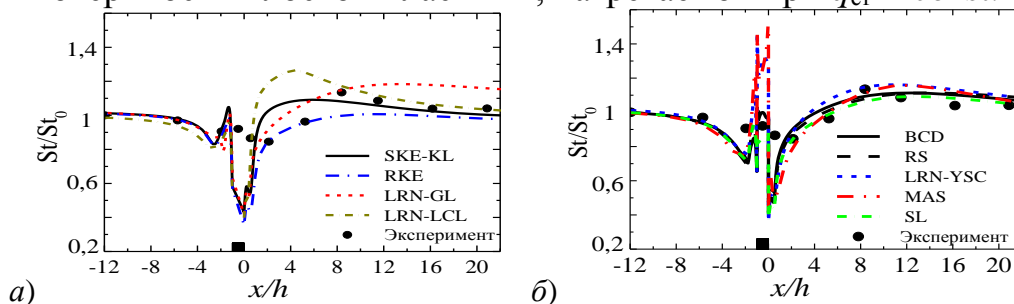


Рис. 12. Распределение локальных относительных коэффициентов теплоотдачи на поверхности пластины с прямоугольным выступом: а) – модель постоянного турбулентного числа Прандтля; б) – сложные модели

На Рис. 14 представлены распределения скорости, температуры и их пульсаций в пограничном слое для выступа с конфузурной щелью. Аналогичные результаты получены для выступа с диффузорной щелью и выступа со щелью постоянного сечения. Показано, что перед щелевым выступом не образуется вихревых и отрывных зон. За выступом с конфузурной щелью рециркуляционная зона отсутствует, а за

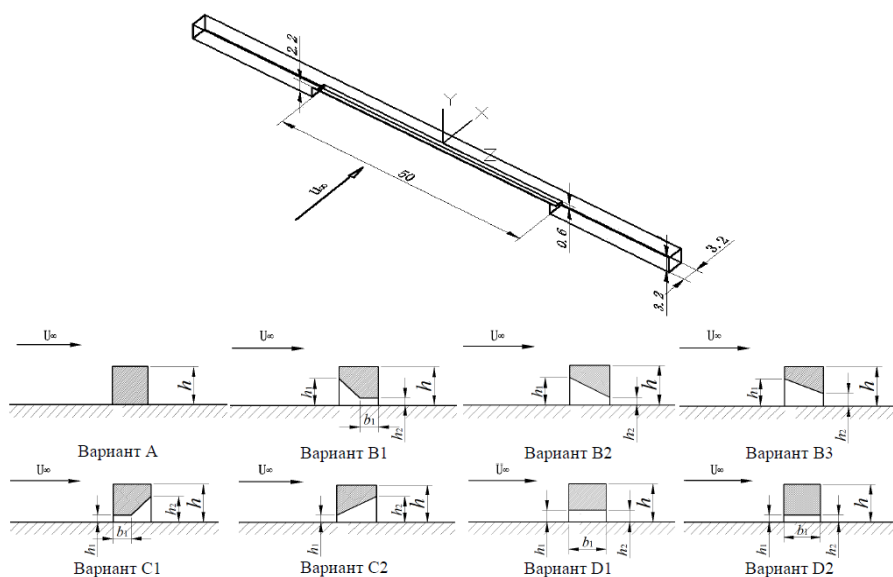


Рис. 13. Схема расположения щелевого выступа для всех вариантов

выступом с щелью постоянного сечения и диффузорной щелью она существенно меньше ( $x/h < 2,5$  и  $5$  соответственно), чем за сплошным выступом ( $x/h \approx 8$ ).

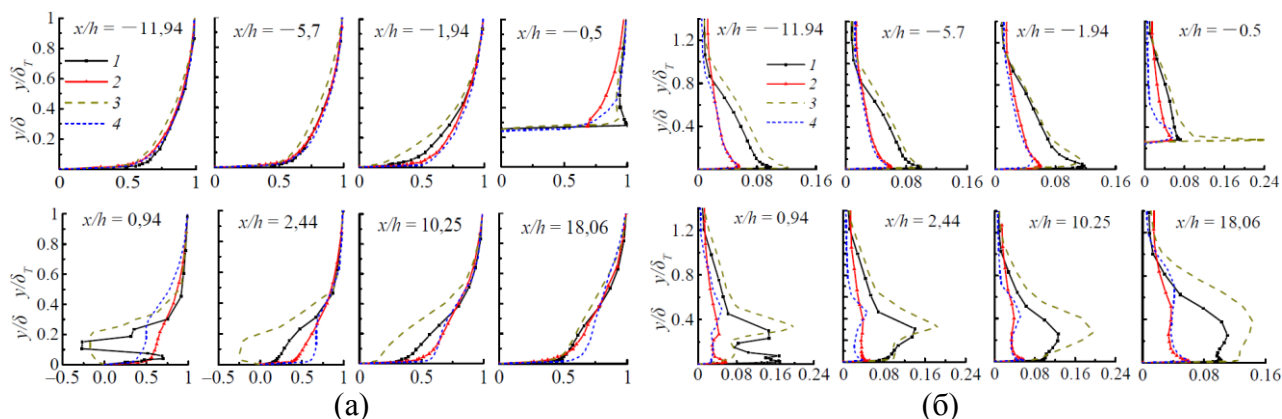


Рис. 14. Распределение скорости, температуры (а) и их пульсаций (б) в пограничном слое для Варианта B1: 1 –  $U/U_{\infty}$ , 2 –  $\Delta T/\Delta T_{\infty}$ ; сплошной выступ: 3 –  $U/U_{\infty}$ , 4 –  $\Delta T/\Delta T_{\infty}$



В параграфах 4.2 и 4.3 проведено детальное численное исследование влияния формы и размера щели между нижней стенкой выступа и пластиной на

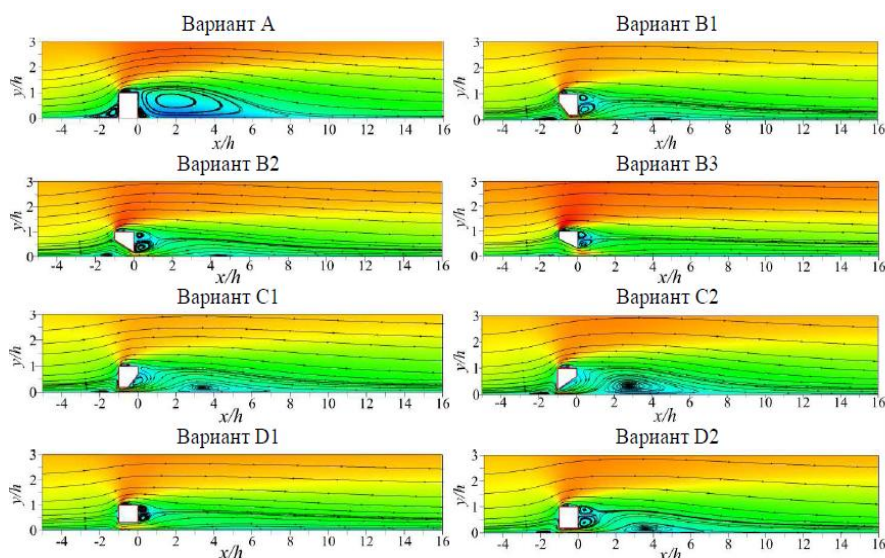


Рис. 15. Линии тока в области выступа в продольно-вертикальной ( $x$ - $z$ ) плоскости вдоль середины пластины для различных вариантов

ко используемых моделей турбулентности: стандартная  $k$ - $\varepsilon$  модель с модификацией Като-Лаундера (SKE-KL),  $k$ - $\omega$  модель Менгера (MSST), четырех параметрическая модель  $v^2$ - $f$ , явная алгебраическая модель напряжений рейнольдса WJBSL-EARSM и дифференциальная модель для напряжений Рейнольдса (LRNGL) – были выбраны для выбора адекватной модели турбулентности применительно к рассматриваемому течению.

Сопоставление результатов расчета с экспериментально полученными профилями продольной составляющей скорости и ее пульсации, а также профилями температуры, продемонстрировало, что используемая в расчетах мо-

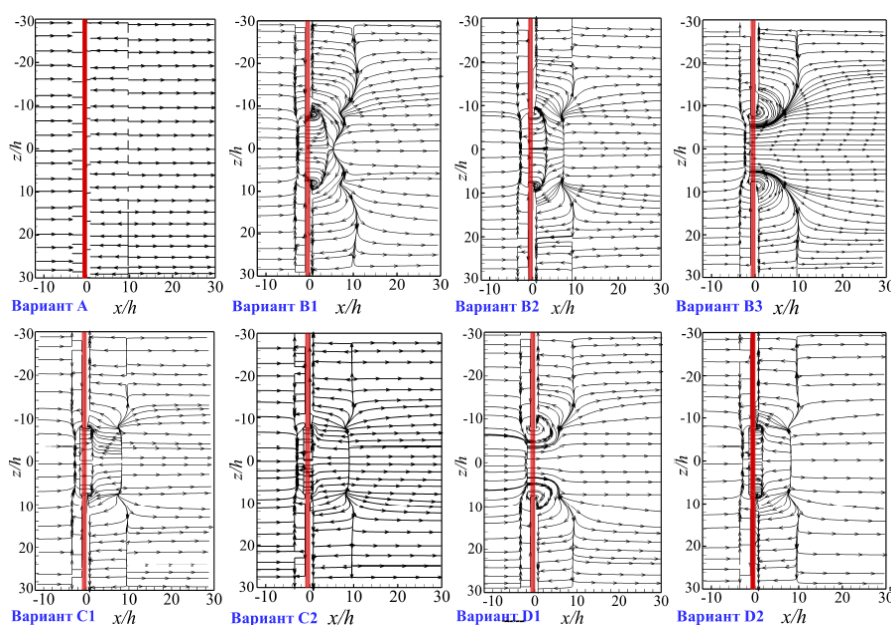


Рис. 16. Предельная линия тока, приближающаяся к поверхности теплообмена с выступом

характеристики турбулентного течения и теплообмена. Рассматриваются гидродинамика и теплообмен при трехмерном обтекании турбулентным потоком несжимаемой вязкой жидкости одиночного выступа прямоугольной формы восьми вариантов (Рис. 13). Пять различных широ-

дель турбулентности SKE-KL обеспечивает приемлемую для практики точность расчета динамических и тепловых характеристик данного течения.

Структура течения в области выступа в продольно-вертикальной ( $x$ - $z$ ) плоскости вдоль середины пластины представлена на Рис. 15, на котором показаны расчетное без-

размерное поле продольной составляющей скорости и линии тока. Формирующаяся в щели пристеночная струя существенно влияет на структуру отрывного течения за выступом. За выступом со щелью, особенно с конфузорной щелью, рециркуляционная зона существенно меньше, чем за сплошным выступом. При больших размерах струи (Варианты В3 и D1) повторного присоединения потока не происходит.

Для анализа характера течения потока и теплоотдачи на рис. 16 представлены предельные линии тока, приближающиеся к поверхности теплообмена для различных вариантов. Предельная линия тока – это линия тока на сетке первого пристеночного слоя, приближающаяся к поверхности теплообмена. Из Рис. 16 следует, что размер и форма щели существенно влияют на интенсивность поперечного углового вихря, размер которого увеличивается при увеличении размера пристеночной струи (Варианты В3 и D1).

На Рис. 17 представлено распределение относительных локальных коэффициентов теплоотдачи

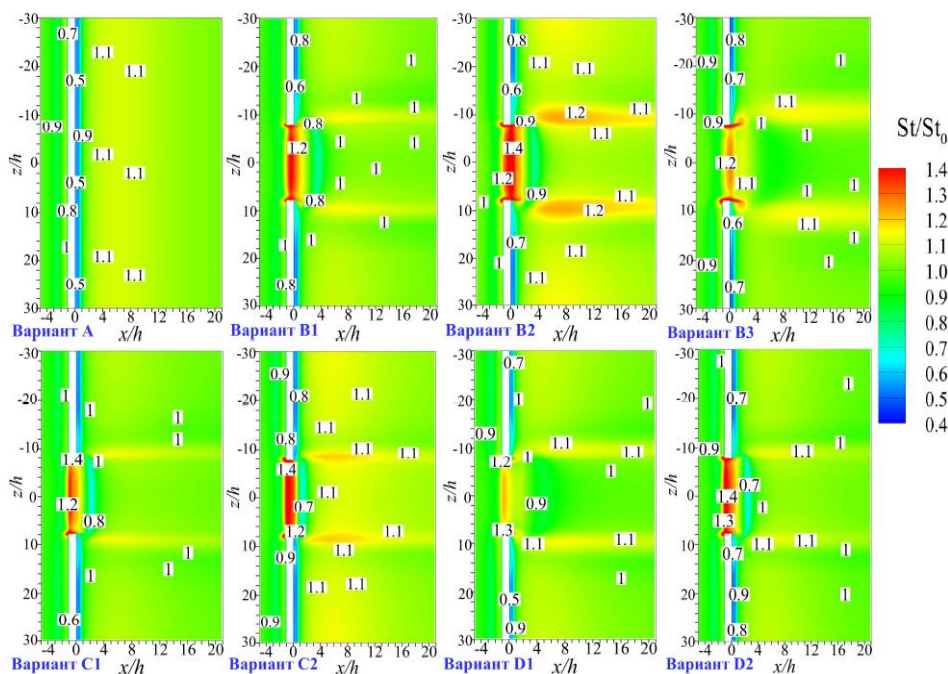


Рис. 17. Поле локального относительного коэффициента теплоотдачи на поверхности теплообмена

пом в поперечном направлении наблюдается пара симметричных протяженных пятен с высокими значениями коэффициентов теплоотдачи, особенно в случае выступов с конфузорной и диффузорной щелью (Варианты В2 и С2), относи-

тельно середины пластины. фициентов теплоотдачи ( $St/St_0$ ) перед и за каждым видом выступа на нижней стенке пластины. Здесь величина  $St_0$  характеризует теплообмен в развитом турбулентном пограничном слое для случая обтекания плоской пластины при  $q_{ст} = \text{const}$ . Отмечается, что при наличии щели между стенкой и выступом

относительно середины пластины.

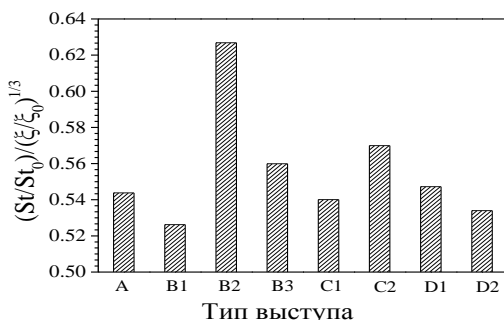


Рис. 18. Теплогидравлическая эффективность выступа

На Рис. 18 представлены данные по теплогидравлической эффективности для различных геометрий выступов. Видно, что по сравнению со сплошным выступом (Вариант А) в случае выступа с конфузорной щелью (Вариант В2) теплогидравлическая эффективность существенно повышается (на 15%). В основном это происходит за счет значительного снижения коэффициента гид-

равлических потерь (на 27%), а относительное значение  $St/St_0$  в выбранной области стенки увеличивается только на 4%.

В пятой главе представлены результаты экспериментальных исследований

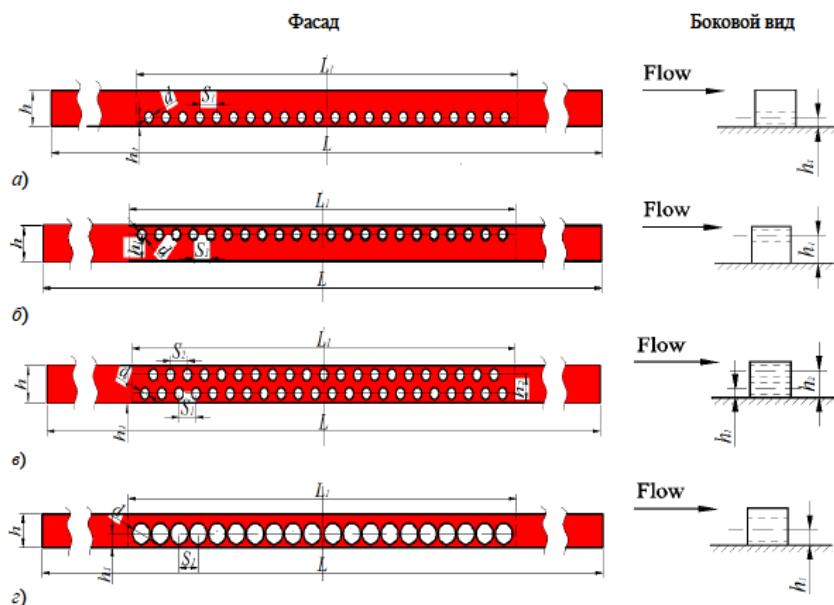


Рис. 19. Схема перфорированного выступа на пластине: выступ с перфорацией внизу (а), выступ с перфорацией сверху (б), выступ с шахматно расположенной перфорацией (в), выступ с перфорацией внизу диаметром  $d = 2$  мм (г)

средних, пульсационных, динамических и тепловых характеристик отрывного течения при обтекании одиночного прямоугольного перфорированного выступа в турбулентном пограничном слое, формирующемся при обтекании потоком воздуха поверхности плоской пластины, обогреваемой при  $q_{ст} = \text{const}$ . Рассмотрены перфорированные выступы с отверстиями различной пористостью ( $\beta$ ), разных диаметров ( $d$ ) и их различным расположением (Рис. 19 и Таблица 1).

Таблица 1.

Размеры экспериментально исследуемых выступов

Вариант	Расположение отверстий	Высота высту- па $h$ (mm)	Параметры отверстий					
			$h_1$ (mm)	$h_2$ (mm)	$S_1$ (mm)	$S_2$ (mm)	$d$ (mm)	$\beta$ , %
$a$	Нижнее	3,2	0,8	0	2	0	1.0	12
$b$	Верхнее	3,2	2,4	0	2	0	1.0	12
$c$	Шахматное	3,2	0,8	2,4	2	2	1,0	23,5
$d$	Нижнее	3,2	1,3	0	2,2	0	2.0	44

Приведенные значения локальных коэффициентов трения (Рис. 20, а) и теплоотдачи (Рис. 20, б) при турбулентном обтекании пластины с перфорированными выступами демонстрируют, что случаи а, в и г с точки зрения интенсификации теплоотдачи более предпочтительны.

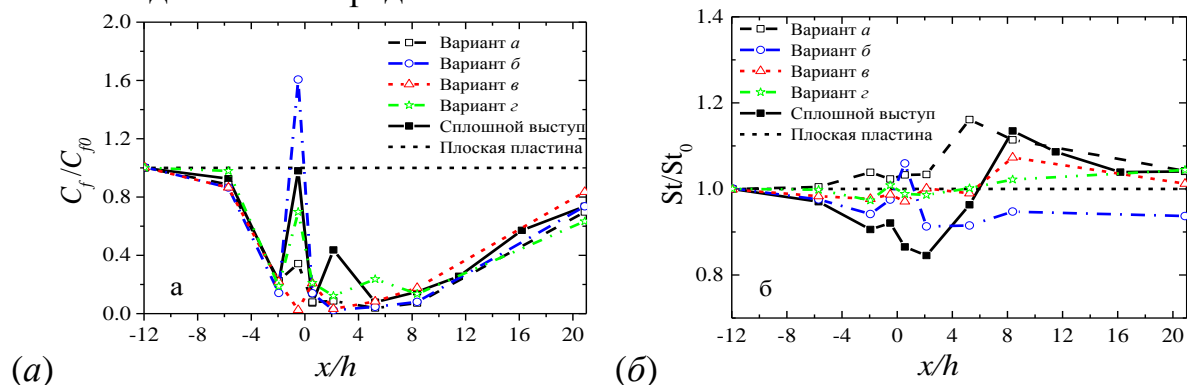


Рис. 20. Локальные относительные коэффициенты трения (а), теплоотдачи (б) на поверхности пластины с перфорированными выступами

## Основные выводы

1. Впервые получены новые экспериментальные данные по средним и пульсационным характеристикам в турбулентном пограничном слое при обтекании прямоугольных выступов (размером  $y^+ \approx 100$ ) без и со скруглением углов, расположенных на плоской пластине, обогреваемой по закону  $q_{\text{ст}} = \text{const}$ . Характер изменения коэффициентов трения и теплоотдачи указывает на опережающий рост коэффициента теплоотдачи за выступом.
2. Проведены верификационные расчеты по моделям турбулентности: линейные (SKE-KL, RKE, AKN,  $v^2$ -f, ASM-BL) и нелинейные (SZL, LRN-SSG, EM, CLS, LRN-LCL) модели вихревой вязкости, а также дифференциальная модель (LRN-GL). Показано, что LRN-LCL и LRN-GL модели турбулентности предпочтительны при определении характеристик потока в непосредственной близости к стенке, а также в тех случаях, когда следует учитывать анизотропию турбулентности.
3. Проведены верификационные расчеты по моделям для турбулентных тепловых потоков: модели с нулевым уравнением, и сложным моделям (двухпараметрические диссипативные модели (AKN, SSZ, BCD) и явные алгебраические модели (RS, LRN-YSC, MAS), а также дифференциальная модель (SL)). Показано, что модель с нулевым уравнением не может дать точный прогноз для поля температуры в отрывной зоне. Более точного прогноза для поля температуры и распределения коэффициента теплоотдачи можно добиться при использовании сложных моделей.
4. Впервые получены базы экспериментальных данных по средним и пульсационным характеристикам скорости и температуры в сечениях турбулентного пограничного слоя при обтекании щелевых прямоугольных выступов. Показано, что перед щелевым выступом не образуется вихревых и отрывных зон. Установлено, что за выступом с конфузорной щелью рециркуляционная зона отсутствует, а за выступом со щелью постоянного сечения и диффузорной щелью она существенно меньше ( $x/h < 2,5$  и  $5$  соответственно), чем за сплошным выступом ( $x/h \approx 8$ ).
5. Проведено детальное численное исследование влияния формы и размеров щели на структуру течения и теплообмен на поверхности теплообмена с помощью модели турбулентности SKE-KL. Показано, что формирующаяся в щели пристеночная струя значительно влияет на структуру отрывного течения за выступом. Уровень кинетической энергии снижается за счет разрушения рециркуляционной зоны. Обнаружено, что выступы с конфузорной щелью значительно улучшают интенсивность теплоотдачи непосредственно за выступом по сравнению со сплошным выступом. Из всех рассмотренных случаев выступ с конфузорной щелью имеет максимальный параметр теплогидравлической эффективности – на 15% выше по сравнению со сплошным выступом.
6. Впервые получены новые экспериментальные данные по средним и пульсационным характеристикам в турбулентном пограничном слое при обтекании прямоугольных перфорированных выступов. Показано, что структура вих-



ревых зон до и после перфорированного выступа существенно зависит от расположения, диаметра отверстий (перфораций) и пористости выступа. Установлено, что струйные потоки, падающие на поверхность теплообмена из перфорированных выступов в случае перфорации внизу, смещают точку присоединения вниз по потоку по сравнению со сплошным выступом. При определенной пористости выступа рециркуляционная область и точка присоединения основного потока к стенке вообще исчезают.

7. Струйные потоки, падающие на поверхность теплообмена, из перфорированного выступа значительно улучшают теплообмен сразу после выступа, по сравнению со сплошным выступом. В случае использования перфорированных выступов для интенсификации теплообмена, необходимо использовать неоднородную перфорацию – чем ближе к поверхности теплообмена, тем больше диаметр перфорированных отверстий.

### **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Афанасьев В.Н., Кон Дехай. Гидродинамика и теплообмен при обтекании прямоугольных выступов на исходно гладкой поверхности // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2017. № 4. С. 69–96. DOI: 10.7463/0417.0000932 (1,75 п.л./0,88 п.л.).
2. Афанасьев В.Н., Трифонов В.Л., Гетья С.И., Кон Дехай. Выступ в турбулентном пограничном слое // Машиностроение и Компьютерные Технологии. 2017. № 10. С. 13–35. DOI: 10.24108/1017.0001312 (1,44 п.л./0,36 п.л.).
3. Afanasiev V.N., Kong D.H. Rectangular ribs in turbulent boundary layer on the initially // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 891. № 012140. DOI: 10.1088/1742-6596/891/1/012140 (0,65 п.л./0,32 п.л.).
4. Афанасьев В.Н., Егоров К.С., Кон Дехай. Верификация моделей турбулентности при анализе структуры турбулентного пограничного слоя около прямоугольного выступа на пластине // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2018. № 6. С. 72–89. (1,13 п.л./0,38 п.л.).
5. Афанасьев В.Н., Кон Дехай. Численное исследование гидродинамики и теплообмена при обтекании прямоугольного выступа с использованием нелинейной k-ε модели турбулентности // Сборник трудов Седьмой Российской национальной конференции по теплообмену (РНКТ-7). Москва. 22-26 октября 2018 г. С. 304–308. (0,32 п.л./0,16 п.л.).
6. Afanasiev V.N., Kong D.H. Rectangular permeable ribs in turbulent boundary layer // Proc. of the 16th Int. Heat Transfer Conf. (IHTC16). Beijing, China. 10-15 August, 2018. P. 5057–5064. (0,65 п.л./0,32 п.л.).
7. Афанасьев В.Н., Кон Дехай, Егоров К.С. Верификация моделей для турбулентных тепловых потоков при обтекании прямоугольного выступа на пластине // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2019. № 1. С. 58–71. (0,88 п.л./0,29 п.л.).