



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

На правах рукописи

**Шакиров Радиф Рустямович**

**Процессы переноса в динамически неравновесных градиентных  
течениях в канале**

1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника

**АФТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Казань  
2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук»

**Научный  
руководитель:**

**Михеев Николай Иванович**  
доктор технических наук, профессор

**Официальные  
оппоненты:**

**Терехов Виктор Иванович**  
доктор технических наук, профессор,  
главный научный сотрудник Лаборатории  
термогазодинамики ФГБУН Институт  
теплофизики им. С.С. Кутателадзе  
Сибирского отделения Российской академии  
наук, г. Новосибирск

**Иванов Николай Георгиевич**  
кандидат физико-математических наук, доцент,  
директор Высшей школы прикладной математики  
и вычислительной физики ФГАОУ ВО «Санкт-  
Петербургский политехнический университет  
Петра Великого», г. Санкт-Петербург

**Ведущая  
организация:**

Федеральное государственное бюджетное образо-  
вательное учреждение высшего образования  
«**Московский государственный университет  
им. М.В. Ломоносова**», г. Москва

Защита состоится «21» июня 2024 г. в 11 час. 00 мин. 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, ул. Политехническая, 29, 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 «\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г

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



Сероштанов В.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Изучение процессов передачи импульса и теплоты в сложных течениях является актуальным направлением исследований для современной теплофизики. К числу сложных течений, представляющих практический интерес для авиационной техники и энергетики, относятся градиентные течения в каналах.

Воздействие продольного градиента давления на пограничный слой, как правило, приводит к возникновению динамической неравновесности течения. Концепция динамического равновесия пограничного слоя была введена в работе Клаузера (1954 г.), а критерии равновесия были определены теоретически и подтверждены экспериментально. Было установлено, что в динамически равновесном пограничном слое изменение интегральных толщин и трения мгновенно следуют за изменением давления. Согласно строгому определению Таунсенда (1956 г.), признаком динамической равновесности пограничного слоя являются автомодельные профили скоростей и тензора пульсационных напряжений. Один из наиболее изученных примеров таких течений – обтекание тонкой пластины безградиентным потоком.

Динамическая неравновесность в турбулентном пограничном слое характеризуется нарушением локального равновесия между генерацией и диссипацией кинетической энергии турбулентности. Процессы переноса турбулентности диффузией и конвекцией значительно затрудняют прогнозирование пограничного слоя и определение интегральных характеристик течения (теплоотдача, гидравлическое сопротивление). Исследования в этой области имеют не только фундаментальное значение, но и многочисленные инженерные приложения в энергетике и машиностроении при решении задач энерго- и ресурсосбережения в современных энергоустановках. Исследования градиентных течений направлены на решение ряда практических задач, связанных с управлением пограничным слоем и турбулентностью. Основные усилия данной работы направлены на получение новой экспериментальной информации о процессах переноса в градиентных течениях в диффузорных и конфузорных каналах.

**Степень разработанности научной проблемы.** Теория пограничного слоя дает хорошее описание физических процессов, происходящих на границе двух сред, и на практике она успешно применяется во многих областях, связанных с теплообменом и гидродинамикой. Однако при значительном воздействии градиента давления теоретические исследования и прогнозы становятся существенно сложнее. Сильный положительный градиент давления может привести к полному отрыву пограничного слоя от стенки, а отрицательный градиент давления, напротив, стабилизирует поток. Исследования показывают, что темпы снижения трения в диффузорах могут превышать темп снижения теплоотдачи. Это объясняется увеличением степени турбулентности потока при положительном градиенте давления. Кроме того, в профилях продольных пульсаций скорости потока, изменяющихся вдоль поверхности

стенки, могут наблюдаться два максимума турбулентности. Причина возникновения второго максимума доподлинно неизвестна. Отрицательный градиент давления замедляет переход потока из ламинарного в турбулентный режим течения. Воздействие отрицательного градиента давления на турбулентный пограничный слой способствует снижению уровня турбулентности и может привести к полной реламинаризации потока.

Основным источником информации о турбулентности в динамически неравновесных течениях остается эксперимент. На замену точечным методам регистрации пульсаций скорости потока пришли современные полевые оптические методы изучения структуры потока. За последние десятилетия именно оптические методы стали основным инструментом для исследования турбулентности.

Массовое применение численного решения уравнений Навье-Стокса (DNS) для моделирования гидродинамических процессов ограничивается ресурсами современных вычислительных устройств. Использование методов расчета, основанных на осредненных по Рейнольдсу уравнениях Навье-Стокса (RANS), способствует существенному сокращению необходимых для вычислений ресурсов, однако используемые в RANS методах полуэмпирические модели турбулентности не универсальны и малопригодны для фундаментальных исследований сложных течений.

**Цель исследования:** разработка методов прогнозирования теплоотдачи и турбулентности в динамически неравновесных градиентных течениях на основе экспериментальных исследований.

Для этого были поставлены следующие задачи:

- 1) Разработать эффективный метод измерения распределения локальной теплоотдачи на плоской стенке в градиентном канальном течении;
- 2) Экспериментально исследовать закономерности формирования пограничного слоя и турбулентности в неравновесных по Клаузеру градиентных течениях при помощи оптического метода;
- 3) Экспериментально исследовать конвективную теплоотдачу в плоских расширяющихся и сужающихся каналах.

**Научная и практическая новизна:**

- предложен новый метод измерения распределения локальной теплоотдачи на стенке в потоке;
- выявлены закономерности формирования поля кинетической энергии турбулентности в неравновесных по Клаузеру градиентных течениях, реализуемых в асимметричных плоских диффузорных и конфузорных каналах;
- предложены новые критериальные соотношения по теплоотдаче в расширяющихся плоских каналах для ламинарного и турбулентного течения, справедливые в широких диапазонах чисел Рейнольдса и параметра ускорения Кейса;
- выявлены закономерности, связывающие локальную теплоотдачу в динамически неравновесных градиентных течениях, с локальными касательными напряжениями Рейнольдса в пристеночной области.

**Методы исследования.** Исследования динамически неравновесных течений были проведены на современной аэродинамической установке с высокоточным дозированием рабочего тела (воздуха). Для изучения структуры потока были использованы методы термоанемометрии и новый оптический метод SIV (Smoke Image Velocimetry), основанный на исследованиях Н.И. Михеева и Н.С. Душина. Результаты исследований этих специалистов, а также И.А. Давлетшина и А.А. Паерелия послужили основой для разработки нового метода измерения распределения коэффициента теплоотдачи.

В процессе проведения исследования автор опирался на существующие литературные источники, научные статьи, монографии и доклады отечественных и зарубежных ученых в области проблем механики жидкости и газа, теплообмена и теплотехники.

**Обоснованность и достоверность результатов исследования:**

- научно-техническая база экспериментальной лаборатории полностью соответствует поставленным задачам и целям;
- методы исследований были многократно апробированы, а также был проведен тщательный анализ неопределенностей измерений при получении экспериментальных данных;
- в экспериментах были использованы точные и высокотехнологичные средства для обработки и регистрации сигналов;
- результаты исследований были опубликованы в ведущих научных изданиях и обсуждены на конференциях и семинарах.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

- 1) Результаты экспериментального исследования структуры потока в плоских расширяющихся и сужающихся каналах, включающие распределения осредненных параметров скорости потока, характеристик турбулентности и оценку величин, входящих в уравнение баланса кинетической энергии турбулентности;
- 2) Результаты экспериментального исследования закономерностей развития теплоотдачи на стенке для градиентных течений и новые критериальные соотношения, которые позволяют определить распределения теплоотдачи на стенке плоских диффузоров и конфузоров для различных режимов течения в канале;
- 3) Новый метод измерения локального коэффициента теплоотдачи на стенке.

**Теоретическая и практическая значимость исследований.** Научная значимость проведенных исследований заключается в целостном анализе, численном описании и обобщении закономерностей процессов турбулентного переноса импульса и тепла в динамически неравновесных градиентных течениях. Полученные результаты нацелены на решение фундаментальной задачи прогнозирования характеристик турбулентности в сложных течениях и разработку методов управления неравновесностью потока для целенаправленного изменения интенсивности процессов турбулентного переноса. Полученные

результаты направлены на развитие инженерных наук в целом и расширения существующих знаний в области теплофизики и гидродинамики.

**Апробация полученных результатов.** Основные результаты исследования были представлены и обсуждались на XI Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» (г. Казань, 2016); X школе-семинаре молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова «Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении» (г. Казань, 2016); Международной молодежной научной конференция «XXIII Туполевские чтения (школа молодых ученых)» (г. Казань, 2017); XXII Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках» (г. Москва, 2019); XXIII Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках» (г. Екатеринбург, 2021); VII Всероссийской конференции «Теплофизика и физическая гидродинамика» (ТФГ, 2022) и научной молодёжной школе «Теплофизика и физическая гидродинамика: современные вызовы» (ТФГСВ, 2022) (г. Сочи, 2022); Восьмой Российской Национальной конференции по теплообмену (РНКТ-8) (г. Москва, 2022); XXIV Школе-семинаре молодых ученых и специалистов имени академика РАН А.И. Леонтьева, посвященной 100-летию академика В.Е. Алемасова «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках» (г. Казань, 2023).

**Личный вклад автора.** Представленные в диссертации исследования проведены автором под научным руководством проф. д.т.н. Михеева Н.И. Личный вклад автора диссертационной работы заключался:

- в подготовке экспериментально-технической части в соответствии с планом экспериментов;
- в планировании и проведении опытов, сборе результатов и последующей обработке экспериментальных данных;
- в сборе, обработке, анализе и систематизации научно-технической информации, отечественного и зарубежного опыта по направлению исследований.

**Соответствие паспорту специальности.** Содержание работы соответствует паспорту научной специальности 1.3.14. «Теплофизика и теоретическая теплотехника» по следующим пунктам:

- п. 5 – Экспериментальные и теоретические исследования однофазной, свободной и вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических параметров теплопередающих поверхностей.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка литературы, содержащего 198 источников. Работа изложена на 140 страницах и включает 39 рисунков и 2 таблицы.

**Публикации по результатам исследований.** Результаты работы были представлены в общей сложности в 10 публикациях, среди которых 7 статей включены в базу данных WOS/Scopus, 3 статьи опубликованы в изданиях, включенных в перечень изданий ВАК.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, охарактеризована научная новизна и практическая значимость работы.

**В первой главе** выполнен анализ актуальных теоретических и прикладных аспектов гидродинамики и уделено особое внимание градиентным течениям. Представлены основы теории движения жидкости в пограничном слое, а также выполнен обзор литературных источников. Обзор посвящен теплообмену и гидродинамике в равновесном и неравновесном пограничном слое в условиях продольного градиента давления. Исследования на тему неравновесных градиентных течений представлены в работах многих отечественных и зарубежных авторов, включая Кутателадзе С.С, Леонтьева А.И, Романенко П.Н., Лапина Ю.В., Лущика В.Г., Терехова В.И., Дейча М.Е., Волчкова Е.П., Кейса В.М., Азада Р.С., Крогстада П.А., Нагано И, Ван Дрифта Е.Р., Шлаттера П. и др. Двумерные равновесные градиентные течения рассматривались в работах Клаузера Ф.Х, Брэдшоу П., Таунсенда А.А., Меллора Г.Л., Скааре П.Е, Херринга Ж.Ф., Со Р.М.С, Вигдоровича И.И., Кициоса В, Бобке А. и др. Также в первую главу включен обзор существующих методов исследования гидродинамики и теплообмена. Описаны современные подходы вычислительной гидродинамики, отмечены их недостатки и преимущества. Изложены принципы работы термоанемометрических датчиков и современных бесконтактных методов измерения турбулентных характеристик, в том числе метод SIV (Smoke Image Velocimetry, Михеев Н.И. и Душин Н.С., см. Рисунок 1).

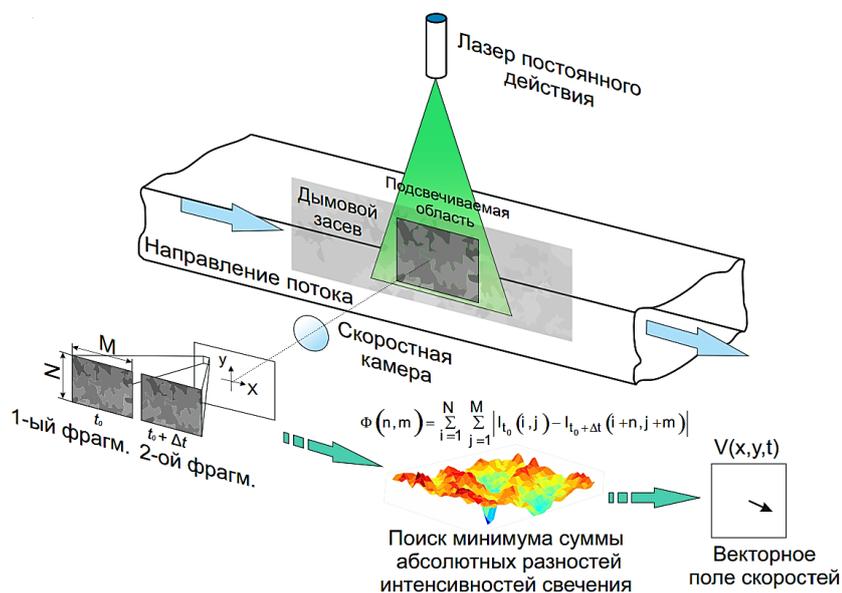


Рисунок 1 – Принцип работы метода SIV

Метод SIV позволяет отслеживать вихревые структуры в потоке и исследовать мелкомасштабную турбулентность. Метод основан на цифровой обработке фрагментов дымовой визуализации потока, полученной с использованием высокоскоростной видеосъемки. Принцип работы метода SIV показан на схеме, представленной на Рисунке 1. Используя метод SIV, удалось получить значительный объем экспериментальных данных о кинематической структуре потока в неравновесных градиентных течениях и более глубоко понять процессы, происходящие в диффузно-конфузорных каналах.

**Во второй главе** описан новый метод измерения распределения коэффициента теплоотдачи. Метод основан на применении печатных плат с чувствительными элементами в виде медных дорожек, нанесенных поперек потока (см. Рисунок 2). Каждая дорожка на теплообменной стенке одновременно выполняет функцию электрического нагревателя и измерителя локальной температуры стенки.

В общем виде плата является набором термометров сопротивления. Равномерное и плотное расположение дорожек и нагрев стенки электрическим током постоянной мощности обеспечивает теплообмен с постоянством плотности теплового потока  $q_w = \text{const}$  (граничное условия II рода).

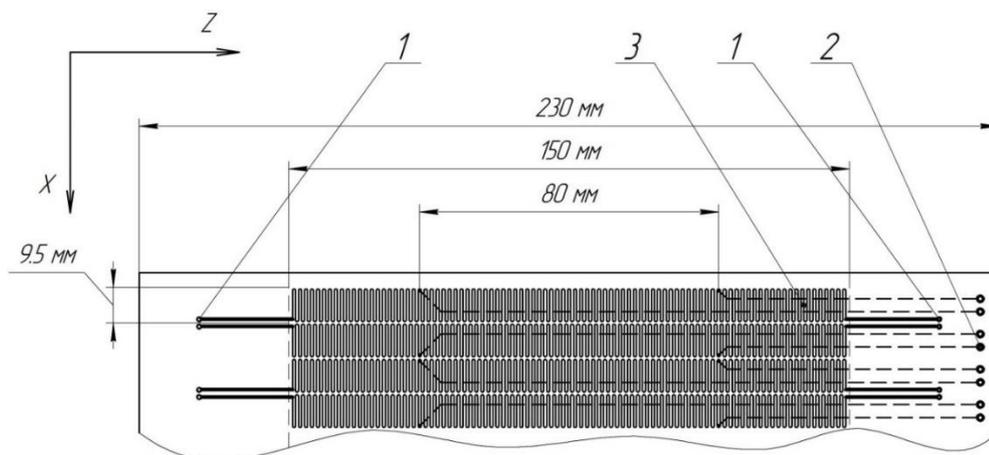


Рисунок 2 – Измерительная плата: 1 - токовые выводы; 2 – отводы для измерений напряжения; 3 - медная дорожка

На Рисунке 3, а) представлена общая схема электрической цепи, состоящая из  $n$  блоков с подключенными дорожками  $R_i$  и термометром сопротивления  $R_{TF}$  для определения температуры теплоносителя. Высокая точность измерения силы тока в цепях обеспечивалась с использованием прецизионных резисторов с известным сопротивлением  $R_0$  и  $R_{i0}$ .

Коэффициент локальной теплоотдачи на  $i$ -ом элементе поверхности (дорожке) теплообмена определялся из следующего соотношения:

$$\alpha_i = \frac{q_i}{\Delta T_i} = \frac{U_{Ri} \cdot U_{R0} - (Q_{ti} + Q_{ri} + Q_{zi} + Q_{xi})}{R_0 \cdot F \cdot \Delta T_i}, \quad (1)$$

где  $q_{wi}$  – плотность конвективного теплового потока от  $i$ -го участка стенки;  $U_{R0}$  – падение напряжения эталонного резистора;  $U_{Ri}$  – падение напряжения на  $i$ -том измерительном участке платы;  $F$  – площадь участков теплообменной поверхности равная  $80 \times 9.5 \text{ мм}^2$  (измерения проводились в центральной части дорожки);  $\Delta T_i = (T_i - T_{fi})$  – разность температур  $i$ -го измерительного участка стенки и потока.  $Q_{ti}$ ,  $Q_{ri}$ ,  $Q_{zi}$ ,  $Q_{xi}$  – утечки теплоты через теплоизоляцию для  $i$ -го элемента, радиационное излучение от платы к холодным стенкам, теплопроводный отток тепла от границы участка в сторону соседних участков и боковых стенок (см Рисунок 3, б)).

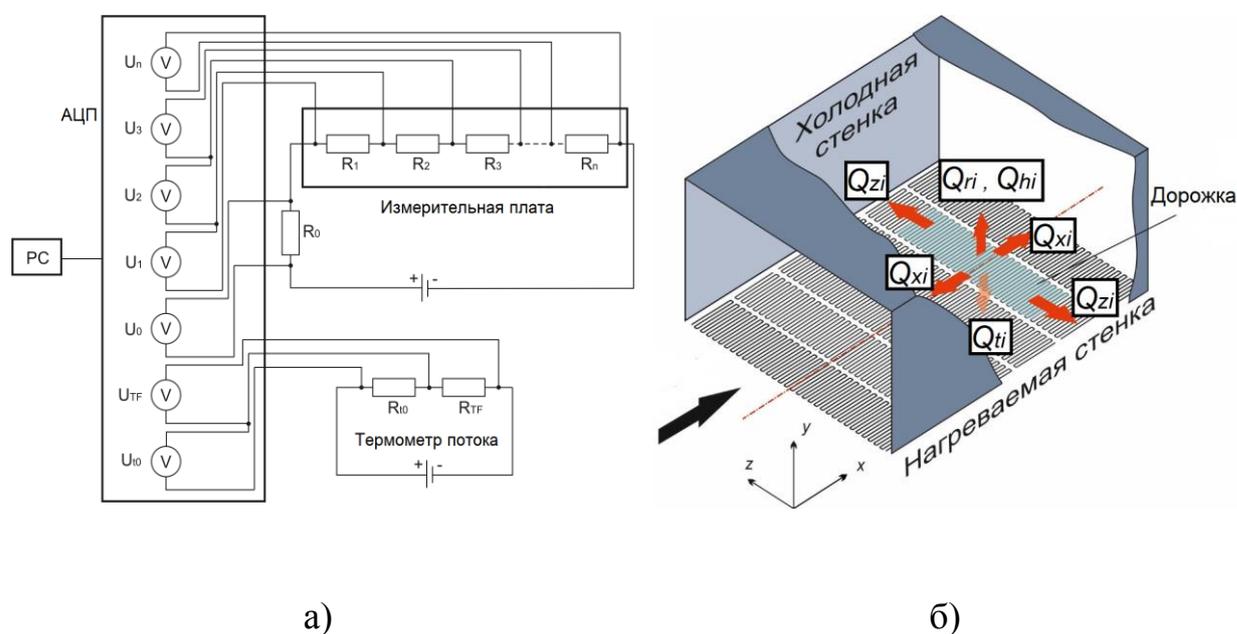


Рисунок 3 – Схема участка: а) электрической цепи; б) стенки и тепловых потоков

Для определения локального коэффициента теплоотдачи по соотношению (1) наряду с тепловым потоком и температурой стенки требуются значения температуры потока  $T_{fi}$ . Определение  $T_{fi}$  удобнее проводить на основе измерения температуры потока на входе в канал и расчета прироста температуры по уравнению теплового баланса. Температура элементов стенки (дорожек)  $T_i$  определялась на основе температурной зависимости электрических сопротивлений проводников:

$$R_i = R_{0i} \cdot (1 + \alpha_T \cdot (T_{wi} - T_{0i})). \quad (2)$$

Сопротивления дорожек  $R_{0i}$  при температуре  $T_{0i}$  и температурный коэффициент сопротивления материала  $\alpha_T$  уточнялись экспериментально. Полученные

температурные коэффициенты оказались близкими к справочному значению для меди в рассматриваемых температурных диапазонах  $\alpha_T = 0,00421 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ .

Важной характеристикой любого метода измерения является предел неопределенности результата измерений. Бюджет неопределенности результатов измерений, в нашем случае, складывается из неопределенностей измерения электрических параметров в цепи и оценки тепловых потерь, вызванных утечкой через конструкционные элементы и неизолированные участки платы. Предварительная калибровка элементов платы и использование измерителей высокого класса точности позволили достичь неопределенности измерений коэффициента теплоотдачи не более 5% в диапазоне температурных напоров между стенкой и потоком теплоносителя  $(20-70)^\circ\text{C}$ . Соответствие заявленным характеристикам метода подтверждают проведенные тестовые и методические эксперименты с вынужденной конвекцией в ламинарных и турбулентных течениях в каналах. Отклонения результатов от известных критериальных соотношений не превысили 5%. Предложенный метод эффективен при проведении тепловых исследований по определению распределений коэффициента теплоотдачи в потоках газа на плоских стенках.

**В третьей главе** представлены основные результаты исследований локального теплообмена и кинематической структуры потока и турбулентности в пограничном слое при изменении градиента давления вдоль направления потока. Также дано описание экспериментальной установки и постановка полной задачи.

Для исследования механизмов переноса импульса и теплоты в градиентном потоке были проведены оптические исследования кинематической структуры потока и теплообмена на стенке. В экспериментах использовались асимметричные плоские каналы с постоянным углом сужения и расширения  $\phi$ . Размеры канала были следующими: ширина  $B = 150$  мм и длина  $L = 1800$  мм. На входе канала высотой  $H_0$  было установлено входное спрямляющее устройство 1, выполненное по лемнискате Бернулли. Плавный вход обеспечивал равномерное распределение скоростей на входе в канал со степенью турбулентности, не превышающей 2% от скорости набегающего потока. Общая схема аэродинамической установки представлена на Рисунке 4. Для обеспечения высокой точности и воспроизводимости объемного расхода воздуха использовались критические сопла 6 с пределом неопределенности расхода 0,25%, управляемые задвижками 5. Рабочий участок подключался к всасывающей линии компрессора 7, обеспечивающий критический режим истечения воздуха через сопла. В ходе экспериментов менялись геометрические конфигурации каналов и расходы рабочей среды, что позволяло получать различные распределения давлений в канале (см. Рисунок 5). Постановка задачи предусматривала изменение значения параметра Клаузера  $\beta$  в направлении потока, однако параметр ускорения Кейса оставался постоянным на всей длине канала:  $K = (v/U^2) \cdot dU / dx$ . Все режимные параметры потока и геометрические размеры канала приведены в Таблице 1. При выборе предельных углов расширения для диффузоров

учитывалось условие отсутствия отрывных явлений на стенках канала. При наибольшем угле раскрытия диффузора  $\varphi = 5,3^{\circ}$  длина рабочей части канала составляла 900 мм.

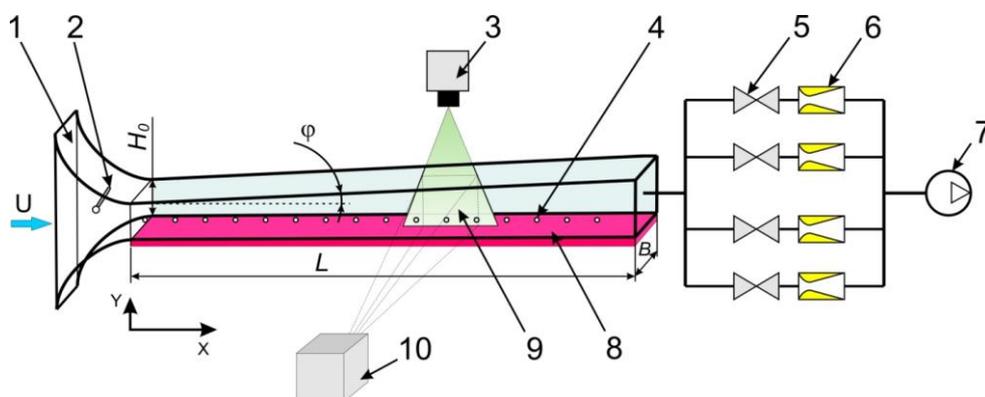


Рисунок 4 – Экспериментальная установка: 1 – входное устройство; 2 – термометр; 3 – лазер; 4 – штуцеры отбора давления; 5 – краны; 6 – сопла; 7 – турбокомпрессор; 8 – теплообменная стенка; 9 – область измерений полей скорости потока; 10 – скоростная видеокамера

Таблица 1. Режимные параметры экспериментов

Угол	Высота канала на входе	Расход воздуха	Скорость на входе	Число Рейнольдса на входе	Параметр ускорения Кейса
$\varphi, ^{\circ}$	$H_0, \text{мм}$	$Q, \text{м}^3/\text{ч}$	$U_0, \text{м/с}$	$Re_0 = U_0 H_0 / \nu$	$K = -\text{tg}\varphi / Re_0$
Диффузоры					
0,38	28	64–356	4,2–24	$(0,79–4,4) \cdot 10^4$	$-(8,4–1,5) \cdot 10^{-7}$
0,85					$-(1,9 \cdot 10^{-6} - 3,4 \cdot 10^{-7})$
1,5					$-(3,3 \cdot 10^{-6} - 6 \cdot 10^{-7})$
2,5	20		5,9–33		$-(5,5 \cdot 10^{-6} - 9,9 \cdot 10^{-7})$
	28		4,2–24		
	40		3–16,5		
5,3	28	4,2–24	$-(1,2 \cdot 10^{-5} - 2,1 \cdot 10^{-6})$		
Конфузоры					
-0,38	40	64–356	3–16,5	$(0,79–4,4) \cdot 10^4$	$(1,5–8,4) \cdot 10^{-7}$
-2,5	105		1,1–6,3		$9,9 \cdot 10^{-7} - 5,5 \cdot 10^{-6}$

На основе измерений перепада давления определялся характер изменения продольного градиента давления. Было установлено, что диффузор

с углом раскрытия  $\varphi = 0.38^\circ$  обеспечивает условия, при которых потери на трение о стенки канала компенсируются давлением, восстановленным вследствие торможения потока. Для данной конфигурации на большей протяженности канала поток можно рассматривать как безградиентный  $dP/dx \approx 0$  и динамически равновесный  $\beta \approx \text{const} \approx 0$ . Однако для всех остальных конфигураций каналов течения считались градиентными, а на стенках формировался динамически неравновесный пограничный слой. Диффузоры (см. Рисунок 5, а)) с большими углами раскрытия показывают характерное восстановление (рост) статического давления, в то время как в конфузорах (см. Рисунок 5, б)), включая канал постоянного сечения с оценкой градиента давления по формуле Дарси-Вейсбаха наблюдается снижение давления в направлении потока.

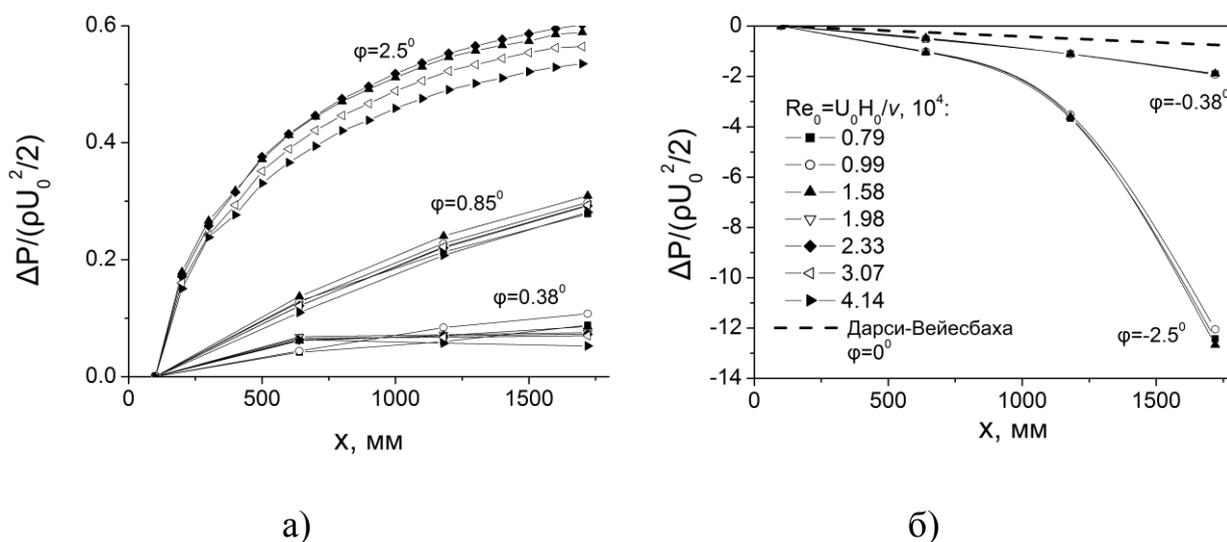


Рисунок 5 – Распределения давления в каналах: а) диффузорном; б) конфузорном

Анализ теплоотдачи на стенке диффузоров показал, что результаты измерений можно обобщить, рассматривая их по аналогии с теплообменом при безнапорном обтекании плоской пластины, не учитывая каналный характер течения. В результате этого обобщения были представлены зависимости числа Стэнтона  $St = \alpha / (\rho \cdot c_p \cdot U_0)$  от числа Рейнольдса  $Re = U_0 \cdot x / \nu$ , где  $\rho$  – плотность,  $c_p$  – изобарная теплоемкость и  $\nu$  – кинематическая вязкость жидкости. При этом в качестве величины скорости использовалось ее значение на входе в канал  $U_0$ . Такое представление позволило получить хорошее соответствие результатов теплообмена на стенке безградиентного диффузора  $\varphi = 0,38^\circ$  и известных критериальных соотношений, справедливых для плоской пластины на ламинарном:

$$St = 0,453 \cdot Re^{-0,5} \cdot Pr^{-0,67}, \quad (3)$$

и турбулентном режимах течений при  $q_w = \text{const}$ :

$$\text{St} = 0,0308 \cdot \text{Re}^{-0,2} \cdot \text{Pr}^{-0,6}. \quad (4)$$

Комплексное исследование теплообмена в различных расширяющихся конфигурациях каналов (см. Рисунок 6), представленных в Таблице 1, позволило выявить закономерности теплоотдачи на стенке, связанные с величиной параметра ускорения Кейса  $K = -\text{tg}\varphi / \text{Re}_0$ .

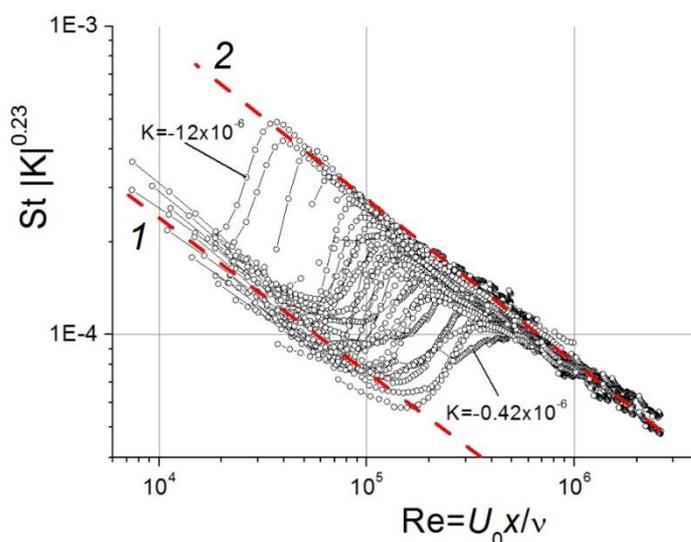


Рисунок 6 – Распределения коэффициента теплоотдачи на стенках плоских диффузоров с линиями: 1 – по соотношению (5); 2 – по соотношению (6)

В результате обобщения были получены новые закономерности, и новые критериальные соотношения, описывающие конвективный теплообмен в ламинарном и турбулентном пограничном слое на стенке плоских диффузоров:

$$\text{St} = 0,019 \cdot \text{Re}^{-0,5} \cdot |\text{K}|^{-0,23} \cdot \text{Pr}^{-0,67}, \quad (5)$$

$$\text{St} = 0,1 \cdot \text{Re}^{-0,53} \cdot |\text{K}|^{-0,23} \cdot \text{Pr}^{-0,6}. \quad (6)$$

Критериальное соотношение (3) обобщает экспериментальные данные по теплоотдаче на участке с ламинарным течением при значениях параметра ускорения Кейса  $|\text{K}| = (0,16 - 12) \cdot 10^{-6}$ . Соотношение (4) применимо для турбулентного режима при  $|\text{K}| = (0,3 - 12) \cdot 10^{-6}$ . Максимальное отклонение экспериментальных точек по теплообмену для установившегося турбулентного пограничного слоя от предложенной зависимости (4) не превышает 15%. При меньших абсолютных значениях параметра ускорения Кейса  $|\text{K}| = (0 - 0,42) \cdot 10^{-6}$  рекомендуется воспользоваться соотношением (2). Следует отметить, что в работе влияние числа Прандтля  $\text{Pr}$  на теплообмен не

исследовалось. При анализе использовались аналогичные зависимости  $St \sim Pr^{0.67}$  и  $St \sim Pr^{-0.6}$  для ламинарного и турбулентного пограничных слоев при безградиентном обтекании пластины (1) и (2) соответственно.

Положение ламинарно-турбулентного перехода на графиках также имеет тесную связь с градиентом давления. С его увеличением точка ламинарно-турбулентного перехода закономерно смещалась вверх по потоку, приближаясь к входному сечению канала. На основе экспериментальных данных выявлена связь критического значения числа Рейнольдса  $Re_{cr}$  и параметра ускорения Кейса  $K$  (см. Рисунок 7) в виде степенной зависимости:

$$Re_{cr} = 100 \cdot |K|^{-0.5}. \quad (7)$$

Данное соотношение справедливо для координаты  $x_{cr}$ , которая определена для сечения с наибольшей теплоотдачей на начальном турбулентном участке в диапазоне  $|K| = (0,3 - 12) \cdot 10^{-6}$ .

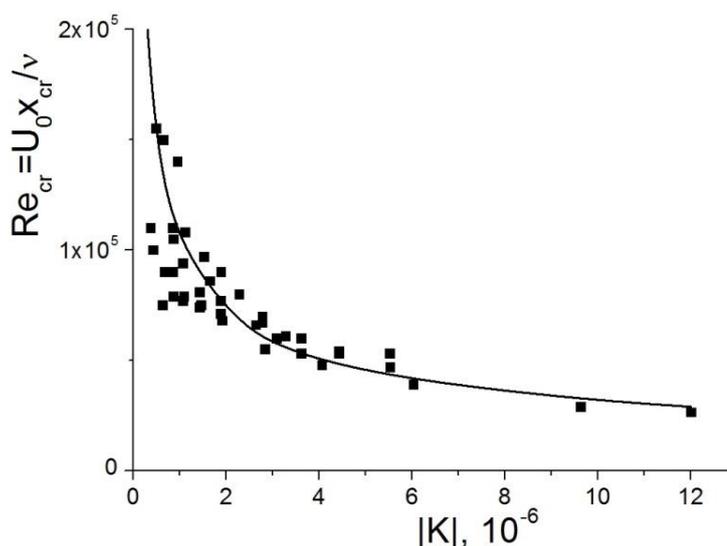


Рисунок 7 – Критическое число Рейнольдса в диффузорах

В рамках исследования теплообмена в неравновесных градиентных течениях были также проведены аналогичные эксперименты в конфузорах. На Рисунок 8 представлены данные по теплоотдаче в конфузоре с углом сужения  $\varphi = -2,5^\circ$ . В отличие от диффузорных каналов, где для описания теплоотдачи в числах Стэнтона и Рейнольдса использовалась входная скорость потока в канал, для конфузора результаты хорошо обобщались только при использовании локальных значений скорости  $U_x$  ( $St_x = \alpha / (\rho \cdot c_p \cdot U_x)$ ,  $Re_x = U_x \cdot x / \nu$ ). В сравнении с диффузорными каналами, для которых характерно немонотонное изменение теплоотдачи в области ламинарно-турбулентного перехода, в конфузорах с увеличением значения Рейнольдса теплообмен приближался к постоянному уровню и переставал изменяться в зависимости от  $Re_x$ . Из представ-

ленных результатов по теплообмену можно сделать вывод, что условия формирования пограничного слоя в конфузорах и диффузорах существенно отличаются. Из-за этих различий нельзя использовать предложенные соотношения (3) и (4) для прогнозирования теплоотдачи в конфузорных каналах.

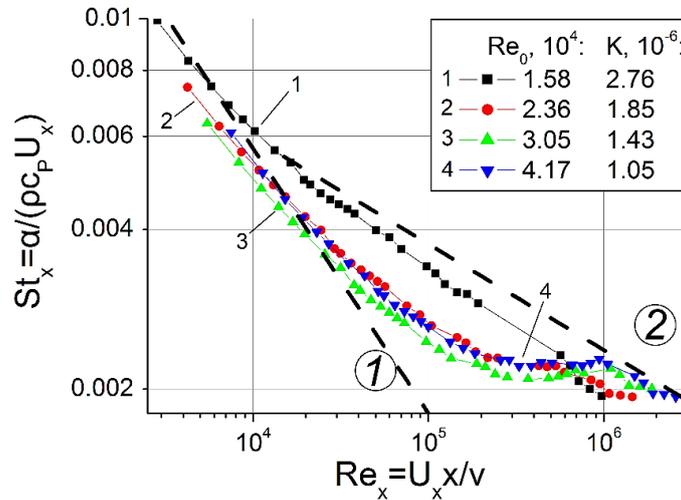
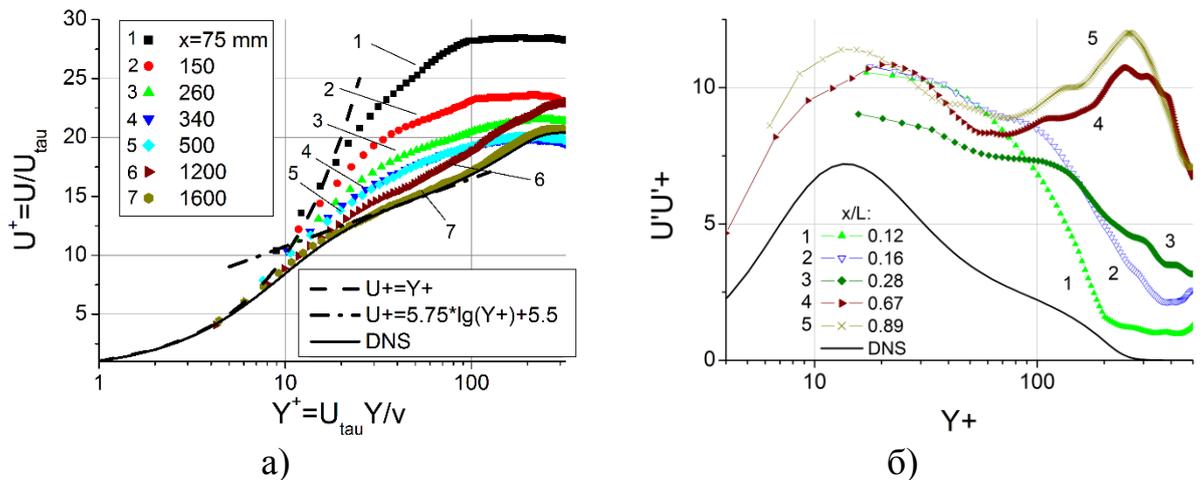


Рисунок 8 – Распределения коэффициента теплоотдачи на стенке плоского диффузора  $\varphi = -2,5^{\circ}$  с линиями: 1 – по соотношению (3); 2 – по соотношению (4).

Для выявления механизмов формирования теплоотдачи в градиентных потоках были проведены оптические измерения кинематической структуры потока методом SIV и исследованы характеристики турбулентности в сужающемся  $\varphi = -2,5^{\circ}$  и расширяющемся  $\varphi = 2,5^{\circ}$  каналах.



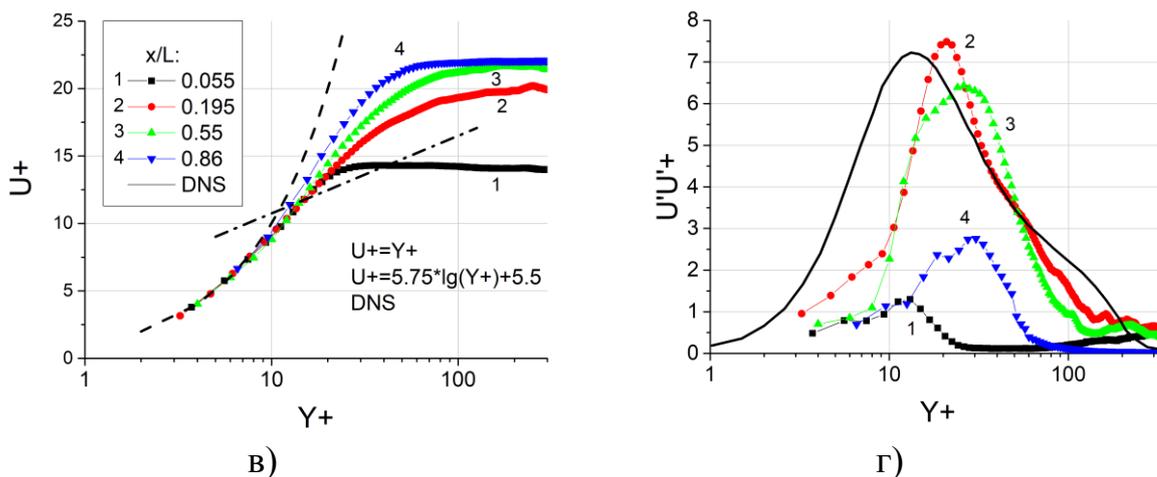


Рисунок 9 – Эволюция характеристик потока: а) продольных скоростей в диффузоре; б) корреляций продольных пульсаций скорости в диффузоре; в) продольных скоростей в конфузоре; г) корреляций продольных пульсаций скорости в конфузоре

Полученные результаты хорошо согласуются с результатами измерений других авторов, исследовавших градиентные течения, и в то же время позволяют выявить ряд новых закономерностей касательно формирования пограничного слоя в течениях с положительным и отрицательным градиентом давления:

1) Хорошо известно, что положительный градиент давления в турбулентном пограничном слое приводит к увеличению степени турбулентности. Рейнольдсовы напряжения в диффузоре (см. Рисунок 9, б))кратно (до 3-х раз) превышали соответствующие значения для безградиентного потока в пограничном слое.

2) В дальних сечениях от входа в диффузор образуется второй максимум продольных пульсаций, расположенный на расстоянии  $Y^+ \approx 300$  от стенки. Этот максимум имел сравнимый с пристеночным максимумом при  $Y^+ = (10 - 20)$  уровень значений. Это означает, что в диффузоре турбулентные явления распространяются на большие расстояния от стенки, чем в безградиентном пограничном слое на пластине.

3) Несмотря на заметные отличия в пульсациях потока, профиль средних продольных скоростей (см. Рисунок 9, а)) по мере развития пограничного слоя становился все более похожим на профиль развитого турбулентного пограничного слоя в канале постоянного сечения.

4) Результаты измерений в конфузоре хорошо согласуются с представлениями о течениях с отрицательным градиентом давления. Профиль скорости в конфузоре (см. Рисунок 9, в)) становился более наполненным.

5) Следствием ламинаризирующего эффекта отрицательного градиента давления на пограничный слой является уменьшение Рейнольдсовых напряжений на стенке конфузора (см. Рисунок 9, г)).

Данное описание указывает на существенные различия в распределении пульсаций и уровнях турбулентности между диффузором и конфуззором. Течение с положительным градиентом давления характеризуется более сложным распределением пульсаций по толщине пограничного слоя по сравнению с безградиентным турбулентным пограничным слоем. Отрицательный градиент давления приводит к уменьшению интенсивности турбулентности и ламинизации потока в пограничном слое конфузора. Профиль скорости в пограничном слое диффузора на дальних его сечениях имел характерное для развитой турбулентности распределение. В конфузоре скорость потока изменялась равномерно без формирования развитой турбулентности. В данном контексте были рассмотрены профили средних скоростей и Рейнольдсовых напряжений в координатах закона стенки, которые были нормированы на динамическую скорость  $U_\tau$  в потоке. Целостная картина формирования кинетической энергии турбулентности представлена в виде поля на Рисунке 10. Здесь величина кинетической энергии турбулентности  $k = (U'U' + V'V') / 2$  нормирована на входную скорость потока  $U_0$ , что позволило сравнить различные участки потока и выявить особенности формирования турбулентности в канале.

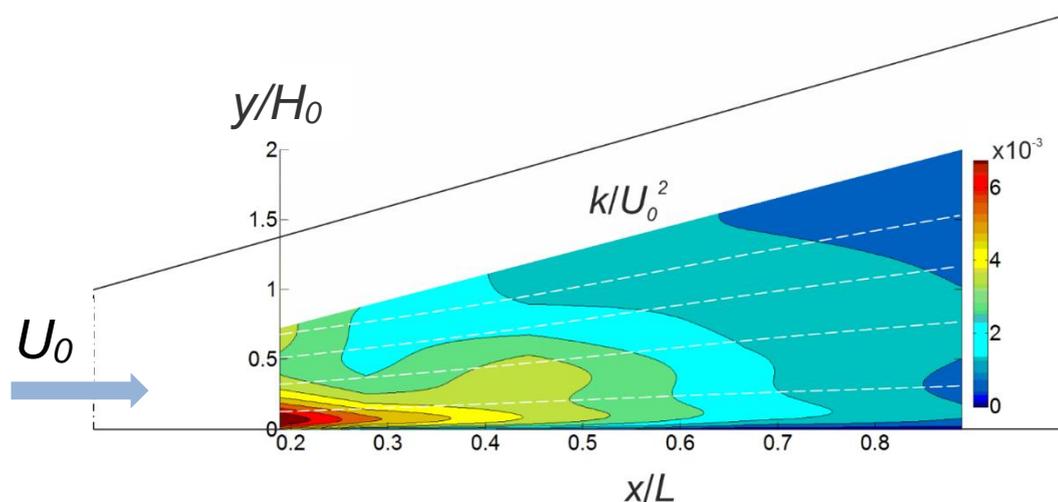


Рисунок 10 – Поле энергии турбулентности в диффузоре, пунктиром обозначены линии тока

Анализируя рисунок 10, можно сделать следующие наблюдения относительно распределения энергии турбулентности в диффузоре:

1) Вблизи входного сечения канала, после турбулизации пограничного слоя в пристеночной области, наблюдается максимальное значение энергии турбулентности. Это объясняется интенсивным взаимодействием потока с поверхностью стенки, что приводит к формированию турбулентных вихрей и высоким пульсациям скорости.

2) По мере движения вниз по потоку, величина энергии турбулентности уменьшается. Это происходит из-за процессов диссипации энергии турбулентности под влиянием вязкого трения и других диссипативных механизмов.

3) На протяжении всей длины диффузора в пристеночной области наблюдаются максимумы энергии турбулентности, связанные с генерацией турбулентности. Это связано с формированием и поддержанием турбулентных структур вблизи поверхности стенки.

4) Начиная с определенного сечения (в данном случае, при значении  $x / L$  около 0,4), при удалении от стенки возникают вторые максимумы энергии турбулентности. Наиболее вероятной причиной возникновения этих локальных максимумов служат процессы переноса турбулентности конвекцией и диффузией из областей с преобладающей у стенки генерацией турбулентной энергии ниже по течению вдоль канала.

Распределения конвективного теплообмена на стенках диффузора отражают закономерности формирования турбулентности в пристеночной области градиентного потока. Взаимосвязь тепловых и гидродинамических параметров в диффузоре можно выразить через корреляционную связь локального числа Стэнтона и максимальных локальных касательных Рейнольдсовых напряжений в пристеночной области пограничного слоя (см. Рисунок 11):

$$St = 0,031 \cdot (-U'V'/U_0^2)^{0,35}. \quad (8)$$

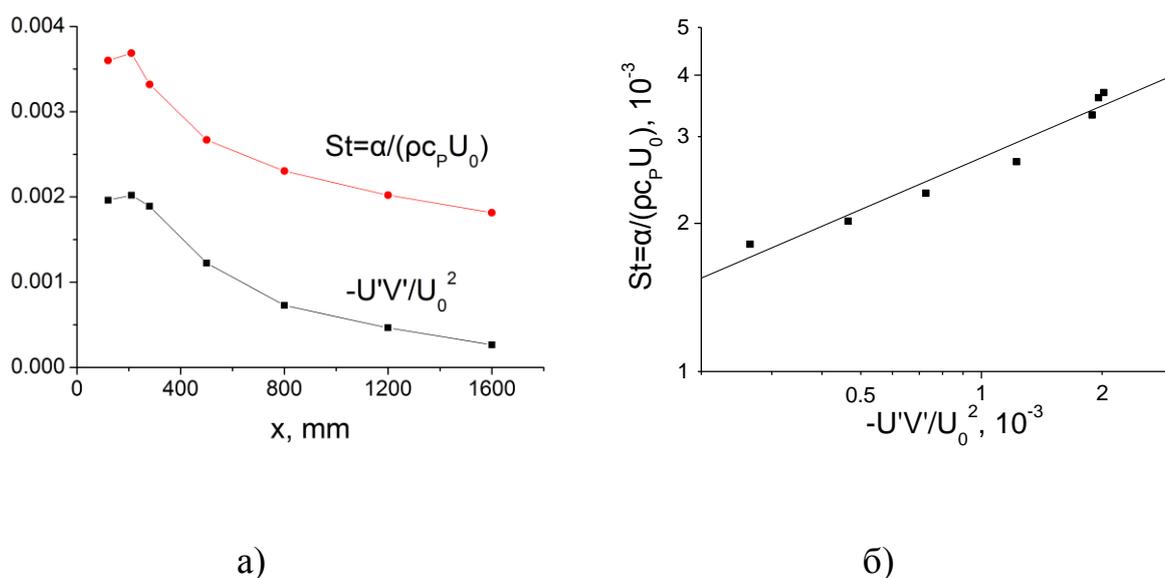


Рисунок 11 – Связь турбулентного трения и теплоотдачи в диффузоре  $\varphi = 2,5^0$ : а) распределение корреляции пульсаций и числа Стэнтона; б) зависимость коэффициента теплоотдачи от турбулентного трения: точки – экспериментальные данные; линия – соотношение (8)

В случае течений в конфузоре (при отрицательных градиентах давления), кинетическая энергия турбулентности по направлению потока увеличивается в абсолютном выражении. В этом случае состояние пограничного слоя и теплообмен в основном определяется локальными процессами генерации и диссипации турбулентной энергии.

Связь между теплоотдачей и турбулентным трением в конфузоре, аналогично диффузору, может быть представлена в виде степенной зависимости. Однако, в отличие от диффузора, в качестве определяющей величины следует использовать локальную среднюю скорость потока:

$$St_x = 0,033 \cdot (-U'V'/U_x^2)^{0,28}. \quad (9)$$

Таким образом, увеличение кинетической энергии турбулентности в направлении потока в конфузоре с отрицательным градиентом давления оказывает влияние на локальные процессы теплообмена, для анализа которых в конфузоре необходимо основываться именно на локальных значениях скорости потока.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная работа посвящена разработке методов прогнозирования теплоотдачи и турбулентности в динамически неравновесных градиентных течениях на основе экспериментальных исследований. Основные результаты исследований заключаются в следующем:

1) Предложен и успешно апробирован метод измерения локальной теплоотдачи на стенке в потоке жидкости.

2) В ходе экспериментальных исследований пограничного слоя при помощи оптического метода выявлены закономерности формирования поля кинетической энергии турбулентности в неравновесных по Клаузеру градиентных течениях. Показано, что в диффузорах формируется пограничный слой с высокой степенью турбулентности. В основе механизмов формирования повышенной локальной турбулентности лежат физические процессы переноса кинетической энергии турбулентности из областей с ее наибольшей абсолютной генерацией. Сильная генерация кинетической энергии турбулентности в диффузоре происходит в пристеночной области начальных сечений канала, откуда путем конвекции и диффузии осуществляется перенос энергии вниз по потоку. Это, в свою очередь, может приводить к формированию второго максимума энергии турбулентности ниже по течению в канале, на расстоянии больше ста вязких единиц от стенки. Вклад конвекции турбулентности в формирование структуры пограничного слоя в конфузорах незначителен. Локальные процессы генерации и диссипации турбулентности в ускоряющихся потоках имеют определяющее значение. Результаты экспериментов по теплоотдаче в конфузорах и диффузорах согласуются с предложенными механизмами формирования турбулентной структуры течения.

3) Экспериментальные исследования теплообмена в плоских диффузорах и конфузорах показали, что наилучшим образом результаты обобщаются по аналогии с теплоотдачей на плоской бесконечной пластине, в виде зависимости числа Стэнтона от числа Рейнольдса, определенного по координате  $x$ .

Выявлено, что в диффузорах важным параметром для обобщения результатов является скорость потока на входе  $U_0$ . Предложены универсальные критериальные соотношения обобщающие экспериментальные данные по теплоотдаче в диффузорах при постоянной плотности теплового потока  $q_w = \text{const}$  на стенке и справедливые для широкого диапазона значений числа Рейнольдса  $Re = U_0 \cdot x / \nu$  и Кейса  $K = -U_0 \cdot H_0 / (\nu \cdot \text{tg}\varphi)$ :

$St = 0,019 \cdot Re^{-0,5} \cdot |K|^{-0,23} \cdot Pr^{-0,67}$  – для ламинарного пограничного слоя во всем исследованном диапазоне значений параметра ускорения Кейса  $|K| = (0,16-12,0) \cdot 10^{-6}$ ;

$St = 0,0308 \cdot Re^{-0,2} \cdot Pr^{-0,6}$  – для турбулентного пограничного слоя при малых значениях  $|K| = (0-0,3) \cdot 10^{-6}$ ;

$St = 0,1 \cdot Re^{-0,53} \cdot |K|^{-0,23} \cdot Pr^{-0,6}$  – для турбулентного пограничного слоя при больших значениях  $|K| = (0,3-12,0) \cdot 10^{-6}$ . Представленные критериальные соотношения не содержат переменных, для определения которых требуются локальные значения характеристик потока.

Для обобщения данных по теплообмену в конфузорных каналах, следует использовать локальную среднюю скорость потока  $U_x$  в зависимостях числа Стэнтона  $St_x = \alpha / (\rho \cdot c_p \cdot U_x)$  от числа Рейнольдса  $Re_x = U_x \cdot x / \nu$ .

4) Экспериментальные исследования гидродинамических и тепловых процессов в неравновесных градиентных течениях позволили установить количественную связь между локальными параметрами теплоотдачи и локальными напряжениями Рейнольдса:

$St = 0,031 \cdot (-U'V' / U_0^2)^{0,35}$  – в диффузорах;

$St_x = 0,033 \cdot (-U'V' / U_x^2)^{0,28}$  – в конфузорах.

Полученные соотношения могут быть использованы для прогнозирования локальной теплоотдачи на основе оценок гидродинамики потока и турбулентности.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, индексируемые ВАК:

1. Давлетшин, И.А. Метод измерения коэффициента теплоотдачи на плоской стенке / И.А. Давлетшин, Н.И. Михеев, А.А. Паерелий, Р.Р. Шакиров // Теплофизика высоких температур. – 2022. – Т. 60. – № 3. – С. 443–447.

2. Зарипов, Д.И. Применение метода проекций для ускорения нового алгоритма измерения мгновенных полей скорости потока / Д.И. Зарипов, Н.И. Михеев, Н.С. Душин, А.К. Аслаев, Р.Р. Шакиров // Вычислительные технологии. – 2018. – Т. 23. – № 1. – С. 33–45.

3. Шакиров Р.Р. Кинематическая структура течений и теплоотдача в плоских диффузорном и конфузорном каналах / Р.Р. Шакиров, И.А. Давлетшин, Н.И. Михеев // Теплофизика и аэромеханика. – 2022. – № 5. – С. 799–805.

Статьи в базе данных WoS и Scopus:

4. Davletshin, I.A. Heat transfer and structure of pulsating flow behind a rib / I.A. Davletshin, A.N. Mikheev, N.I. Mikheev, R.R. Shakirov // *Int. J. Heat Mass Transf.* – 2020. – Т. 160. – С. 1–11.
5. Davletshin, I.A. Data on distribution of heat transfer coefficient and profiles of velocity and turbulent characteristics behind a rib in pulsating flows / I.A. Davletshin, A.N. Mikheev, N.I. Mikheev, R.R. Shakirov, // *Data in Brief.* – 2020. – Т. 33. – С. 1–8.
6. Davletshin, I.A. Heat transfer and flow structure in a plane diverging channel / I.A. Davletshin, O.A. Dushina, N.I. Mikheev, R.R. Shakirov // *Int. J. Heat Mass Transf.* – 2022. – Т. 189. – С. 1–11.
7. Davletshin, I.A. Governing characteristics of heat transfer in separated channel flows / I.A. Davletshin, N.I. Mikheev A.A. Paereliy, R.R. Shakirov // *Journal of Physics: Conference Series.* – 2019. – Т. 1382. – С. 1–4.
8. Davletshin, I.A. Heat transfer in turbulized gradient flows / I.A. Davletshin, A.A. Paereliy R.R. Shakirov // *Journal of Physics: Conference Series.* – 2020. – Т. 1565. – С. 1–4.
9. Dushin, N.S. Kinematics of pulsating flow in the entry region of the channel with discrete roughness elements / N.S. Dushin, N.I. Mikheev, A.A. Paereliy, I.M. Gazizov, R.R. Shakirov // *Journal of Physics: Conference Series.* – 2017. – Т. 891. – С. 1–6.
10. Mikheev, N.I. Correlation between heat transfer and microstructure of turbulent flow in ribbed channel / N.I. Mikheev, N.S. Dushin, O.A. Dushina, R.R. Shakirov // *Journal of Physics: Conference Series.* – 2020. – Т. 1565. – С. 1–6.