

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Новосибирский государственный технический университет»

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе  
Сибирского отделения Российской академии наук

На правах рукописи



Золотухин Алексей Владимирович

**АЭРОДИНАМИКА И ТЕПЛООБМЕН В КАНАЛАХ С СОТОВЫМИ  
ПОВЕРХНОСТЯМИ И ВИХРЕВЫМИ МАТРИЦАМИ**

Специальность 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

**ДИССЕРТАЦИЯ**  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
Терехов Виктор Иванович

Новосибирск – 2022

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ АЭРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА В КАНАЛАХ С СОТОВЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ И ВИХРЕВЫМИ МАТРИЦАМИ .....	12
1.1 Течение и теплообмен на поверхностях с кавернами и лунками .....	12
1.2 Влияние оребрения на интенсификацию теплообмена и гидравлические потери .....	14
1.3 Обтекание поверхностей при наличии гексагональных сот .....	22
1.4 Течение и теплообмен в решетчатых (вихревых) матрицах .....	29
Выводы и направления исследований .....	54
ГЛАВА 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ АЭРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА .....	56
2.1 Экспериментальный стенд и измерительные методики .....	56
2.1.1 Метод PIV (цифровая трассерная визуализация) .....	56
2.1.2 Метод лазерной доплеровской анемометрии .....	59
2.1.3 Экспериментальный стенд для исследования обтекания поверхностей с сотовыми ячейками .....	62
2.1.4 Экспериментальный стенд для исследования аэродинамики и теплообмена в вихревой матрице .....	64
2.1.5 Методика тепловизионных измерений .....	68
2.1.6 Дифференциальный электронный манометр ДМ-2 .....	70
2.2 Неопределенность измерений используемого оборудования .....	71
Выводы по второй главе .....	71
ГЛАВА 3 СТРУКТУРА ТЕЧЕНИЯ В КАНАЛЕ С СОТОВЫМИ ЯЧЕЙКАМИ ГЕКСАГОНАЛЬНОЙ ФОРМЫ .....	72
3.1 Особенности течения потока при обтекании сотовой поверхности .....	72
Выводы по третьей главе .....	91
ГЛАВА 4 АЭРОДИНАМИКА ТРАКТА С ВИХРЕВЫМИ МАТРИЦАМИ .....	92

4.1 Результаты экспериментов по исследованию аэродинамики в ячейке компланарных каналов в плоскости Z-X .....	95
4.2 Трехмерная структура течения в ячейке вихревой матрицы .....	100
4.3 Аэродинамические потери вихревой матрицы .....	103
4.4 Сопоставление с результатами измерений других авторов .....	104
Выводы по четвертой главе .....	106
ГЛАВА 5 ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В КОМПЛАНАРНЫХ КАНАЛАХ .....	107
5.1 Методика проведения измерений и обработки результатов .....	107
5.2 Результаты измерений локальной теплоотдачи в вихревой матрице .....	109
5.3 Интегральный теплообмен в вихревых матрицах .....	113
Выводы по пятой главе .....	117
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	118
СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ .....	119
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	121
ПРИЛОЖЕНИЕ «А» СПРАВКА-ОТЗЫВ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ.....	137

## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность темы исследования.**

На сегодняшний день большую роль в аэродинамике и инженерной теплофизике играет поиск и внедрение все более эффективных активных и пассивных методов управления структурой течения и теплообменом. Задачи в зависимости от области применения разнятся: уменьшение или увеличение теплообмена, снижение гидравлических потерь, равномерность распределения коэффициентов теплоотдачи и т.д. Активные способы управления потоком являются очень эффективными, но обычно проигрывают пассивным способам в надежности, в стоимости. Кроме того, они зачастую более громоздки, что затрудняет их широкое практическое применение. Они различаются по конструкции и по способу воздействия на поток, но имеют одну общую функцию – максимально эффективно управлять течением в максимально широком диапазоне параметров, чтобы наиболее выгодно использовать рабочую среду. К активным методам относятся отсос пограничного слоя или вдув в него, использование электро-механических актуаторов и пульсирующих струй, а также других способов воздействия на поток. Пассивные методы выполняют те же функции, но при этом имеют свои особенности: управление потоком среды происходит не столь активно, и они не обладают высокой универсальностью. Поэтому они создаются для конкретных условий применения, но распространены они куда шире и используются гораздо чаще, чем активные методы. К пассивным методам управления течением можно отнести неизменяемую модифицированную форму поверхности, вихрегенераторы, микро и макрошероховатости такие как ребра, лунки, канавки, выступы и многое другое.

В диссертационной работе будут изучены два типа макро-шероховатостей – это поверхности с ячейками гексагональной формы (сотами) и перекрещенные ребра, которые образуют компланарные каналы (вихревые или решетчатые матрицы). Сотовые поверхности используются в качестве газовых уплотнений в крупных энергоустановках с вращающимися частями (турбоагрегаты,

электрические двигатели и генераторы и др.), а также для пассивной тепловой защиты спускаемых космических аппаратов. В первых экспериментальных исследованиях, проведенных Трдатьяном и Климовым [1-4], был обнаружен эффект проскальзывания потока воздуха над поверхностями с ячейками гексагональной формы. Он характерен снижением трения и теплообмена по причине формирования в ячейках периодической вихревой структуры, которая позволяет уменьшить взаимодействие между потоком воздуха и сотовой поверхностью. Снижение трения и общее снижение взаимодействия между поверхностью и средой является на данный момент крайне актуальной задачей в большом спектре энергетических технологий.

Компланарные каналы в настоящий момент активно используются в охлаждаемых лопатках ГТД (газотурбинных двигателях), камерах ЖРД (жидкостных ракетных двигателей), зеркалах лазеров и рекуперативных теплообменниках. Их исследованию посвящено большое число опытных и численных работ. Последние исследования в данной области говорят о том, что использование компланарных каналов вместо гладких значительно увеличивает сопротивление, но и способствует возрастанию теплообмена на 300 – 600% и более, что чрезвычайно актуально при наличии высоких тепловых нагрузок. Проблема заключается в том, что абсолютное большинство экспериментальных данных имеют интегральный характер, т.е. без изучения локальной структуры течения и теплообмена. Это в значительной мере затрудняет понимание сложных особенностей турбулентного течения и тепловых характеристик в ячейках вихревых матриц. Имеющиеся экспериментальные данные по локальным параметрам весьма ограничены, что не позволяет создать обоснованных физических моделей, адекватно описывающих все особенности трехмерной структуры течения и переноса тепла.

#### **Степень разработанности темы исследования.**

Одним из способов управления течением потока является применение вихрегенераторов простых форм, таких как каверны, лунки, табы, ребра различных форм (V-образные, П-образные и др.), цилиндры и т. д. на одной или

нескольких стенках опытных каналов. Значительный вклад в исследование этого направления внесла советская и российская школа теплофизиков: Г.А. Дрейцер, Э.К. Калинин, В.К. Мигай, А.И. Леонтьев, Г.И. Кикнадзе, Волчков Э.П., Н.И. Михеев, С.А. Исаев, А.А. Халатов, Ю.Ф. Гортышов, И.А. Попов и другие. Интенсивно эти работы развивались и ведущими зарубежными исследователями: J.-C. Han, R. Webb, A. Bergles, B. Sunden, P.M. Ligrani, G. Xie, S. V. Ekkad, Y. Rao, X. Gao и др. Однако, работ, посвященных исследованию обтекания именно сотовых поверхностей, не так много, и они были выполнены ограниченным числом авторов: С.А. Трдатьян, А. А. Климов, В. Т. Буглаев, В. Т. Перевезенцев, М. А. Шилин, У. Батт, К. Эгберс, L. Jehring и D. Childs, и ни в одной работе не было сделано акцента на детальном исследовании изменений аэродинамической структуры над поверхностями с сотовыми ячейками при вариации геометрических параметров сот.

Экспериментальным и численным исследованиями течения и теплообмена внутри решетчатых матриц занимались многие исследователи: Г.П. Нагога, В.П. Александренков, Ю.М. Ануров, Ю. Г. Горелов, И.С. Копылов, а также зарубежные авторы: C. Zimmerer, P. Gschwind, K. Saha, C. Carcasci, R. S. Bunker, T. Ma, M. Zeng, H. M. Metwally, F. Maletzke, J. Sundberg, L. M. Wright и др. В то же время большинство полученных данных носит интегральный характер, что не может дать полной картины происходящих процессов внутри вихревых матриц и сдерживает создание инженерных методов расчета тепловых и динамических характеристик таких теплообменных устройств. В диссертационной работе впервые с использованием методов оптической диагностики получена детальная информация о локальной структуре трехмерного течения и теплообмена внутри ячеек вихревых матриц.

**Цель диссертации** – изучение с помощью оптических методов аэродинамики и теплообмена в каналах с сотовыми поверхностями и вихревыми матрицами при вариации в широких пределах геометрических и расходных параметров.

**Задачи для достижения цели диссертационной работы:**

1. Экспериментальное исследование развития пограничного слоя при обтекании сотовых поверхностей в плоском канале при различных геометрических параметрах сотовых ячеек и режимных параметров обтекающего потока.

2. Исследование аэродинамики в вихревых матрицах с различным углом пересечения ребер для формирования полной картины течения потока.

3. Исследование локального и интегрального теплообмена на поверхности экспериментального теплового участка с расположенными внутри вихревыми матрицами.

4. Сопоставление полученных экспериментальных данных с имеющимися результатами работ других авторов.

**Методы исследований.**

Для исследования процессов были использованы современные бесконтактные оптические методы: PIV (Particle Image Velocimetry), LDA (Laser Doppler Anemometry) и телевизионная техника. Это позволило получать информацию о распределении турбулентных характеристик в 3D потоках и локальных полей температур на поверхности.

**Степень достоверности результатов проведенных исследований** подтверждается анализом неопределенностей измерений, систематическими тарировочными испытаниями, использованием аттестованной измерительной аппаратуры в сочетании с современной автоматизированной измерительной системой, а также применением классических методов обработки полученных данных и хорошей воспроизводимостью результатов измерений.

**Научная новизна:**

1. Впервые с использованием оптических методов PIV и LDA детально изучена аэродинамическая структура при обтекании поверхности с гексагональными сотами различной глубины. Установлено, что наличие сот приводит к формированию вихревой структуры внутри ячеек и увеличению гидравлического сопротивления.

2. Увеличение глубины сот вызывает большую деформацию профиля скорости в пограничном слое и рост турбулентных пульсаций на внешней границе сот. Внутри сот течение подобно обтеканию лунок с формированием возвратного течения, интенсивность которого заметно ниже у глубоких сот.

3. Впервые лазер–доплеровским измерителем скорости (LDA) экспериментально изучена трехмерная структура осредненного и пульсационного течений внутри ячейки вихревой матрицы. Показано, что профиль вектора скорости по высоте канала сходен с течением в плоском канале с тем отличием, что направление потока меняется по высоте и суммарный угол скоса равен углу между противоположными ребрами. При этом градиенты скорости вблизи стенок канала возрастают, а вихревой характер течения в ячейке не наблюдается.

4. Получены новые данные по локальному теплообмену в плоском канале с вихревыми матрицами. Определены области повышенного теплообмена, а также степень интенсификации теплопереноса в зависимости от угла наклона ребер и числа Рейнольдса. Рост теплоотдачи по сравнению с гладким каналом составляет 4-7 раз.

5. Показано, что параметр теплогидравлической эффективности компланарных каналов, характеризующий отношение роста теплопереноса к гидравлическим потерям, при малых числах Рейнольдса возрастает по мере увеличения угла между ребрами. С увеличением чисел Рейнольдса эта тенденция нарушается вследствие роста гидравлических потерь.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Комплекс экспериментальных данных, полученных оптическими методами о турбулентной структуре пограничного слоя при обтекании гексагональных сот различной глубины, данные о течении внутри сот и гидравлическом сопротивлении таких поверхностей.

2. Результаты измерений компонент скорости 3D течения в ячейках вихревых матриц при угле пересечения ребер  $2\beta = 90^\circ$ .

3. Цикл экспериментальных исследований локальной и интегральной теплоотдачи в плоских каналах с вихревыми матрицами с тремя значениями угла



пересечения ребер в широком диапазоне чисел Рейнольдса. Данные о факторе аналогии Рейнольдса и теплогидравлической эффективности теплообменных устройств с вихревыми матрицами.

#### **Личный вклад соискателя.**

Постановка задачи принадлежит научному руководителю. Соискатель принимал участие на всех этапах проводимых исследований. Им создан экспериментальный стенд и рабочие участки, проведена отладка измерительной техники и аппаратуры сбора и обработки опытной информации. Весь цикл экспериментальных исследований, обработка и систематизация полученных данных выполнена им самостоятельно. Обобщение опытной информации, подготовка данных для публикации и представлении докладов на конференциях производилась совместно с научным руководителем и консультантами. Личный вклад автора в опубликованных материалах составляет не менее 60%.

**Практическая значимость результатов проведенных исследований** заключается в возможности использования их в разработке инженерных методов расчета теплообменных устройств в авиации, космонавтике, энергетике и химических технологиях.

Полученные результаты использованы компанией ООО «Катависта» при создании эффективных теплообменников с каталитическими стенками для решения проблем водородной энергетики (Приложение «А»).

#### **Апробация работы.**

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях: 15-ая Всероссийская научно-техническая конференция "Наука. Промышленность. Оборона" (Новосибирск, 2014 г.); Всероссийская школа-конференция с международным участием "Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики" (Новосибирск, 2014, 2016 г.г.); 6-ая Российская национальная конференция по теплообмену (РНКТ-6), (Москва, 2014 г.); Всероссийская научная конференция молодых ученых "Наука. Технологии. Инновации" (Новосибирск, 2016 г.), Всероссийская научная конференция молодых ученых "Наука. Технологии. Инновации" (Новосибирск,

2017 г.); V Международный молодежный форум "Интеллектуальные энергосистемы" (Томск, 2017 г.); Юбилейная конференция Национального комитета РАН по тепло- и массообмену «Фундаментальные и прикладные проблемы тепломассообмена» (Санкт-Петербург, 2017 г.); XXI Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках» (Санкт-Петербург, 2017 г.); Городская научно-практическая конференция аспирантов и магистрантов "Science. Research. Practice" (Новосибирск, 2017 г.); VI Всероссийская конференция с международным участием "Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках" (Новосибирск, 2017 г.); 7-я международная научно-практическая конференция аспирантов и магистрантов "Progress through Innovations" (Новосибирск, 2018 г.); 2-я Всероссийская научно-практическая конференция аспирантов и магистрантов "Science. Research. Practice" (Новосибирск, 2020 г.).

**Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем.**

Результаты диссертационного исследования опубликованы в 19 научных работах, из них, в рецензируемых научных журналах, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук (перечень ВАК РФ) – 2, работы, индексированные в наукометрических базах Scopus – 5.

**Научная специальность, которой соответствует диссертация.**

Диссертационная работа Золотухина А.В. «Аэродинамика и теплообмен в каналах с сотовыми поверхностями и вихревыми матрицами» соответствует паспорту научной специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника по направлению исследований паспорта специальности, в частности:

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, пяти глав, заключения, списка обозначений, списка литературы, включающего 130 наименований. Текст диссертации изложен на 137 страницах печатного текста, содержит 62 рисунка, 3 таблицы, 1 приложение.

# ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ АЭРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА В КАНАЛАХ С СОТОВЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ И ВИХРЕВЫМИ МАТРИЦАМИ

## 1.1 Течение и теплообмен на поверхностях с кавернами и лунками

На сегодняшний день актуальной задачей в аэро- и гидродинамике являются поиск и изучение методов, которые позволяют эффективно управлять теплообменными процессами (усиливать или подавлять, в зависимости от конкретной задачи) при паритетном или даже пониженном росте гидравлических потерь. Существуют активные и пассивные методы управления потоком: первые характерны высокой эффективностью, но в противовес они ресурсо- и энергозатратные, в отличие от пассивных, которые отличаются простотой и повышенной надежностью, что способствовало их распространению. Особенно востребованы поверхности с макро - и микрошероховатостью. Пример подобного использования – поверхности с луночным рельефом, предложенные Г.И. Кикнадзе [5]. В дальнейшем это направление получило бурное развитие, как у нас в стране, так и за рубежом [6-11]. Подобные исследования проводились в Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, где был проведен комплекс экспериментальных работ по изучению структуры течения и интенсификации теплообмена как при обтекании одиночной лунки [12, 13], так и их группы [14, 15]. Эксперименты были проведены на рабочих каналах сечением  $15 \times 115$  мм при числах Рейнольдса  $10^4 - 2 \times 10^5$  на каверне с постоянным диаметром  $D_k = 46$  мм, но с различной глубиной лунки, которая изменялась и в относительном виде составляла  $\Delta/D_k = 0, 0.13, 0.26, 0.5$ . Проанализировав полученные данные, авторы пришли к выводу, что внутри сферических лунок образуются вихри, вращающиеся противоположно направлению основного потока, приводящему к улучшенному контакту между потоком и поверхностью лунки, и, следовательно, к интенсификации теплообмена (вплоть до 60% по сравнению с гладкой поверхностью при низких числах Рейнольдса) при почти неизменном гидравлическом сопротивлении. В работе [16] был проведен подробный анализ

большого количества имеющихся на тот момент публикаций, посвященных обтеканию единичной сферической каверны. В обзоре приводится детальное описание причин возникновения безотрывного и отрывного течения на краях каверн, и насколько значительнее каждое из них влияет на интенсификацию теплообмена и гидравлическое сопротивление.

Несколько позднее была опубликована работа [17] по исследованию гидравлических характеристик на облуненных поверхностях с регулярными сферическими рельефами. Она проводилась под руководством Анурова Ю.М. и была выполнена на аэродинамическом стенде со сменными рабочими участками, которые представляли собой плоские щелевые каналы прямоугольного сечения. В исследованиях были задействовано 27 рабочих участков, которые различались по ширине, суммарной протяженности и ширине щели. 23 участка имели сферические каверны, но часть из них на одной стенке канала, а вторая имела углубления на обеих стенках. 4 оставшиеся участка были без облуненных поверхностей и являлись геометрическими аналогами предыдущих. В работе представлена графическая зависимость коэффициента гидравлического сопротивления в каналах, как со сферическими углублениями на одной или двух поверхностях щелевого тракта, так и с плоскими стенками, от числа Рейнольдса в диапазоне  $Re_D = 10^3 \dots 10^5$ . Показано, что наличие лунок сферической формы приводит к росту гидравлического сопротивления, по сравнению с плоским каналом. Коэффициент трения для таких каналов зависит только от относительной площади поверхности занятой сферическими углублениями, что может быть связано с размерами турбулентных образований, формирующихся в потоке при взаимодействии со сферическими углублениями.

## 1.2 Влияние оребрения на интенсификацию теплообмена и гидравлические потери

К эффективным пассивным методам можно отнести также поверхности с ребрами различной формы, обтеканию которых посвящен большой ряд экспериментальных и численных работ. Пионерскими работами в этой области являются [18, 19], инициировавшие обширные детальные и глубокие исследования теплофизических основ процессов интенсификации теплопереноса. Однако использование ребер различной формы приводит к росту гидравлических потерь в связи с увеличением интенсивности турбулентных структур в канале. Поэтому суть многочисленных исследований состоит в поиске наиболее оптимальных форм и режимов, при которых гидравлические потери не столь велики и не компенсируют выигрыша в теплоотдаче.

Существует большое количество форм вихрегенерирующих ребер. К примеру, V-образные ребра, которым посвящена экспериментально работа [19], могут оказать сильное воздействие трение и теплоперенос. Сценариев развития течения в оребренных каналах может быть реализовано большое множество. Теплогидравлическая эффективность таких каналов зависит от угла наклона ребер, их взаимного положения, формы и других факторов. Авторами работы [20] было проведено сравнение экспериментальных и численных исследований, но уже по одному из видов описанных ранее V-образных разделенных ребер, установленных на нижней стенке канала. В данной работе для численного расчета использовались LRN  $k$ - $\varepsilon$  модели, которые были модифицированы Lien и Leschziner (обозначение LL-модель), Launder и Sharma (LS-модель). Исследования проводились при  $Re = 1 \times 10^4$  и  $Pr = 0.72$ , результаты, полученные на обеих моделях, сравнивались с экспериментальными. В данном случае при описанных ранее параметрах эксперимента, при  $Nu_0 = 26.7$  в плоском канале, удалось выяснить, что наличие разделенных V-образных ребер приводит к увеличению теплообмена в  $\sim 3.4$  раза на стенке с рельефом, и в 2.25 на плоской стенке в канале с ребрами. Также влиянию V-образных ребер посвящена работа [21], в которой

проводилось исследование увеличения интенсивности теплообмена в прямоугольном канале при числе  $Re = 1 \times 10^3 - 6 \times 10^3$ ; на широких стенках канала располагались параллельные V-образные ребра с углом в вершине  $120^\circ$ , причем вершина располагалась как по направлению потока, так и против него. Канал имел следующие геометрические параметры:  $14.5 \times 112.5 \times 550$  мм<sup>3</sup>, ребра имели толщину 1.5 мм, шаг между ними 15 мм. Однако ребра на одной из стенок располагались со смещением 7.5 мм от начала канала, в отличие от противоположной стенки, которые смещения не имели. Аэродинамика изучалась с помощью запыления потока и высокоскоростной камеры, а теплообмен с помощью жидкокристаллической термографии. Авторы показали, что в потоке с V-образными ребрами формируются две пары противоположно вращающихся вихрей, направление вращения которых зависит от расположения вершин по отношению к направлению потока. Здесь же утверждается, что для всех протестированных чисел Рейнольдса ( $1 \times 10^3 - 6 \times 10^3$ ), распределение местного числа Нуссельта аналогичны, что означает, что вторичный поток, вызванный V-образными ребрами, был начинает формирование при относительно малом числе Рейнольдса равном  $1 \times 10^3$ . В направлении основного потока местное число Нуссельта является наименьшим сразу после каждого ребра, но затем увеличивается до максимального значения около средней точки между парой ребер и, наконец, достигает другого низкого значения перед следующим ребром. В диапазоне чисел Рейнольдса от  $1 \times 10^3$  до  $6 \times 10^3$ , в зоне испытаний, где считается, что поток достиг полностью развитого течения, V-образные ребра, вершина которых направлена по потоку, обеспечивают более высокий уровень теплообмена, чем V-образные ребра, вершина которых расположена против направления потока.

В работе [22] представлены результаты использования RANS модели для расчета двухмерной тепловой задачи, по обтеканию группы параллельных прямых ребер, расположенных перпендикулярно направлению потока. Данная работа была проведена с целью тестирования модели обтекания ребер и дальнейшего внедрения ее, как инструмент проектирования, так как полученные

результаты являются удовлетворительными и показывают, что модель последовательно воспроизводит правильные уровни теплопередачи, которые сравнивались с полученными ранее экспериментальными данными. Также численные данные, полученные при использовании данной модели, показывают, что в теплопередаче преобладает конвекция перед ребром и теплопроводность за ребром.

Исследование, аналогичное работе [21], но с пятью различными ориентациями V-образных  $45^{\circ}$  ребер, проведено в [23]. Исследования проводились при  $Re = 5 \times 10^3 - 4 \times 10^4$  и диапазоне числа вращения  $0.0 - 0.21$  на специальном стенде с П-образным вращающимся каналом. Вращение приводило к появлению сил Кориолиса и их последующее влияние на теплообмен. Эти исследования чрезвычайно актуальны для решения проблемы охлаждения вращающихся лопаток газовых турбин. Также в исследованиях канал располагался в двух ориентациях относительно плоскости вращения –  $90^{\circ}$  и  $135^{\circ}$ , что способствовало изменению формы вихревых структур, образующихся в канале. Авторы утверждают, как и их коллеги в работе [21], что V-образные ребра формируют пары противоположно вращающихся вихрей, которые способствуют интенсификации теплообмена. Результаты показывают, что вторичный поток, вызванный вращением, улучшает теплопередачу задней поверхности первого прохода/канала и передней поверхности второго прохода/канала П-образного тракта. Однако передняя поверхность первого прохода и задняя поверхность второго прохода показывают уменьшение теплопередачи при вращении. Результаты также показывают, что параллельные V-образные  $45^{\circ}$  ребра обеспечивают лучшее увеличение теплопередачи, чем перевернутые V-образные  $45^{\circ}$  ребра и скрещенные V-образные  $45^{\circ}$  ребра, а ориентация канала  $90^{\circ}$  дает больший эффект влияния вращения на теплопередачу, чем ориентация в  $135^{\circ}$ . Также для всех изученных здесь случаев результаты показывают, что улучшение теплоотдачи уменьшается с увеличением числа Рейнольдса.

Теплообмен с помощью жидкокристаллической поверхности в канале при различных видах ребер был исследован в работе [24]. Ребра различных форм и



высотой 3 или 5 мм (прямые, прямые разделенные, V-образные  $45^0$  и V-образные  $60^0$ ) располагались на одной из поверхностей канала, на которую крепились жидкокристаллическая пленка. В канале поток воздуха двигался при числе  $Re = 8.9 \times 10^3 - 3.6 \times 10^4$ , а съемка производилась с помощью высокоскоростной видеокамеры. Показано, что относительное число  $Nu/Nu_0$  снижается по мере увеличения числа  $Re$ , и наибольшее его значение ( $Nu/Nu_0 = 3.1$  при  $Re = 8.9 \times 10^3$ ) имеет конфигурация разделенных преград с наименьшей длиной ребер (20 мм), расположенных перпендикулярно направлению потока. Однако, как и в предыдущей работе, увеличение числа  $Re$  приводит к уменьшению интенсификации теплообмена на любой из поверхностей с рельефом.

Работа [25] по исследованию структуры течения и локального теплообмена в канале с повернутыми под определенным углом параллельных турбулизаторов-ребер проводилась под руководством проф. Р.М. Ligrani. Ребра располагались на обеих стенках рабочего участка прямоугольного сечения под углом  $45^0$  к направлению основного потока. Габариты экспериментального участка составляли  $411 \times 1232.9 \times 103$  мм<sup>3</sup>. Ребра располагались на противоположных стенках канала, но были распределены таким образом, чтобы обеспечить закрутку протекающего в канале потока, тем самым интенсифицируя теплообмен. Визуализация проводилась при  $Re = 270 - 800$ , а поля скоростей были представлены при  $Re = 270 - 4.8 \times 10^4$ . В результате установлено, что увеличение числа Рейнольдса способствовало формированию более мелких вихревых структур при контакте с макрощероховатостями, что приводило к уменьшению областей локального теплообмена, и, как следствие, уменьшению числа Нуссельта.

Довольно интересная экспериментальная работа [26] была проведена J.P. Tsia и J.J. Hwang, которая посвящена исследованию обтекания ребер, отсоединенных от боковых стенок канал. Исследования проводились при  $Re = 1.2 \times 10^4 - 7 \times 10^4$ , построенному по гидравлическому диаметру. Ребра располагались перпендикулярно оси канала и на отдалении друг от друга на двух стенках экспериментального участка прямоугольного сечения. В работе представлены

зависимости относительного числа Нуссельта по длине участка. Подъем ребер над поверхностью канала приводил к появлению щели, через которую проходила часть потока в виде пристенной струи. Наличие ребер и их расположение в канале приводило к увеличению теплообмена в канале, а подъем ребер над поверхностью канала позволял потоку помимо увеличения турбулентности, также охлаждать обе стенки за счет пристенной струи, тем самым усиливая теплообмен, вплоть до 3.5 кратного увеличения по сравнению с гладким каналом.

Для более детального изучения характеристик потока, охлаждающего прямоугольный канал с оребренными поверхностями, была проведена экспериментально-численная работа [27]. К тому же, она проводилась, чтобы оценить способность моделей, основанных на решении осредненных уравнений Навье-Стокса прогнозировать течение и теплопередачу. Оценка проводилась для развитого потока в стационарном канале квадратного сечения с прямыми ребрами, расположенными под углом 45 градусов к центральной линии тракта, с высотой ребра 10% от высоты канала и при числе Рейнольдса равному  $5 \times 10^4$ . Расчеты проводились с тремя различными моделями турбулентности: (1) стандартная модель турбулентности  $k-\varepsilon$  с пристенными функциями, (2) модель турбулентности с дифференциальным напряжением Рейнольдса с пристеночными функциями и (3) стандартная модель турбулентности  $k-\varepsilon$  с двухслойной пристенной моделью. В экспериментах использовалась измерительная система 3D-PIV, которая была собрана для одновременного измерения всех трех составляющих скорости. Сравнение измерений и расчетов показало хорошее качественное согласие, что говорит об эффективности использования подобранных авторами моделей, как инструмента проектирования теплообменных устройств. Авторы показали, что присутствующие в канале ребра являются турбулизаторами, которые способствуют формированию вихревых структур как до, так и после каждого отдельного ребра, что, естественно, приводит к образованию «мертвой» зоны за уступом, в котором теплообмен в застойной зоне понижен, но на поверхности, где вихрь присоединяется к стенке, наблюдается повышенный теплообмен. Об этом также говорят результаты

численного исследования в работе [28], проводимые при помощи LES в канале, высота которого была равно 10 высотам установленного ребра, при  $Re = 20\,000$ , хотя сама работа направлена на сравнение результатов расчетов с помощью различных численных моделей.

В работе [29] проводится сравнение теплообмена при  $Re = 50$  и  $Re = 350$  (в статье течение при  $Re = 350$  является турбулентным). Авторами рассчитывались каналы с ребрами, расположенными под углом  $60^\circ$  и  $90^\circ$  к направлению основного потока. В результате исследований было выявлено, что при  $Re = 350$  для ребер  $60^\circ$  и  $90^\circ$  повторное присоединение потока в средней точке между ребрами и нестационарный обратный поток перед выступом сформировали высокие значения усредненной по времени теплоотдачи. Особенно большое усиление теплоотдачи наблюдалось в области непосредственно перед ребром. Однако в случаях  $Re = 50$  жидкость с низким импульсом вблизи стенки с макрошероховатостью привела к меньшему влиянию выступа на поле потока по сравнению с предыдущим случаем. Отсутствие нестационарного движения жидкости также способствовало отличию профиля теплоотдачи ламинарного потока от турбулентного. Из-за меньшего влияния ребер в ламинарном случае разница между профилями скорости и температуры была меньше, чем в турбулентном.

Еще одна работа посвящена изучению структуры течения потока в канале гидродинамической установки с оребренной верхней стенкой с помощью измерительной системы PIV [30]. Исследования проводились в широком диапазоне чисел Рейнольдса ( $1.4 \times 10^3 - 5 \times 10^4$ ) в прямоугольном канале сечением  $24 \times 120$  мм и длиной 1444 мм. Измерительная область PIV составляла всего  $52.5 \times 53$  мм<sup>2</sup>, в то время как расстояние между ребрами равно 40 мм. Проведенные измерения позволили получить профили скорости в сечениях, расположенных до ребра, в центре ребра и после него. Авторами было установлено, что вблизи высоты выступа образуются вращающиеся как в одном, так и противоположном направлениях вихри. На векторном и его контурных графиках за выступами наблюдаются рециркуляции, отрыв и турбулентные вихри. Также обнаружено,

что высокий уровень турбулентности находится прямо над выступом; в сечении 3.8 мм от середины ребра относительно низкий уровень турбулентности обнаруживается на расстоянии примерно в два раза превышающем высоту выступа, а сам эффект ребра проникает дальше вниз по основному потоку. Исследование также показывает, что длина повторного прикрепления зависит от числа Рейнольдса до значения 15 000 для двух исследованных соотношений шага ребра. За пределами этого значения длина повторного прикрепления, по-видимому, не зависит от числа Рейнольдса и отношения шага ребра.

Экспериментальная работа [31] по изучению теплообмена в П-образном канале с системой ребер, расположенных под углом  $60^{\circ}$  к оси канала, проводилась при трех числах Рейнольдса  $1.6 \times 10^4$ ,  $3 \times 10^4$  и  $6 \times 10^4$ . Ребра расположены таким образом, что в направлении течения, поток постоянно закручен. Для исследования теплообмена использовался уже упомянутый ранее метод жидкокристаллической термографии. В результате авторами были получены локальные и средние коэффициенты Нуссельта. Для данной конфигурации канала более эффективным оказался теплообмен с числом Рейнольдса равным 16 000, что, скорее всего, связано размерами образующихся вихревых структур и расположением самих ребер. Подобная работа была проделана, но уже по изучению структуры течения потока и теплообмена с использованием  $k$ - $\varepsilon$  модели при  $Re = 3 \times 10^4$  в [32].

В работе уже ранее упомянутых авторов S.Y. Won и P.M. Ligrani [33] проводится исследование структуры потока газа и локального числа Нуссельта в канале с прямыми параллельными и скрещенными ребрами на обеих стенках. Ребра были размещены под углом  $45^{\circ}$  к оси канала, а шаг между ними был 128.4 мм при толщине 12.8 мм. Перекрещенные ребра приводили к закрутке потока в одну сторону, и, соответственно, к симметричным профилям скорости и полям температур на обеих стенках канала. Параллельные же ребра приводили к закручиванию потока в двух противоположных направлениях, следовательно, к абсолютной асимметрии течения потока в канале и лучшему перемешиванию. Авторы также отмечают, что локальный теплообмен при наличии параллельных ребер на обеих стенках канала существенно выше, чем при скрещенных.

Х. Gao и В. Sunden, провели ряд экспериментов для случая параллельного расположения прямых ребер [34]. На широких стенках канала располагались ребра под углами  $90^0$ ,  $60^0$ ,  $45^0$  и  $30^0$  к оси стенки. Но в отличие от работы [21] ребра на противоположных стенках были расположены со смещением в половину шага между ними, а не друг напротив друга, как в [32]. Измерения показали, что ребра создают трехмерные поля потока, также они позволили наблюдать отрыв и присоединение потока между соседними ребрами. В работе показано, что составляющая продольной скорости имеет самые высокие значения на верхнем конце ребер и непрерывно уменьшается до самых низких значений на нижнем конце. Сильное движение вторичного потока происходит по всему поперечному сечению канала для наклонных ребер. Структуры потока между двумя последовательными ребрами показывают, что жидкость течет по ребрам от одного конца ребер к другому, а затем поворачивает обратно в поперечном к оси направлении. Авторами было обнаружено, что ориентация выступов не только влияет на тип вторичного потока и его интенсивность, но также изменяет распределение средней скорости потока в поперечном направлении. Результаты, полученные для ребер под углом  $90$  градусов, были сопоставлены с имеющимися данными измерениями других авторов и показали хорошее согласие. Двумерные вторичные потоки были обнаружены по всему поперечному сечению для всех угловых ребер, и поток, создаваемый ребрами под углом  $45^0$ , оказался самым сильным.

Сильное влияние на структуру течения и теплообмен может оказывать уровень внешней турбулентности потока на входе в канал. Эта проблема достаточно подробно изучалась в большом числе работ и эти результаты обобщены в [35, 36]. Высокая внешняя турбулентность приводит к существенному сокращению протяженности отрывной зоны и интенсификации теплоотдачи. Такие же эффекты может оказывать и создание искусственных пульсаций расхода газа на входе в канал. Об этом говорят экспериментальные результаты работ [37, 38]. Подобных эффектов следует ожидать и в решетчатых матрицах, где уровень турбулентности потока ожидается очень высоким.

Казалось бы, рассмотренные выше два примера организации интенсивного теплообмена с помощью системы лунок и оребрения стенок канала имеют косвенное отношение к изучаемым в диссертации задачам. Однако это не так, поскольку сотовые поверхности также представляют систему каверн на поверхности, хотя форма их отличается от лунок. И вихревые матрицы имеют много сходных черт с каналами при наличии ребер (особенно перекрещивающихся) на противоположных стенках. В диссертационной работе как раз в такой последовательности от простого к сложному – сначала изучается теплообмен при оребрении одной из стенок, затем двух и, наконец, в подканалах вихревых матриц.

### **1.3 Обтекание поверхностей при наличии гексагональных сот**

Перейдем непосредственно к анализу литературных источников по изучаемым в диссертационной работе проблемам. Первыми работами, посвященными изучению структуры пограничного слоя при продольно обтекании поверхностей с сотовыми ячейками гексагональной формы, были экспериментальные исследования [1-4]. По результатам этих работ авторы установили эффект скольжения потока, который является одной из причин снижения уровня гидравлических потерь. В экспериментах сотовая пластина размерами  $185 \times 40$  мм<sup>2</sup> устанавливалась на пластине из оргстекла и монтировалась в нижнюю стенку канала сечением  $40 \times 40$  мм<sup>2</sup>. Боковые стенки канала были выполнены из оптического стекла.

Сотовая поверхность, результаты исследования течения на которой приводятся в данной работе, может рассматриваться как предельный случай поверхности с лунками. Длина стенок ячеек – 4 мм, толщина – 0.2 мм. Стенки ячеек занимали менее 10% общей площади поверхности. Этот фактор, как считали авторы, может оказать значительное влияние на пограничный слой, формирующийся на поверхности, фактически это приводит к резкому снижению влияния поверхности обтекания на структуру пограничного слоя.

Авторы исследовали также течение на сотовой поверхности при конфузормом течении [4]. В ходе ряда экспериментов было установлено, что пограничный слой скользит по границе раздела соты - поток и скорость скольжения увеличивается вниз по течению, достигая величины 0.3 от скорости на оси канала. Как пишут авторы, из-за влияния сотовой поверхности на поток, в ячейках происходит аналогичный резонатору Гельмгольца эффект, т.е. реализуется скольжение потока вдоль поверхности в связи с ламинаризацией потока, что несет за собой снижение трения в пограничном слое.

Экспериментальное исследование гидравлического сопротивления и теплообмена в канале с сотовой поверхностью было проведено в работах [39, 40]. Для исследования теплообмена в канале с сотовой пластиной на одной из стенок канала был использован стационарный метод, основанный на измерении температуры теплоотдающей поверхности и количества теплоты, переданного теплоносителю (воздуху) (Рисунок 1.1). В работе представлена разработанная авторами методика проведения экспериментов и определения экспериментальных значений средних и локальных коэффициентов теплоотдачи в рабочих участках.

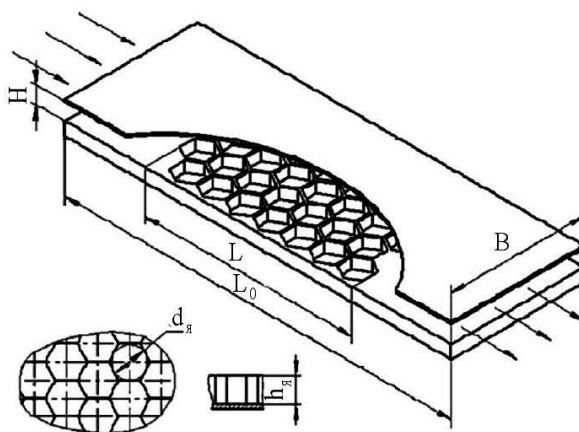


Рисунок 1.1 – Схема щелевого канала с сотовой структурой

Основываясь на результатах обработки полученных данных, были представлены эмпирические критериальные соотношения по средней и локальной теплоотдаче на стенке канала прямоугольного поперечного сечения с сотовой структурой, учитывающие влияние на теплоотдачу как режимных параметров,

таких как  $Re_D$  и  $Pr$ , так и геометрических параметров сотовой структуры ( $\bar{h}$  – относительная глубина сотовых ячеек) и самого канала.

В статье говорится, что при малых зазорах прослеживается взаимное влияние трения потока о гладкую и сотовую поверхности. Поэтому зависимость  $\psi_\lambda = f(\lambda_\Sigma, \lambda_0)$  для разных зазоров имеет особый вид, что также объясняется перестройкой потока в ячейках сот при наличии противоположной стенки.

Авторы утверждают, что характер течения и гидродинамическое сопротивление в канале с сотовой структурой значительно зависят от режима течения ( $Re_d$ ), геометрических параметров канала ( $\bar{\delta}$ ) и самой структуры ( $\bar{h}$ ). В зависимости от относительного зазора  $\bar{\delta}$  изменяется не только величина сопротивления канала, но и ее максимальное значение при различной относительной глубине  $\bar{h}$  (Рисунок 1.2).

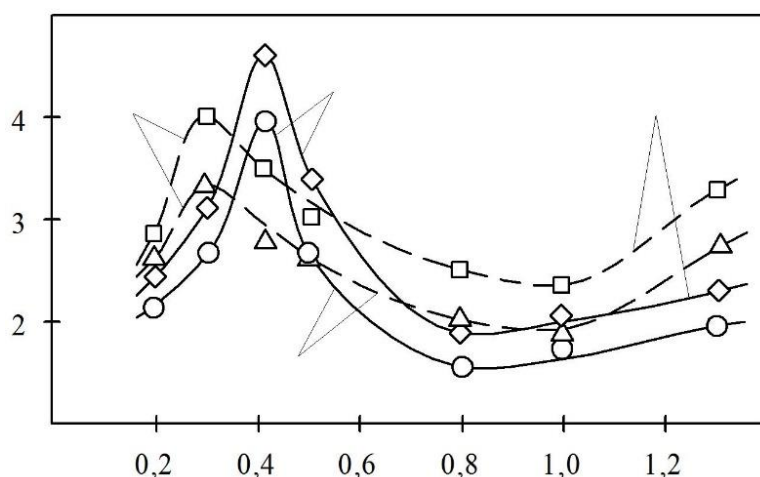


Рисунок 1.2 – Влияние относительной глубины сотовой структуры на гидродинамическое сопротивление канала

Изучению структуры пограничного слоя при наличии сотовых впадин посвящены экспериментальные работы [41, 42]. Термоанемометрические исследования и измерения трения с помощью масляной пленки подтверждают результаты визуализации, указывая на пики на кривых распределения пульсаций скорости. Представлены картины вихревых структур и областей циркуляции над гексагональными структурами, полученные на основе результатов вышеуказанных измерений. Входящий поток делится на два вихря, вращающихся



в вертикальной плоскости в противоположном направлении. Этому соответствуют два пика среднеквадратичной амплитуды пульсаций скорости. Концентрические полосы на задней кромке вогнутых полостей указывают на формирование более сложных вихревых структур, подобных ломтикам апельсина.

Обтеканию цилиндров с гексагональными ячейками посвящена работа U. Butt, S. Egbers и др. [43]. Авторы изучали обтекание цилиндров с «узорчатой» поверхностью в дозвуковой аэродинамической трубе при числах Рейнольдса в диапазоне от  $3.14 \times 10^4$  до  $2.77 \times 10^5$  путем измерения сопротивления, визуализации течения и измерения профилей скорости над поверхностью цилиндров. Эти «узоры» также могут называться шестиугольными ямочками или выпуклостями в зависимости от их конфигурации. Исследования показали, что узорчатый цилиндр с выдавленными наружу узорами имеет коэффициент аэродинамического сопротивления примерно в 0.65 раза меньше по сравнению с гладким. Методы визуализации потока, включая метод поверхностной масляной пленки и измерение профиля скорости, использовались для объяснения этого эффекта и, следовательно, для представления механизма снижения сопротивления. Измерение профилей скорости с помощью термоанемометрии над поверхностью показало, что шестиугольная выпуклость вызывает локальный отрыв, создающий большую интенсивность турбулентности вдоль разделяющего слоя сдвига. Из-за этой повышенной турбулентности поток снова присоединяется к поверхности с более высоким импульсом и становится способным противостоять градиенту давления, значительно задерживающему основной отрыв. Кроме того, отрыва потока происходит не по прямой линии вдоль цилиндра, как в случае большинства экспериментов по отрыву потока за цилиндром, а точно следует шестиугольным конфигурациям, образуя волну с гребнем и впадиной.

Кроме существенной трансформации поля течения наличие сот, по мнению ряда авторов, может оказывать сильное акустическое воздействие на структуру потока и турбулентность. Действительно, ячейку сотовой поверхности можно рассматривать как некий акустический генератор и при определенных размерах ячейки и числа Рейнольдса возможно возникновение резонанса с сильным

обратным влиянием на внешний поток. Этому явлению уделено внимание в работах [44-49].

Одной из первых в данной области является работа [44]. В ней исследуется пассивный метод управления турбулентностью в пограничном слое. Десять резонаторов Гельмгольца были встроены по прямой линии на нижней стенке, обтекаемой турбулентным потоком. На определенных скоростях потока резонаторы сильно заглушались турбулентностью, но они, в свою очередь, влияли на поток, приводя к изменению турбулентности и средней скорости в пограничном слое. Были проведены испытания, чтобы измерить реакцию резонаторов в зависимости от скорости набегающего потока. Дополнительные испытания, проведенные в условиях максимального резонанса, подтвердили влияние на профили средней скорости и турбулентности. Исследования проводились в аэродинамической трубе открытого типа, рабочий участок которой имел сечение  $711 \times 1016$  мм<sup>2</sup> при числе Рейнольдса равном  $6 \times 10^3$ . Отверстия, ведущие в демпфирующую камеру, имели диаметр 10.3 мм, толщина стенки камеры  $\sim 3$  мм. Сами же камеры были диаметром 25.4 мм и глубиной 104 мм, что давало номинальную частоту резонатора Гельмгольца 560 Гц. Каждая полость была независимой от других и содержала микрофон для измерения силы и фазы возбуждения. Измерения скорости пограничного слоя проводились с помощью двухлучевой системы TSI LDV.

Авторы получили следующие закономерности: при увеличении скорости основного потока увеличивается частота пульсаций внутри каждой камеры (при скорости 15.2 м/с была зафиксирована частота 510 Гц, в то время как при 36.6 м/с частота имела максимум 625 Гц). Столь же интересными оказались и результаты по измерению профилей скорости (при  $Re = 6 \times 10^3$ ): профили скорости в пограничном слое показывают уменьшение импульса у стенки. Это наиболее заметно проявляется непосредственно после отверстий, хотя оно также заметно и в местах между отверстиями. Снижение импульса ослабляется по мере продвижения вниз по потоку. Однако авторы отмечают, что поток, исследуемый в этой статье, чувствителен к незначительным изменениям геометрии, например,

формы отверстия, и поэтому приведенные в данной работе результаты следует обобщать с осторожностью.

Предыдущая работа послужила основой для проведения ряда работ по изучению снижения коэффициента трения на поверхности посредством использования резонаторов Гельмгольца [45-48]. В этих работах проведены экспериментальные и численные исследования по определению эффективности использования демпфирующих поверхностей (генераторов Гельмгольца) как способ управления осредненным по времени потоком и турбулентных пульсаций. Авторами экспериментально подтверждено снижение коэффициента сопротивления трения турбулентного потока. Кроме того, авторами было предпринято измерение сопротивления трения в перфорированной трубе с демпфирующими полостями, имеющими разное число перфорационных отверстий  $c$  (от 1 до 5). При этом каждая демпфирующая полость могла взаимодействовать с одним энергосодержащим вихрем (при  $c = 1$ ); с 3-4 вихрями при  $c = 2$ ; с 5-6 вихрями при  $c = 3$ ; с 7-8 вихрями при  $c = 5$ . Экспериментальный участок установки представляет собой прямую тонкостенную (толщина стенки 1.1 мм) цилиндрическую трубу внутренним диаметром 32 мм и длиной 1 м. В стенке трубы выполнены перфорационные отверстия диаметром 0.8 мм, с помощью которых движущийся в трубе поток взаимодействует с демпфирующими полостями. Общее число отверстий, расположенных по всей поверхности трубы в определенной закономерности, равно 1 800. Отверстия объединены в отдельные компактно расположенные группы, каждая из которых включает в себя 5 отверстий. В каждой из них центральное отверстие располагается в центре окружности диаметром 10 мм, а 4 остальных равномерно распределены по этой окружности. Причем 3 отверстия располагаются на прямой, параллельной оси трубы, и столько же в плоскости, перпендикулярной оси трубы и проходящей через ось центрального отверстия. Все группы отверстий равномерно расположены по поверхности трубы. Демпфирующие полости образуются с помощью накладок, устанавливаемых на наружной поверхности трубы. На каждую группу из 5 отверстий приходится 1 демпфирующая полость, а

общее их количество на рабочем участке равно 360. Диаметр полости – 12.8 мм, ее высота – 4.8 мм. В работе представлены результаты экспериментов в виде зависимостей коэффициентов сопротивления от числа  $Re$  (в диапазоне  $4 \times 10^4$  –  $6 \times 10^4$ ) при различном количестве отверстий в демпфирующей поверхности. Обработка результатов позволяет сделать вывод, что наличие демпфирующих полостей приводит к существенному (до 35%) снижению коэффициентов сопротивления трения. При этом происходит немонотонное изменение их значения в зависимости от количества отверстий, сообщающихся с каждой демпфирующей полостью. Наибольший эффект получается при  $c = 2 \dots 3$ , т.е. при взаимодействии с каждой полостью 3-5 соседних энергосодержащих вихрей. Основной сделанный в работе вывод: для достижения максимального снижения сопротивления трения на обтекаемой поверхности количество перфорационных отверстий, приходящихся на каждую демпфирующую полость, и расстояние между отверстиями должно выбираться из условия взаимодействия с каждой полостью 3-5 энергосодержащих вихрей, что позволяет объединить все полученные ранее данные в зависимость

$$\xi/\xi_0 = 1 - 4.46 \bar{f}^{0.48},$$

где  $\xi$  – коэффициент гидравлического сопротивления на перфорированной поверхности,  $\xi_0$  – таковой же на гладкой поверхности,  $\bar{f} = f_n / \bar{f}$  – относительная площадь перфораций;  $f_n$  – площадь перфорационных отверстий на всей обтекаемой поверхности;  $f$  – площадь обтекаемой потоком поверхности (площадь внутренней поверхности трубы).

В ходе обработки полученных результатов команде Ковальногова [46-48] авторам удалось обновить формулу, полученную ранее в работе [45]:

$$\xi/\xi_0 = 1 - 7.15 \bar{f}^{1.14/(c+1)} \cdot \exp[0.87(1-c)],$$

где  $c$  – это число перфорационных отверстий в одном резонаторе Гельмгольца. Таким образом, в результате проделанных работ было предложено эмпирическое соотношение, характеризующее сопротивление трения в перфорированной трубе с демпфирующими полостями. Одним из объяснений столь существенного

снижения коэффициентов трения (35%) является эффект уменьшения уровня турбулентности в потоке и возможной ламинаризации течения.

Детальное исследование структуры течения перфорированной пластины с акустическими резонаторами было недавно проведено авторами [49]. В работе детально изучалась детальная микроструктура течения в окрестности демпфирующего отверстия, что позволило описать механизм взаимодействия акустики и турбулентности.

Практически не изученным является теплообмен на сотовых поверхностях. Имеющаяся работа [50] носит постановочный характер и не в состоянии ответить на большое число вопросов по влиянию различных факторов на интенсивность теплообмена.

Отсутствие детальной опытной информации о структуре поля течения на поверхностях с гексагональными сотами не позволяет создать целостную картину данного сложного явления и требует более глубокого его изучения. В настоящей диссертационной работе экспериментально систематически исследовано развитие поля течения и турбулентных характеристик вдоль поверхностей с ячейками гексагональной формы различных размеров и чисел Рейнольдса. Она является развитием работ [51, 52]. В работе непосредственно сопоставлялись данные по осредненным и турбулентным характеристикам для сотовых поверхностей и канала с гладкими стенками, а также с данными других работ.

#### **1.4 Течение и теплообмен в решетчатых (вихревых) матрицах**

Следующим объектом исследования является канал прямоугольного сечения с находящейся внутри системой ребер, расположенных таким образом, чтобы обеспечить перекрестное течение теплоносителя. Такой теплообменный аппарат носит название решетчатая (вихревая) матрица или *компланарные каналы*. Общий вид решетчатой матрицы показан на рисунке 1.3.

Одним из вариантов компланарных каналов можно назвать набивку Френкеля – это конструкция из нескольких гофрированных металлических пластин, углубления которых расположены под углом по отношению к другим на

соседних пластинах, чтобы обеспечить перекрестное течение теплопереносящей среды. Исследование течения внутри подобных вихревых матриц было проведено как экспериментально [53], так и численно [54-56]. В работе [57] авторы решили модернизировать конструкцию набивки Френкеля следующим образом – на каждом листе располагаются систематические овальные отверстия для обеспечения перетока теплоносителя между металлическими пластинами, с целью изучения их влияния на теплообмен.

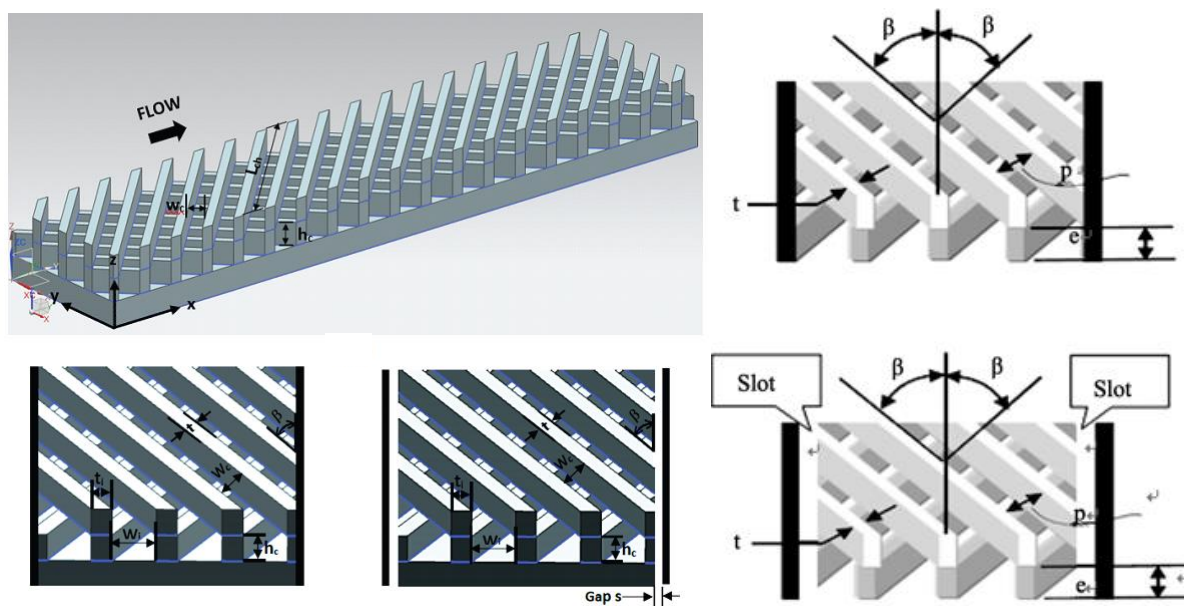


Рисунок 1.3 – Схемы вихревых матриц

В настоящее время плоские компланарные каналы очень активно используются для охлаждения лопаток газовых турбин, которые широко используются в авиации, наземных электростанциях и имеют другие различные промышленные применения. Лопатки газовой турбины могут охлаждаться как внутри, так и снаружи. Часть работ, представленных в данной диссертации, посвящена внутреннему охлаждению лопастей газовой турбины. Внутреннее охлаждение может быть достигнуто за счет организации течения охлаждающей жидкости через различные компланарные каналы внутри лопасти и отвода тепла снаружи лопастей. Струйное и матричное охлаждения, реберный турбулизатор, луночное и другие виды охлаждения используются в качестве методов внутреннего охлаждения, и все эти методы представлены в большом спектре

научных и технических статей. Из-за различной степени эффективности теплоотдачи и перепада гидравлического сопротивления они используются в отдельных частях лопаток газотурбинного двигателя. На наиболее теплонапряженных участках лопастей чаще всего используются компланарные каналы. Внутреннее устройство компланарных каналов лопатки газовой турбины демонстрируется на рисунке 1.4.



Рисунок 1.4 – Система внутреннего охлаждения лопатки турбины с помощью компланарных каналов

Матричное охлаждение помимо высокой тепловой эффективности также обеспечивает хорошую прочность лопастей за счет слоев ребер, перекрещивающихся с ребрами на противоположной стенке. Значительный прирост теплоотдачи в нем возникает за счет увеличения площади теплообмена, а также закручивающихся потоков (что способствует возникновению турбулентности), связанных с особой геометрией каналов вихревой матрицы.

Большая работа по сопоставительному анализу различных существующих методов охлаждения лопаток ГТУ была проделана J. Sundberg. Автор описал влияние основных характеристик каждого из перечисленных методов в справочнике [58]. Подобная работа была проделана L.M. Wright [59], в которой

вихревые матрицы также представлены, как один из наиболее эффективных решений с точки зрения интенсификации теплообмена. Но в связи с увеличением веса из-за металлических ребер, авторы рекомендуют использовать такой метод охлаждения в не вращающихся лопатках.

Применение компланарных каналов для целей пленочного охлаждения было впервые предложено Г.П. Нагогой и др., в которых исследовались методы интенсификации теплообмена в лопатках газотурбинных установок с целью повышения их долговечности. В работе [60] утверждается, что после многочисленных сравнений между охлаждением с помощью вихревой матрицы и другими пассивными методами (лунки, ребра и т.д.) более предпочтительным с точки зрения эффективности охлаждения является первый метод. При этом установлено, что матричное охлаждение позволяет увеличить ресурс лопаток в турбинах в 3-4 раза по сравнению с другими исследованными методами.

Альтернативой компланарным каналам для охлаждения лопаток ГТУ установок могут быть ребра на противоположных стенках каналов. В отличие метода решетчатого охлаждения, ребра не соприкасаются друг с другом, что приводит либо к формированию внутри потока двух противоположно направленных вихрей [61], либо к закрутке потока, и образованию одного большого вихря, что способствует существенному увеличению теплообмена по сравнению с гладким каналом [62].

А. Prajapati и А. Tariq [63] представили результаты экспериментальной работы по исследованию тракта с вихревой матрицей, у которой отсоединены боковые стенки. Матричные структуры продемонстрировали свой потенциал для использования в качестве альтернативного метода охлаждения по сравнению с традиционными методами, такими как ребристые турбулизаторы, охлаждение с ребрами и т.д., благодаря их явному преимуществу по жесткости конструкции при более высоких тепловых характеристиках. В работе [63] представлены результаты измерений и сравнений тепловых характеристик открытых вихревых матриц с закрытой (классической) матрицей, размещенной в прямоугольном канале, с помощью метода жидкокристаллической термографии. Эксперименты



проводились для диапазона чисел Рейнольдса от 5 800 до 14 000 в стационарном воздуховоде, оснащённом компланарным трактом с ребрами под углом  $45^{\circ}$  к направлению потока, имеющими открытые щели на обеих боковых стенках, и зазор щелей в открытой матрице на обеих боковых стенках варьировался в пределах 2, 4 и 6 мм. Результаты представлены в виде зависимости числа Нуссельта и коэффициента трения по отношению к гладкому каналу. Открытые матрицы с зазорами с обеих сторон показали меньшее усиление теплопередачи, сопровождающееся снижением перепада давления, по сравнению с закрытой матрицей. Максимальное улучшение теплопередачи и достигнутый коэффициент тепловой эффективности составляют соответственно 4.94 и 1.19 для закрытой матрицы. Коэффициент трения уменьшается по мере увеличения зазора щели и числа Рейнольдса. Авторы сделали вывод, что если теплопередача имеет первостепенное значение, то закрытая матрица может быть предпочтительнее открытой. Если же теплогидравлическая характеристика является критерием выбора, то открытая матрица с определенным зазором на обеих боковых стенках может быть предпочтительнее с дополнительным преимуществом по жесткости конструкции.

Аналогичной работой занимались авторы из Китая – Hongwu Deng, Kai Wang, Jianqin Zhu, Wenyan Pan, они представили результаты [64] в 2013 году. В работе [64] теоретически и экспериментально исследованы характеристики теплообмена и гидравлического сопротивления решетчатой (вихревой) матрицы с усеченными с двух концов ребрами в сравнении с обычными компланарными каналами и гладкими каналами той же конфигурации. Результаты экспериментов в представленной работе показали, что эффективность теплопередачи вихревой матрицы с двумя щелями выше, чем у «классических» вихревых матриц и гладких каналов, а гидравлическое сопротивление каналов со щелями размером 2 мм и 4 мм были явно ниже, чем у обычной вихревой матрицы. По сравнению с обычным каналом общая эффективность теплопередачи каналов с прорезями была существенно увеличена, среди них канал с прорезями 4 мм имеет наиболее значительное улучшение. Основываясь на результатах экспериментов, авторы

сделали вывод, что решетчатый канал с соответствующими прорезями имеет большие перспективы в конструкции внутренних каналов охлаждения лопаток турбины.

Экспериментальное исследование теплообмена и гидравлические потери в компланарных каналах с углом скрещивания ребер  $90^{\circ}$  было представлено в работе [65]. Работа посвящена изучению распределения теплопередачи и перепада давления для четырех различных вихревых матриц, которые характеризуются двумя различными значениями высоты ребра: для каждой высоты ребра были изучены две различные конфигурации: одна с четырьмя входными каналами и меньшей толщиной ребра, другая с шестью входными каналами и большей толщиной ребра. Были проведены эксперименты для числа Рейнольдса, рассчитанного по гидравлическому диаметру входного подканала, в диапазоне 2 000 до 12 000. Измерения показали, что уровень роста теплопередачи  $Nu/Nu_0$  уменьшается с увеличением Рейнольдса, но он всегда выше 2.

В работе авторы сделали следующие выводы:

1). падение давления увеличивается в направлении потока с увеличением числа Рейнольдса. Общий коэффициент трения также увеличивается с увеличением числа Рейнольдса для каждого исследуемого случая;

2) при сохранении постоянной высоты ребра среднее число Нуссельта не сильно зависит от изменения толщины ребра и количества подканалов. С другой стороны, сильное уменьшение высоты ребра снижает эффективность теплопередачи, и такой эффект в основном связан с уменьшением поверхности теплообмена;

3) значения улучшения теплопередачи  $Nu/Nu_0$  выше 2,5 для  $Re < 6000$  и изменяются от 2.0 до 2.5 для  $Re > 6000$ . Этот коэффициент немного уменьшается с увеличением числа Рейнольдса. Полученные результаты хорошо согласуются с полученными ранее экспериментальными данными, а также с работами других авторов по вихревым матрицам.

Один из примеров численного исследования аэродинамики и теплообмена в вихревой матрице является диссертация F. Maletzke [66]. Автором была

представлена методика оценки теплообмена в потоке внутри матричных охлаждающих каналов с использованием CFD кода. Четырех параметрические RANS-модели турбулентности, основанные на модели турбулентности  $k-\omega$ , показали хорошую корреляцию с экспериментальными данными. При параметрическом исследовании влияния ряда геометрических параметров на рост теплообмена в охлаждающей матрице матрица была упрощенно представлена как течение в канале, взаимодействующее с несколькими пересекающимися потоками. Базовый случай течения в компланарных каналах и анализ параметров показывают хорошую корреляцию с литературными данными. Было показано, что для диапазона, характерного для лопаток турбины, число Рейнольдса не оказывает большого влияния на усиление теплообмена. Наибольшее улучшение теплопередачи наблюдалось при изменении коэффициента конусности, соотношения сторон и угла матрицы. По сравнению с течением в гладком канале наблюдалось увеличение теплопередачи до 60%. Закругленные кромки охлаждающих каналов, часто являющиеся результатом производства, также оказывали значительное влияние на теплопередачу. Влияния толщины стенки на теплообмен в потоке, напротив, не наблюдалось.

Авторам [67, 68] удалось экспериментально получить распределение числа Шервуда  $Sh$  по поверхности вихревой матрицы, а также зависимость  $Sh/Sh_0$  от числа Рейнольдса в условиях вращения, и сравнить полученные данные с результатами в гладком и оребренных каналах. Вихревая матрица имеет подканалы, которые находятся под углом  $45^\circ$  по отношению к оси основного тракта. Коэффициенты тепломассопереноса в экспериментах измерялись методом сублимации нафталина. Эксперименты проводились при различных числах Рейнольдса (от 10 000 до 44 000) и числах вращения (от 0.0 до 0.8). Усредненные коэффициенты тепломассообмена на передней и задней поверхностях в стационарном канале примерно в 2.1 раза выше, чем в гладком канале. Показано, что в стационарном случае локальное распределение  $Sh/Sh_0$  были одинаковыми вдоль подканалов, как на передней, так и на задней поверхностях. На поток в канале охлаждения матрицы в первую очередь влияли явления поворота,

набегания и завихрения потока в каждом подканале. Значения  $Sh/Sh_0$  были высокими (до 4.8) в области столкновения и уменьшались по мере развития теплового/массового пограничного слоя вдоль подканалов с несколько повышенными значениями в области поворота.

Численное исследование турбулентных структур и теплообмена внутри вихревой матрицы было проделано в работе [69]. Авторами представлен детальный анализ особенностей течения и теплообмена для трех случаев решетчатой конструкции: с радиальным потоком (RFC – поток попадает в вихревую матрицу через узкую стенку), с поперечным потоком (CFC – поток попадает в матрицу через подканалы в широкой стенке) и с поворотным потоком (TFC – поток движется по повороту гладкого канала, и затем попадает в матрицу через широкую стенку). Все конструкции имели одинаковую решетчатую сердцевину, но с различной конфигурацией входного и выходного потоков. Было установлено, что конфигурации потока оказывают существенное влияние на теплопередачу, потери давления и особенности структуры потока в решетчатых подканалах. При одинаковых массовых расходах охлаждения решетка RFC показывает самые высокие средние числа Нуссельта и самые высокие потери давления, а решетка CFC и TFC обеспечивает заметно более низкую, но аналогичную усредненную производительность теплопередачи с гораздо меньшими потерями давления. Показано, что ребра вносят основной вклад в высокие теплообменные характеристики решетчатых конструкций. Усредненная теплопередача на ребристых поверхностях на 16-19% выше, чем на первичных поверхностях для решетки RFC, на 35-43% выше для решетки CFC и на 30.5-34.0% выше для решетки TFC.

В серии работ [70-73], выполненных К. Saha и др., были представлены экспериментальные результаты по исследованию теплообмена и распределению давления в вихревой матрице с углом скрещивания ребер  $90^\circ$ , которая размещалась за поворотом канала для имитации движения потока газа в лопатке ГТУ. В работе также было сделано сравнение полученных результатов с данными для плоского канала рот размещении в них в шахматном порядке цилиндров

одинакового диаметра. Установлено, что отношение чисел Нуссельта ( $Nu/Nu_0$ ) составляет около 4-5 по сравнению с канальным потоком аналогичного гидравлического диаметра и числа  $Re$  для всей вихревой матрицы. В зонах поворота потока рост теплоотдачи может достигать 7-8 раз. Падение давления увеличивается с увеличением числа Рейнольдса, и в результате при более высоком числе Рейнольдса коэффициент тепловой эффективности снижается. В итоге, коэффициент тепловой эффективности достигает порядка  $\eta \sim 1-1.2$ .

Экспериментальная и численная работа [74] авторов Lianfeng Yang и др. посвящена изучению компланарных каналов внутри лопаток ГТУ. В этой работе экспериментальное и численное моделирование направлено на изучение перепада давления и теплообмена в различных конфигурациях охлаждения. В сравнительном исследовании исследуются массив ребер, матричные (компланарные каналы) и гибридные структуры. Полученные результаты показали, что матрица создает гораздо более сильную теплопередачу, чем массив ребер, что, однако, приводит к более высоким потерям давления. Характеристики матричных структур сильно различаются в зависимости от конфигурации. Гибридные же конструкции всегда хуже обычной матрицы по средним тепловым характеристикам из-за более высоких потерь давления, однако, теплообмен остается примерно на одном уровне. Энергоэффективность гибридной конструкции зависит от расположения и размера ребер, а средняя теплопередача может быть улучшена за счет рационального расположения штифтовых ребер.

Arik M. и др. [75] провели исследования по сравнению нескольких актуальных методов охлаждения поверхностей и агрегатов турбомашин. Основная цель работы состоит в том, чтобы изучить технологии воздушного охлаждения турбомашин и предоставить инженерам информацию о современных эффективных способах теплообмена и дополнительные идеи.

Большой вклад в развитие исследований решетчатых матриц был сделан R.S. Bunker [76-78]. Изучены и проанализированы различные способы охлаждения лопаток ГТУ (вдув, облуненные поверхности, наклонные ребра и т.д.) и сопоставлены с данными по коэффициентам теплопередачи и потерям давления в

компланарных каналах. Цель работы - показать подробное развитие теплопередачи в вихревых матрицах, что приведет к пониманию эффекта поворота потока. Для определения местного и общего коэффициентов теплоотдачи для вихревой матрицы с углом наклона ребер  $45^{\circ}$  использовались два исследовательских метода: жидкокристаллический и инфракрасный. Исследования проводились в канале с встроенными в него вихревыми матрицами при числах Рейнольдса от 20 000 до 100 000. Выигрыш в коэффициенте теплопередачи на поверхности рабочего участка до поворота в среднем равен примерно 1.5, но он может достигать локальных значений около 3 сразу после каждого поворота. Распределение давления показывает высокие потери при повороте возле боковых стенок на  $180^{\circ}$ . Улучшения теплообмена после поворота сохраняются для относительно больших расстояний. В работе показано, что повышение общего коэффициента теплопередачи вихревой матрицы составляют от 2.5 до 3 раз.

Детальное численное 3D моделирование течения в компланарных каналах проведено в работе [79]. В данной работе метод трехмерного моделирования для каждого состояния (стационарного и вращательного) применялся для двухслойного матричного охлаждения с четырьмя входами в каждом слое в канале прямоугольного сечения. Исследование проводилось при числах Рейнольдса (6 000-12 000) и числах вращения (0.05-0.25), угол наклона ребер составлял  $45^{\circ}$ . Результаты работы свидетельствуют о том, что среди распространенных способов, применяемых для охлаждения задней кромки лопатки газовой турбины, матричный способ охлаждения имеет выигрыш в теплообмене в стационарном и вращающемся состояниях порядка  $\sim 2-3$  раз. Также авторы показали, что вращение существенно влияет на характеристики теплопередачи. Теплопередача увеличивается на стороне нагнетания в 3 раза (при числе вращения 0.15 и числе Рейнольдса равном 6 000), что является важным свойством воздействия вращения на теплообмен.

В работе Sheng Su и др. [80] проведено численное исследование по теплообмену в лопатке с вихревой матрицей. В данной статье описывается трехмерное

численное моделирование лопатки ротора турбины со сложной внутренней конструкцией охлаждения. Охлаждающая конструкция состоит из ребристого змеевидного канала у передней кромки, компланарных каналов в средней части и щелей на задней кромке лопатки.

Численные исследования с использованием метода сопряженного теплообмена для внутреннего охлаждения рабочей лопатки турбины показали, что в осевом направлении лопатки при моделировании учитываются ребристые змеевидные каналы на передней кромке, решетчатая структура в среде и щели на задней кромке. На основании детального анализа потока жидкости и теплообмена можно сделать следующие выводы: Предложенная конфигурация внутреннего охлаждения может эффективно охлаждать лопатку газовой турбины, но распределение температуры является неравномерным в различных местах лопатки. Чем меньше отношение шага к высоте в каналах вихревой матрицы, тем равномернее распределение температуры. Однако эффект охлаждения задней кромки уменьшается, поскольку более плотная решетка приводит к более высоким потерям давления охлаждающей жидкости.

Shi Вu и др. в статье [81] представили результаты по изучению влияния бокового выброса газа на эффективность охлаждения вихревой матрицы в канале лопатки. Цель состоит в том, чтобы улучшить внутреннюю теплопередачу и тепловые характеристики матричного канала за счет соответствующей конфигурации эжекторных отверстий. Результаты расчетов показывают, что место выброса является наиболее важным фактором, влияющим на эффективность охлаждения. Расположение эжекторных отверстий на повороте боковой стенки во многом определяют структуру потока и теплообмен. Лучшая производительность может быть достигнута с отверстиями рядом с задней стороной (после поворота в П-образном канале).

Те же авторы [82] представили цикл исследований теплообмена и распределения давления в вихревых матрицах с большим числом вариаций геометрических параметров (угол скрещивания, шаг между ребрами и толщина ребер). Для получения поверхностного распределения числа Нуссельта и

перепада давления проводился тщательно спланированный эксперимент в аэродинамической трубе с использованием метода нестационарных жидких кристаллов. Полученные данные используются для проверки вычислительного кода с SST-моделью турбулентности, которая используется для изучения эффективности 13 различных компланарных каналов в диапазоне чисел Рейнольдса 5 000-90 000. Метод используется для подгонки решений CFD, и устанавливаются полиномиальные выражения для расчета относительного коэффициента трения ( $f/f_0$ ) и теплопередачи ( $Nu/Nu_0$ ). Результаты показывают, что необходимо одновременно учитывать различные структурные параметры, чтобы улучшить тепловые характеристики матрицы. В ходе работы авторами были сделаны следующие выводы:

1) Отношение коэффициента трения ( $f/f_0$ ) немного снижается при увеличении числа Рейнольдса с 5 000 до 90 000. Усиление теплопередачи ( $Nu/Nu_0$ ) сначала снижается в диапазоне чисел  $Re$  от 5 000 до 30 000, а затем остается почти постоянным при  $Re$  равном 30 000-90 000;

2) Матричные структуры с малым углом скрещивания или узкими подканалами могут обеспечить очень сильный локальный теплообмен с максимальным значением  $Nu/Nu_0$  около 14-15 (при числе Рейнольдса 30 000); жертвуя при этом равномерностью распределения тепла по матрице, особенно при плотном расположении ребер. Для сравнения, большой угол скрещивания ребер и широкие подканалы могут обеспечить максимальное значение  $Nu/Nu_0$ , составляющее всего 6-10, но теплопередача распределяется равномерно по матрице.

Авторы провели расчетное исследование течения и теплообмена в эффективной системе охлаждения – компланарных каналах [83]. Расчеты проводились для случая стационарной вихревой матрицы с углом наклона ребер  $45^\circ$  при трех числах Рейнольдса ( $24\ 000 < Re < 60\ 000$ ) и четырех соотношений размеров подканалов. Сюда входят подканалы различной формы: прямоугольной, U-образной, а также двух- и трехслойная матрица в сочетании с открытыми и закрытыми матричными каналами. Число Нуссельта и коэффициент трения были



оценены и сопоставлены с экспериментальными результатами. Моделирование показало развитие вихрей вдоль подканала. Авторы утверждают, что существенный вклад в усиление теплообмена вносят закручивание и столкновения потока с боковой стенкой. Соотношение сторон подканала оказывает меньшее влияние на повышение теплопередачи, но большее влияние на падение давления. Производительность закрытой матрицы относительно лучше, чем у открытой матрицы. Общие тепловые характеристики матрицы с U-образным подканалом почти на 10% выше, чем у прямоугольного подканала. Также тепловые характеристики уменьшаются с увеличением числа Рейнольдса.

Численное исследование течения и теплообмена в решеточном (матричном) канале было проведено Т. Nagari и К. Ishida [84]. Моделирование было выполнено для двух каналов, чтобы воспроизвести экспериментальные результаты, опубликованные в открытой литературе. Число Рейнольдса варьировалось от 24 000 до 96 000 для первого канала и от 11 000 до 44 000 для второго соответственно. Подканалы, входящие в вихревую матрицу, спроектированы с соотношением сторон, близким к единице, и углом наклона скрещивания ребер  $90^{\circ}$ . Авторы в своей работе указывают, что наибольший локальный коэффициент теплоотдачи наблюдается на реберных поверхностях. Картина потока показывает, что продольный вихрь формируется параллельно подканалу после столкновения с боковой стенкой, и что переходный поток с одной стороны подканала на другую удерживает ядро вихря. Этот нестационарный поток вносит существенный вклад в усиление теплоотдачи на верхней кромке поверхности ребра, и более половины всего теплового потока проходит через ребра.

Т. Tsuru и др. представили две работы [85, 86], в которых показано, что продольные вихревые структуры внутри подканалов формируются из-за взаимодействия между пересекающимися потоками через ячейки, образованные скрещивающимися ребрами. Работа [85] уделена изучению аэродинамических процессов, где для измерения поля скорости использовался МРТ-сканер (Магнитно-резонансная томография). Угол  $\beta$  между ребрами варьировался от  $30^{\circ}$  до  $60^{\circ}$ . Число Рейнольдса, посчитанное по гидравлическому диаметру

воздуховода на входе, приблизительно равно 8 000. Рабочая жидкость – водный раствор сульфата меди (0.015 моль/л). Результаты измерений показали, что теплонесущая жидкость в верхнем и нижнем подканалах взаимодействуют не только в начале и конце любого подканала, но и в ромбовидных ячейках, образованных противоположными ребрами. Обмен импульсом между верхним и нижним подканалами происходит в ячейках матрицы, что приводит к образованию устойчивого продольного вихря в каждом подканале. Измеренные поля скоростей сравниваются с результатами численного моделирования, выполненного с помощью метода RANS. Численно рассчитанные результаты показывают ту же тенденцию, что и измеренные; однако взаимодействие потоков между верхним и нижним подканалами завышено на поворотах возле боковых стенок и занижено в участках между ними.

Экспериментальная работа [86] посвящена изучению теплообменных процессов внутри вихревых матриц. Распределения коэффициента теплопередачи были получены путем визуализации стационарных локальных температур с использованием термочувствительных жидких кристаллов и фольгового нагревателя. Число Рейнольдса в экспериментах варьировалось от 2 000 до 9 000 в зависимости от гидравлического диаметра и скорости в подканале. В работе говорится, что в целом распределение теплопередачи хорошо коррелирует с полем скоростей. На выходе из подканала перед поворотом теплообмен усиливается за счет ускорения потока. Теплопередача также усилена на боковых стенках. Независимо от того, вращается охлаждающая жидкость или нет, сила сдвига, создаваемая пересекающимся потоком в ромбовидных ячейках, создает вихревое движение потока, что приводит к увеличению теплоотдачи. Также был сделан вывод, что взаимодействие потоков между противоположными подканалами увеличивает теплопередачу не только основной поверхности (широкой стенки), но и боковых стенок. Число Нуссельта в области поворота в 2-3 раза выше, чем на основной поверхности.

В работе [87] исследовано течение внутри каналов, образованных гофрированными пластинами. Целью работы являлось определение оптимальных

углов для повышения эффективности пластинчатых теплообменников. В работе утверждается, что при углах  $\beta$  примерно до  $80^\circ$  жидкость безотрывно течет вдоль ребер на каждой пластине. Показано, что движение потока в каналах гофры определяет процесс переноса; вследствие этого движения и теплоперенос довольно равномерно распределяется по ширине пластин. При более высоких углах ( $\beta > 80^\circ$ ) схема течения становится менее эффективной для переноса; в частности, на  $90^\circ$  наблюдается заметный отрыв потока. В выводах работы говорится, что угол наклона гофры  $\beta$  является основным параметром, влияющим на характеристики пластинчатых теплообменников: это связано с тем, что изменение  $\beta$  влияет на основную структуру потока, которая является главным фактором, влияющим на перепад давления и теплопередачу. Увеличение  $\beta$  (при постоянном числе Рейнольдса) от  $0^\circ$  до  $80^\circ$  приводит к увеличению перепада давления более чем на 2 порядка, хотя теплопередача увеличивается только в 4-10 раз.

Авторами работы [88] проведено численное исследование влияния вихревой матрицы и дополнительного струйного охлаждения на структуру течения и теплообмен в лопатке газовой турбины. Данные по численному исследованию для компланарных каналов по течению и теплообмену представлены в работе [89]. Вихревая матрица включала одиннадцать подканалов как на верхней, так и на нижней стенке. Угол пересечения ребер задавался равным  $90^\circ$ . Струйное охлаждающее реализовывалось через семь сопел, соединенных с одной из боковых стенок вихревой матрицы. Конструкции струйного охлаждения и вихревой матрицы были соединены тремя разными положениями струйных сопел и двумя формами струйных сопел соответственно. Кроме того, были рассмотрены шесть различных коэффициентов массового расхода в конструкциях струйного охлаждения. Схема течения демонстрируется на рисунке 1.5.

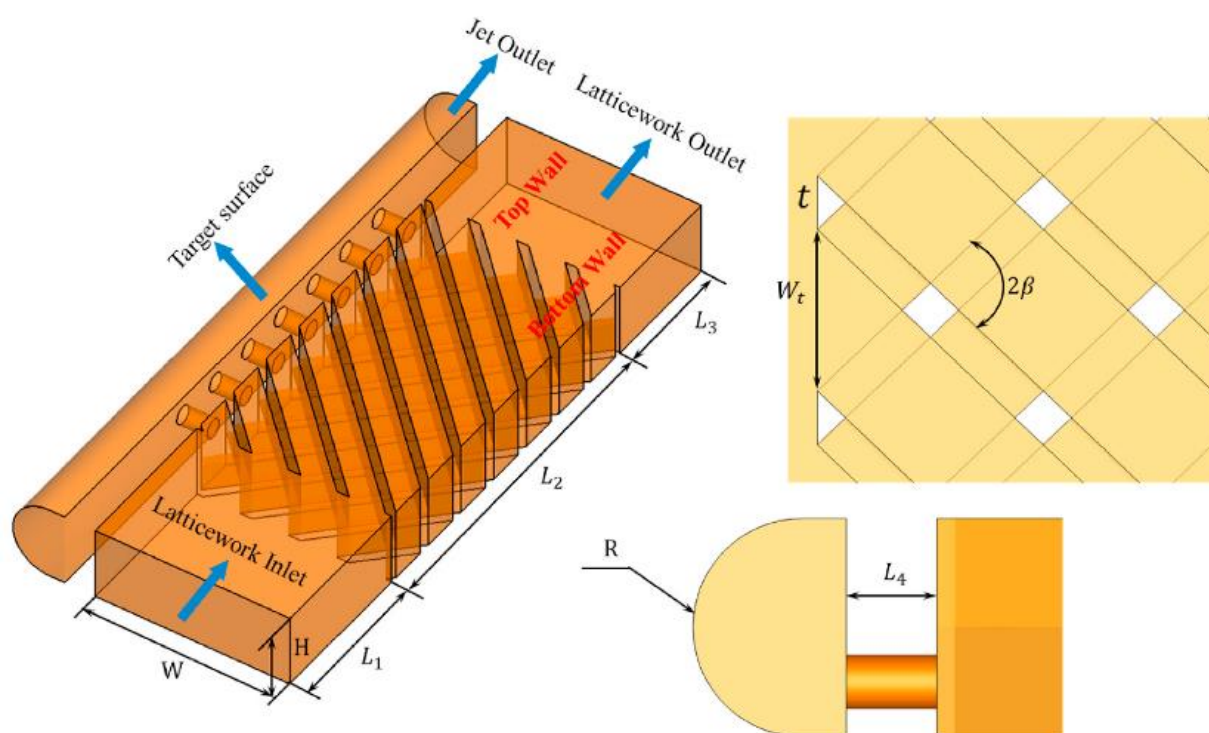


Рисунок 1.5 – Схема вихревой матрицы с дополнительным струйным охлаждением [89]

Результаты измерений показали, что поле течения и характеристики теплообмена чувствительны к форме, расположению струйного сопла и соотношению массовых потоков. При увеличении массового расхода в системе струйного охлаждения теплопередача в этой системе увеличивалась, а в компланарных каналах уменьшалась. При использовании струйного сопла вблизи области поворота восходящий спиральный поток и винтовой поток в подканале решетчатой конструкции ослабевали, что способствовало уменьшению числа Нуссельта в канале с решетчатым охлаждением, но увеличению теплообмена в конструкции струйного охлаждения. Кроме того, круглое струйное сопло обеспечивало высокий коэффициент трения и число Нуссельта как для конструкций струйного охлаждения, так и для вихревой матрицы.

Работа [90] посвящена исследованию особенностей течения и теплообмена в компланарных каналах с помощью метода LES, который позволял более точно прогнозировать характеристики поля внутреннего потока данной конфигурации охлаждающей конструкции при числе Рейнольдса 30 000. В статье представлены картины течения в поперечном сечении трех подканалов. Полученные в работе

результаты показывают, что поворотная часть сильно деформирует поток воздуха – он является сложным и неупорядоченным. При движении потока воздуха от входного отверстия к повороту образуются небольшие по размеру и прерывистые вихри. После поворота скорость потока постепенно увеличивается и здесь образуются продольные вихри больших масштабов. Из-за структуры компланарных каналов воздушные потоки взаимодействуют друг с другом: воздушный поток в одном подканале может оказывать поперечное воздействие на другой поток в противоположном подканале. Продольные вихри способствуют увеличению энергообмена внутреннего воздушного потока и теплообмену между воздушным потоком и стенами. Кроме того, проведено сравнение результатов CFD и экспериментальных данных, чтобы доказать, что методы численного моделирования являются адекватно описывают эксперимент.

На рисунке 1.6 показано сравнение данных по распределению  $Nu/Nu_0$  поверхности первого подканала, полученных экспериментально и с помощью метода LES. В итоге авторами был сделан вывод, что именно наличие поворотов в вихревой матрице имеет критически важное значение для улучшения теплообмена между стенками канала, ребрами и теплоносителем.

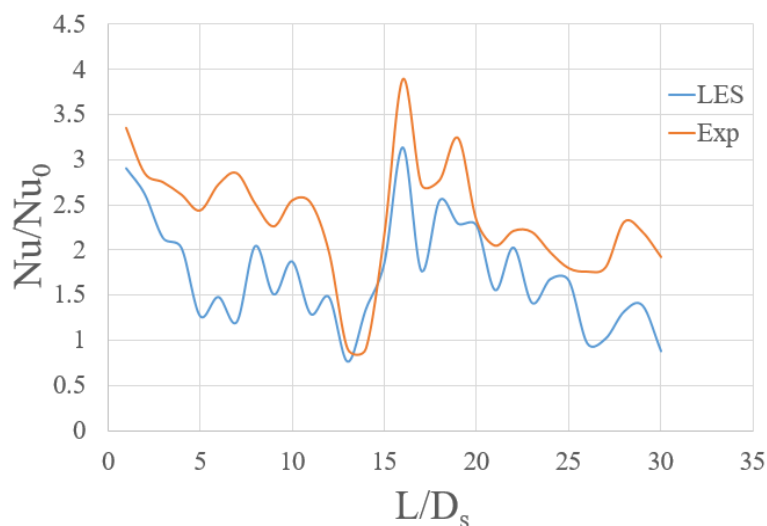


Рисунок 1.6 – Сопоставление опытных и расчетных данных [90]

В работе [91] была проделано экспериментальное и численное исследование течение и теплообмена в вихревой матрице с углом наклона ребер относительно оси канала  $\beta = 35^\circ$ . Численные расчеты проводились для матриц с тремя

различными конфигурациями подканалов: прямоугольными, U-образными и U-образными подканалами с луночными вихрегенераторами, что придавало ребрам своеобразную волнообразную форму (Рисунок 1.7).

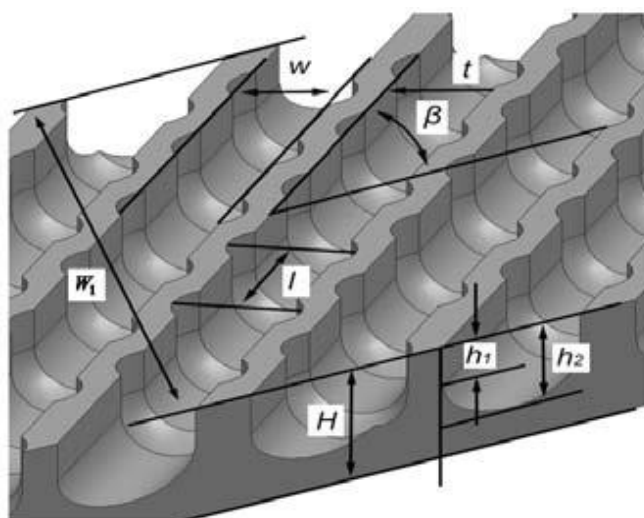


Рисунок 1.7 – Вихревая матрица с луночным рельефом [91]

При сопоставлении экспериментальных и численных данных показано, что модель численного расчета может достаточно хорошо прогнозировать теплопередачу и потери давления в компланарных каналах. В диапазоне чисел Рейнольдса от 7 600 до 337 000, в зависимости от геометрии подканалов, по сравнению с гладким каналом, среднее число Нуссельта вихревых матриц примерно в 1.9-2.3 раза выше, а коэффициент трения выше примерно в 6.4-11 раза. Тепловизионные картинки теплообменных поверхностей на рисунке 1.8 свидетельствуют в пользу такого заключения.

В итоге в работе [91] говорится, что подканалы U-образной формы с углублениями обеспечивают наибольшее усиление теплопередачи и наиболее равномерную теплопередачу как в осевом, так и в поперечном направлении, среднее число Нуссельта которых примерно на 16% выше, чем у двух других подканалов. Углубления в матрице с подканалами U-образной формы работают как вихрегенераторы и обеспечивают дополнительное улучшение теплопередачи, в то же время значительно увеличивая сопротивление.

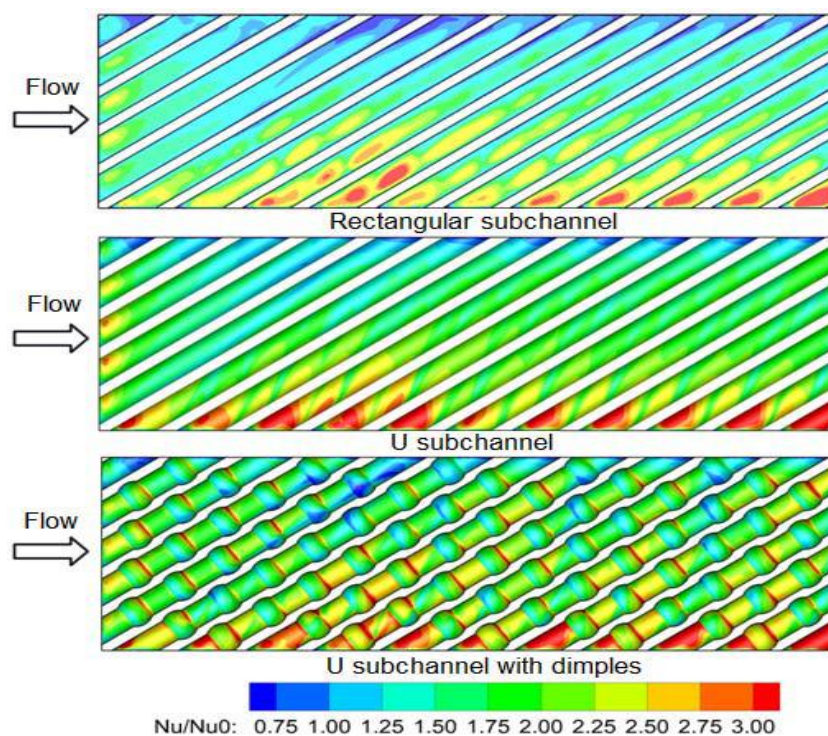


Рисунок 1.8 – Тепловизионные диаграммы трех теплообменных поверхностей [91]

В.П. Александренковым была выполнена расчетно-аналитическая работа [92] по исследованию влияния компланарных каналов на охлаждение стенок камер ЖРД. Следует отметить, что в научной школе МГТУ им. Н.Э. Баумана, к которой он принадлежит, выполнены основополагающие работы по кольцевым решетчатым матрицам. В них рассмотрен широкий спектр задач по оптимизации регенеративного охлаждения камер сгорания и сопел ракетных двигателей по критерию максимального теплосъема. Показана возможность применения предлагаемой методики оценки эффективности интенсификации теплоотдачи в обычных оребренных трактах с учетом особенностей компланарного течения и установлена область параметров оребрения со значительно более высокой (2-4 раза) эффективностью по сравнению с обычным оребрением охлаждающих трактов.

Работа [93] аналогична исследованиям [91], описанным ранее. Она также посвящена изучению интенсификации теплообмена и изменению сопротивления в вихревых матрицах, только с той лишь разницей, что на ребрах, образующих подканалы, равномерно расположены полуцилиндрические выступы (ПЦВ), и

было исследовано в работе 29 экспериментальных моделей с различными геометрическими параметрами. Эксперименты проводились на установке, в основе которой лежит метод теплотрирования охлаждаемых воздухом объектов в расплаве кристаллизующегося чистого цинка. Гидравлические потери в каналах измерялись в изотермических условиях на тех же моделях, что и теплообмен, путем их дренирования отборниками полного и статического давлений. В результате авторам удалось добиться на некоторых моделях значения  $Nu/Nu_0$  равное приблизительно 3.2, зафиксированное же в таком случае значение гидравлического сопротивления  $\xi/\xi_0$  превысило 8.

Ф.В. Пелевин, О.И. Ильинская и С.А. Орлин проделали экспериментальную работу [94], в которой исследован теплообмен и гидравлическое сопротивление в трактах с компланарными каналами различной формы (плоские и цилиндрические). Было установлено, что основным параметром, влияющим на интенсификацию теплообмена, является угол взаимного перекрещивания компланарных каналов  $\beta$ . Авторы отмечают, что особенно сильно отличились компланарные каналы при значениях чисел Рейнольдса  $Re = 10^3 \dots 10^4$ , а оптимальный угол взаимного перекрещивания компланарных каналов равен  $90^\circ$ . Коэффициент теплоотдачи, по сравнению с гладким каналом, с помощью вихревой матрицы может быть увеличен до 3-6 раз. Увеличение угла взаимного перекрещивания каналов приводит к росту коэффициента гидравлического сопротивления. В представленной работе при увеличении угла  $\beta$  с  $45^\circ$  до  $104^\circ$  коэффициент гидравлического сопротивления увеличивается в 5-6 раз. Для повышения эффективности теплообмена в плоских трактах с компланарными каналами авторы предлагают дополнительно возмущать поток теплоносителя с помощью микротурбулизаторов на дне подканалов.

Работа [95] посвящена исследованию эффективности охлаждения лопаток газовых турбин с помощью размещения внутри них компланарных каналов. Она является наиболее цитируемой в классе работ по решетчатым матрицам. Экспериментальное исследование теплообмена проводили методом калориметрии, эффективность охлаждения изучалась в установках внешнего



обдува моделей и лопаток потоком воздуха. В ходе работы были получены зависимости теплоотдачи и гидравлического сопротивления от угла и оказалось, что максимально получившееся значение  $Nu/Nu_0$  авторам удалось получить для угла  $2\beta = 90^\circ$  и оно равно  $\sim 1.9$ . Всего были исследованы пять моделей, которые различались углом скрещивания,  $2\beta = 30, 60, 70, 90$  и  $120^\circ$ . Другие геометрические параметры экспериментальных моделей авторы в работе не указывали.

Y. Luan и др. [96] представили экспериментальное и численное исследование полей течения и характеристик теплообмена в компланарных каналах. Испытательная секция (угол  $\beta = 45^\circ$ , толщина ребра 30 мм, высота ребра 30 мм и ширина подканала 30 мм) изготовлена из плексигласа и входила в конструкцию аэродинамической трубы. Влияние геометрических параметров на характеристики потока и теплопередачи исследовано численно в диапазоне чисел Рейнольдса 6 000-50 000. Затем каналы с различными конструктивными параметрами (угол ребра, толщина ребра и ширина подканала) были исследованы с помощью численного моделирования - три угла ребра (30, 45 и  $60^\circ$ ), три толщины ребра (1.8, 3 и 5 мм) и три ширины подканала (3, 5 и 9 мм) с высотой ребра 3 мм для всех случаев. Численные результаты показали, что повороты боковых стенок вносят наибольший вклад в улучшение теплопередачи, но при этом вызывают очень большое падение давления. Общая теплопередача и перепад давления растут с увеличением угла  $\beta$  и ширины ребра, но уменьшаются с шириной подканала. Как и в других, ранее описанных работах, авторы данной статьи пришли к выводу, что угол  $\beta$  оказывает наиболее существенное влияние на эффективность охлаждающей матрицы, но также приводит к резкому увеличению и коэффициента сопротивления.

На рисунке 1.9 показана зависимость относительного числа Нуссельта  $Nu/Nu_0$  от Рейнольдса, по которой можно понять, что самыми эффективными с точки зрения теплообмена являются компланарные каналы с углом  $\beta = 60^\circ$ , и теплообмен в них интенсивнее, чем в гладком канале, примерно в 6 раз. Авторы утверждают, что вихревое движение, преобладающее в подканальном течении,

создается в основном за счет поворота в связи со столкновением с боковыми стенками матрицы.

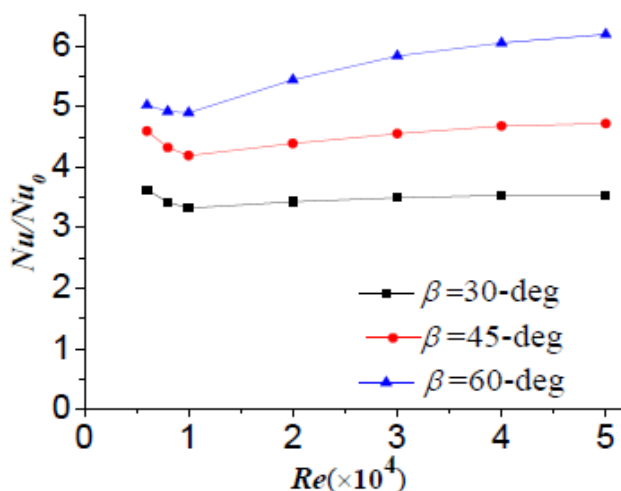


Рисунок 1.9 – Интенсификация теплоотдачи в решетчатой матрице [96]

Комбинированный эффект замедления потока перед поворотами и ускорения после поворотов вносит наибольший вклад в массоперенос между двумя слоями подканалов.

В работе [97] представлено исследование течения в микротеплообменниках с гофрированными пластинами. Гофрированные пластины в работе имеют синусоидальную форму. Исследования проводились в диапазон малых чисел Рейнольдса ( $Re > 10$ ) и для углов  $\beta = 15, 30, 45, 60, 75^\circ$ . Фотографии испытываемых компланарных каналов представлены на рисунке 1.10.

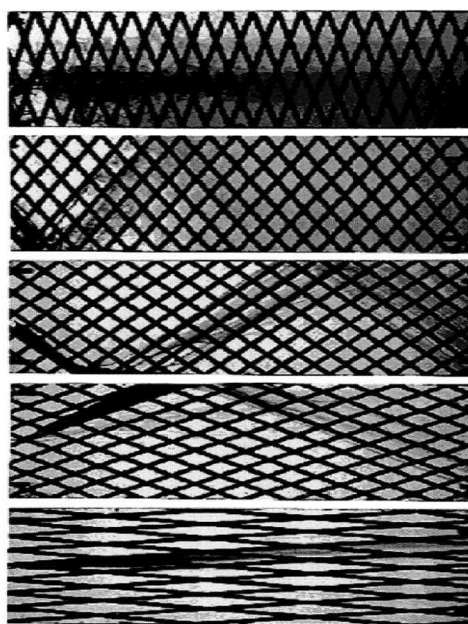


Рисунок 1.10 – Общий вид компланарных каналов, испытанных в работе [97]

В работе была представлена визуализация потока в рабочем канале с различным углом скрещивания. Авторы делают вывод, что наблюдаемое течение теплоносителя зависело от скорости потока, длины волны гофрированной поверхности и угла  $\beta$ .

Анализ и экспериментальная визуализация течения в канале с гофрированными поверхностями [98] были проведены авторами J.M. Luna и др. Работа схожа с предыдущей тем, что ней также представлена визуализация картины течения, развивающейся в канале, образованном параллельными разнесенными поперечно-гофрированными пластинами. Поперечно-гофрированные пластины характеризовались гофрами синусоидального профиля с длиной волны 0.083 м и амплитудой 0.075 м, расположенными под углом  $45^\circ$  относительно направления основного потока ( $\beta = 45^\circ$ ). В то время как соотношение длины волны и амплитуды оставалось фиксированным, варьировались как расстояние между пластинами, так и число Рейнольдса (Рисунок 1.11).

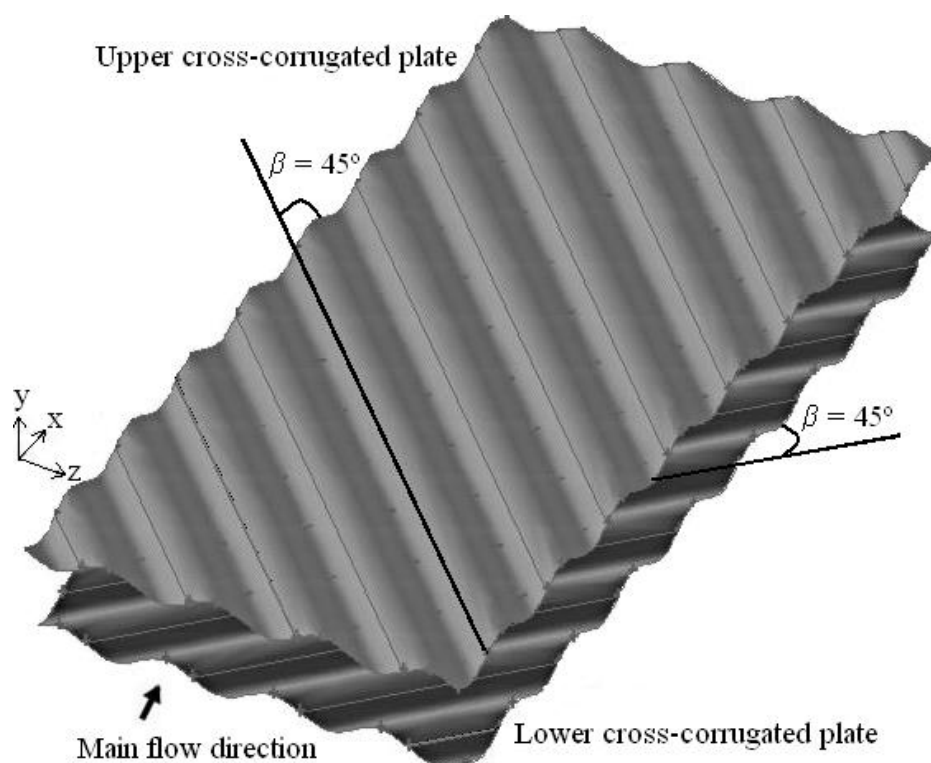


Рисунок 1.11 – Компланарные каналы, образованные гофрированными пластинами [98]

В статье выявлено три характерных режима течения: стационарный, нестационарный и режим с хаотическим перемешиванием. При некоторых критических числах Рейнольдса, зависящих от расстояния между пластинами, течение становится нестационарным и сначала на выходе из канала возникает хаотическое перемешивание. Хаотическое перемешивание смещается ближе к входу в канал по мере увеличения числа Рейнольдса. Результаты показывают, что начало хаотического перемешивания происходит при больших числах Рейнольдса по мере увеличения расстояния между гофрами. На серии визуализационных фотографий (Рисунок 1.12) можно проследить указанную трансформацию режимов.

Расстояние между пластинами также может приводить к устранению застойных зон потока. Сохранение вихревого движения в потоках, текущих по канавкам, обеспечивает движение жидкости во всей области между гофрированными пластинами даже при малых числах Рейнольдса.

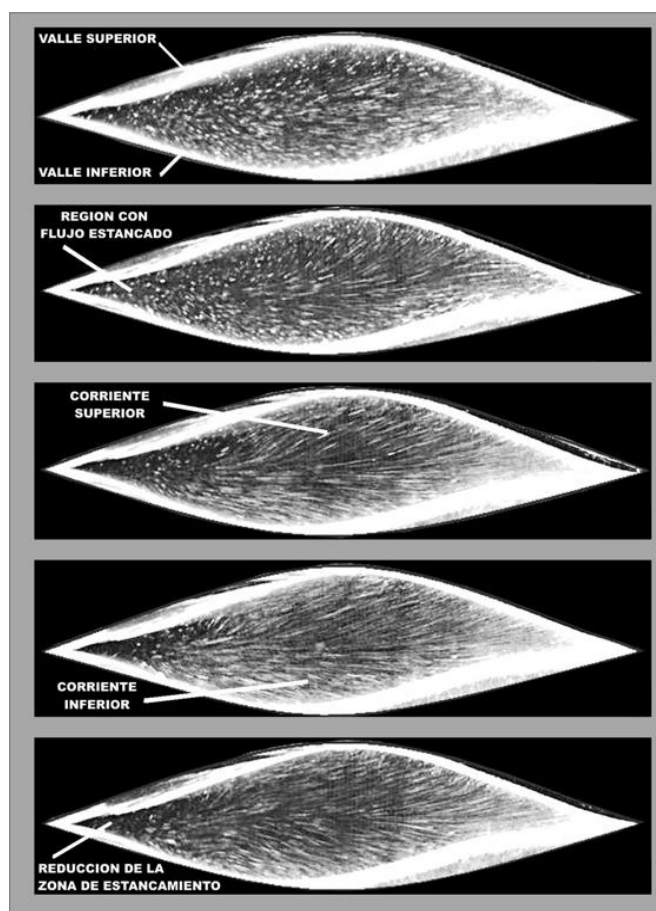


Рисунок 1.12 – Структура течения в пространстве между гофрами [98]

Кроме того, межпластинчатое расстояние также приводит к неравномерности картины течения по всему каналу; нестационарность течения рождается вблизи выхода из канала и движется вверх по течению по мере увеличения числа Рейнольдса.

В работе [99] представлены результаты численного исследования течения внутри решетчатой матрицы, ребрами в которой являются стальные стержни/нити цилиндрической формы. Это еще один весьма технологичный способ создания перекрестного течения в промежутке плоского канала (Рисунок 1.13).

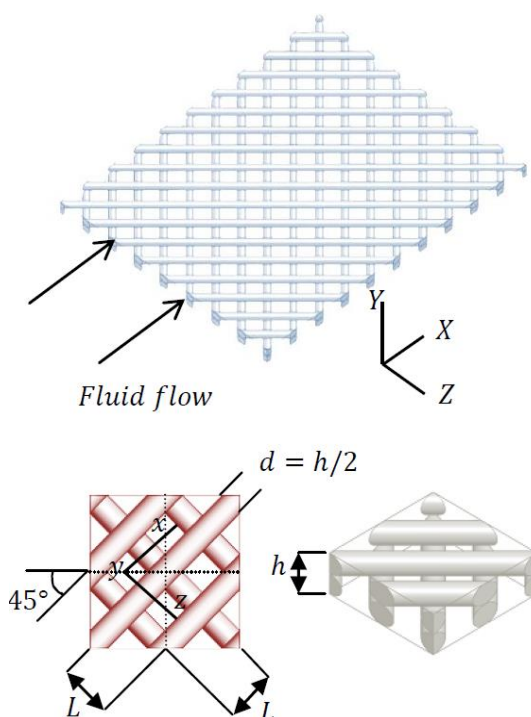


Рисунок 1.13 – Компланарный канал с перекрещивающимися стержнями [99]

В работе были рассчитаны усредненная по времени тангенциальная компонента скорости, линии тока и коэффициент трения на стенке. Рассчитанные усредненные по времени распределения скоростей вдоль центральной линии элементарной ячейки сравнивались с экспериментальными результатами при различных числах Рейнольдса и было получено удовлетворительное совпадение. В работе было установлено, что переход от установившегося течения к нестационарному происходит при числе Рейнольдса около 350.

Как видно на рисунке 1.14 В верхнем и нижнем слоях наблюдались два закрученных против часовой стрелки вихря (первичные вихри), которые

вращаются вместе с основными потоками, т. е. параллельно цилиндрическим ребрам. Кроме того, наблюдались четыре небольших вторичных вихря в углах областей подканалов при  $Re > 350$  в случае, когда течение становится нестационарным.

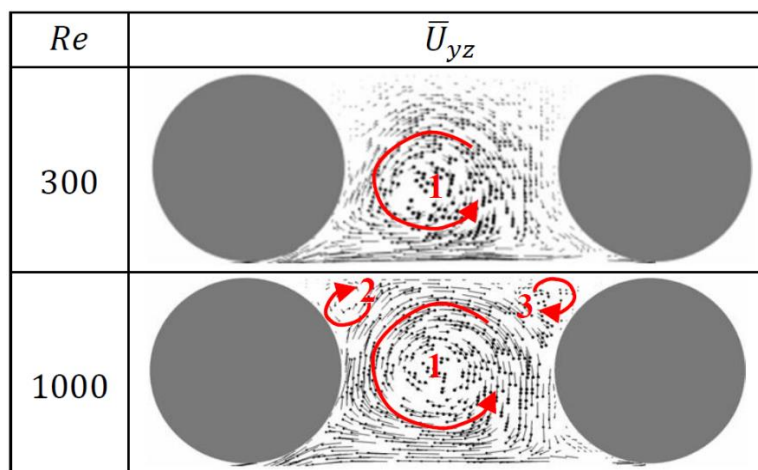


Рисунок 1.14 – Структура течения между цилиндрическими стержнями компланарного канала [99]

При переходе течения из стационарного состояния в нестационарное происходит значительное увеличение интенсивности закрутки. Вполне вероятно, что это может улучшить характеристики теплопереноса в компланарных каналах, выполненных подобным образом. Авторы утверждают, что это первый случай, когда в открытой литературе сообщается о подобных вихревых структурах в охлаждающей матрице.

### Выводы и направления исследований

Главный вывод, который следует сделать из представленного обзора современного состояния проблемы, заключается в том, что практически во всех исследованиях показан высокий (более чем на порядок величины) уровень интенсификации теплообмена в каналах с решетчатыми матрицами. Это означает, что данные устройства имеют высокие потенциальные возможности практического применения в различных областях техники. Подобное заключение

можно сделать и относительно сотовых поверхностей с ячейками гексагональной формы.

Структура течения внутри решетчатых матриц отличается исключительной сложностью и многофакторностью. По этой причине в настоящее время не удастся обобщить имеющиеся результаты экспериментов и численных исследований. К примеру, такой фактор, как форма ребра решетки (плоская, гофрированная, в виде бруска или стержня и т.д.) и его размеры, могут приводить к принципиально иным результатам.

Подавляющее число имеющихся работ посвящено изучению интегральных характеристик, как гексагональных сот, так и решетчатых матриц. В качестве таковых являются степень интенсификации конвективного теплообмена, приrost гидравлических потерь и, как итог, величина теплогидравлической эффективности. Эти параметры важны для проектирования конкретных теплообменных устройств, но их совершенно недостаточно для создания адекватной физической модели, которую можно положить в основу новых численных методов расчета.

Таким образом, после анализа литературных источников было принято решение о проведении систематических экспериментальных исследований локальной трехмерной структуры течения и полей турбулентных пульсаций внутри ячеек гексагональных сот и решетчатых матриц при вариации числа Рейнольдса и геометрии ячеек. Для решетчатых матриц важной частью проводимых работ является измерение локальной теплоотдачи с целью выяснения механизмов теплопереноса, а также решения проблемы однородности поля температур по всей поверхности теплообменника. Кроме того, большой практический интерес представляют и интегральные данные, как по теплообмену, так и гидравлическим потерям.

## ГЛАВА 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ АЭРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА

### 2.1 Экспериментальный стенд и измерительные методики

#### 2.1.1 Метод PIV (цифровая трассерная визуализация)

Для исследования течения в рабочем канале с сотовыми поверхностями была использована хорошо зарекомендовавшая себя в настоящее время измерительная оптическая система – PIV (Particle Image Velocimetry – цифровая трассерная визуализация). Основы метода были заложены в нашей стране в работах Орлова В.В., Перепелицы Б.В. и Хабахпашевой Е.М. (Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН) в семидесятых годах прошлого столетия. С помощью разработанного ими прибора по стробоскопической визуализации течения были получены принципиально новые данные по структуре течения в градиентных и отрывных потоках, при течении вязко-упругой жидкости и пристенной турбулентности [100, 101]. По мере развития вычислительной и лазерной техники этот метод значительно совершенствовался и получил необычайно широкое распространение во всем мире. Метод PIV активно используется в авиа- и автомобилестроении (в промышленных и экспериментальных аэродинамических трубах для диагностики полной картины обтекания элементов летательных аппаратов и автомобилей), машиностроении, энергетике, химической и нефтегазо-добывающей отрасли, и даже в медицине. Данный метод позволяет измерять трехкомпонентные нестационарные поля скоростей в широком диапазоне их изменения и на различных масштабах [102, 103]. Появились новые направления визуализационно-трассерных измерений, в частности SIV (Smoke Image Velocimetry), основанные на высокоскоростной съемке задымленных потоков газа [104].

PIV относится к методам, которые дают возможность получения информации о динамике структур, их масштабов, пространственных и пространственно-временных корреляций и статистических характеристик потока. Основными



преимуществами метода являются бесконтактность, возможность измерения мгновенного распределения скорости во всем поле течения и широкий диапазон измеряемых величин.

В диссертационной работе измерения были выполнены с помощью цифровой камеры "Видеоскан" с разрешением  $1360 \times 1024$  пикселей с матрицей 1 Мпикс. Она позволяла делать парные кадры с частотой 3 Гц минимальным интервалом между кадрами 20 мкс.



Рисунок 2.1 – Фото двух камер "Видеоскан" (слева) и твердотельного импульсного лазера (справа)

Следующим важным компонентом системы PIV был двойной импульсный Nd:YAG лазер мощностью 90 мДж и длиной волны 532.05 нм (зеленый) с длительностью вспышки 5 нс. Он являлся источником мощных коротких импульсов когерентного света в проводимых экспериментах, и состоял из излучателя и системного блока. В излучателе расположены: два лазерных резонатора, два квантрона с активным веществом - YAG:Nd<sup>3+</sup> и лампой накачки, система сведения лучей, преобразователь частоты лазерного излучения и оптический аттенюатор. В системном блоке расположены: источник питания импульсных ламп накачки лазера, система охлаждения лазера и блок управления работой лазера (Рисунок 2.1).

Излучатель и системный блок соединены между собой через разъем гибким рукавом, в котором размещены кабели силового питания, шланги системы охлаждения и сигнальные кабели. Также лазер имеет оптическую насадку, для

создания лазерного ножа. Он создавался в среднем сечении рабочего канала и имел толщину 3 мм.

Оба описанных компонента системы PIV управлялись с помощью синхронизирующего процессора (Рисунок 2.2), который предназначен для синхронизации работы лазера и камеры, отсчета временных интервалов и генерации синхроимпульсов через заданные промежутки времени. Процессор имеет восемь идентичных каналов отсчета временных интервалов, каждый канал имеет выход на передней панели блока. Так же на передней панели имеется вход для обеспечения синхронизации по внешнему импульсу, и сигнальные светодиоды. На задней панели имеется разъем RS232 для управления процессора от персонального компьютера, выключатель питания, и разъем для присоединения сетевого кабеля. Через стандартный интерфейс RS323 (COM-порт) осуществляется управление блоком от персонально компьютера.



Рисунок 2.2 – Внешний вид процессора со стороны передней панели

В качестве трассеров для системы PIV использовались частицы водяного тумана размером около 1 мкм, получаемые с помощью фог-генератора Safex фирмы DANTEC. Туман подавался в смеситель, а из него в компрессор экспериментальной установки.

Измерительная область, получаемая камерой с помощью объектива “Индустар” и удлинительных колец, составляла  $17 \times 20$  мм<sup>2</sup>. Эта область разбивалась на более мелкие расчетные зоны, в которых в дальнейшем проводился расчет векторов скорости, использующий кросс-корреляционный Фурье метод с итерационным алгоритмом. Размер расчетной области составлял

32×32 пикселя при масштабном коэффициенте 15 мкм/пикс. После расчета векторных полей проводилась фильтрация векторов по отношению сигнал/шум и медианным фильтром. После отбора векторов проводилась операция интерполяции векторного поля, после чего рассчитывались осредненные и статистические характеристики. Длина выборки в проводимых экспериментах составляла 4 000 векторных полей.

### **2.1.2 Метод лазерной доплеровской анемометрии**

В диссертационной работе использовался еще один метод оптической лазерной диагностики – лазерный доплеровский анемометр (ЛДА/LDA). Этот метод является незаменимым в том случае, когда из-за сложности исследуемого течения невозможно создать лазерным ножом измерительного поля. В частности, это относится к процедуре измерений полей течения внутри решетчатых матриц, поэтому весь цикл этих исследований был выполнен с помощью LDA.

Лазерная доплеровская анемометрия является широко используемым методом исследования динамики течения газов или жидкостей, который применяется уже на протяжении нескольких десятков лет. Данный метод хорошо себя зарекомендовал в научных и технических работах, так как он позволяет получать информацию о скорости потока среды, о размере частиц в потоке, длине и скорости движущегося проката и т. д. Он применяется для исследования химических реакций, высокотемпературных сред и вращающегося машинного оборудования, при которых сложно или невозможно использовать физические датчики. Для LDA необходимо наличие в потоке частиц-трассеров, что делает его схожим с методов PIV. Но LDA является точечным прибором, измерения его производятся в крайне малом объеме, что несет за собой ряд трудностей при эксплуатации. Однако особые преимущества метода: высокая разрешающая способность по пространству и времени, отсутствие необходимости в калибровке и бесконтактность, делают его конкурентоспособным с другими устройствами для диагностики турбулентных течений. Особенности использования лазер-

доплеровской техники для проведения экспериментов в различных условиях изложены в работах [105-109].

В настоящей работе исследования течения в решетчатой матрице производилось с помощью двухкомпонентного лазер-доплеровского анемометра ЛАД-06С (производство ИТ СО РАН) с адаптивной временной селекцией и визуализацией вектора скорости для прецизионного бесконтактного измерения вектора скорости потоков. Применение адаптивной временной селекции позволяет существенно повысить отношение сигнал/шум и точность измерений, что эффективно в случаях, когда необходимо выделять информацию о компонентах вектора скорости потока при дистанционных измерениях в режиме обратного рассеяния. Структурная схема измерительного устройства выполнена двухканальной с акустооптической коммутацией каналов. Повышенная точность измерений обеспечивается за счет автоматического согласования временной селекции компонент вектора скорости с пространственным распределением рассеивающих частиц в потоке и повышения помехоустойчивости электронной системы обработки сигнала. Система состоит из следующих функционально-логических блоков: оптоэлектронный блок LDA, препроцессор сигнала, доплеровский сигнальный процессор и интерфейса пользователя (программная оболочка). Оптоэлектронный блок и препроцессор сигнала реализованы в виде моноблока, внешний вид которого представлен на рисунке 2.3. Излучающая часть LDA использует полупроводниковый лазер, имеющий малые габариты и большой КПД. Приемная часть содержит фотоэлектрический усилитель, высокое напряжение на котором регулируется препроцессором в соответствии с командами от персонального компьютера. Кроме этого, препроцессор, реализованный на FPGA-технологии, реализует алгоритмы детектирования вспышек (фрагментирования данных), изменяет эффективную дискретизацию (усреднение с регулируемым коэффициентом) и управляет предварительным усилением сигнала в каналах на основе установленных параметров. При помощи коммуникационного модуля препроцессор упаковывает данные в пакеты и передает их на компьютер по Ethernet кабелю.



Рисунок 2.3 – Фото моноблока ЛАД-06С

Блок LDA установлен на трехкомпонентном координатно-позиционирующем устройстве (Рисунок 2.4), которое управляется компьютером.

Основные технические данные и характеристики LDA системы:

- диапазон измеряемых скоростей – до 100 м/с;
- перемещение зондирующего поля – 250 мм по трем координатам;
- шаг перемещения зондирующего поля – 0.1 мм;
- размер зондирующего оптического поля –  $0.05 \times 1$  мм<sup>2</sup>;
- максимальная частота коммутации измерительных каналов – 300 кГц.

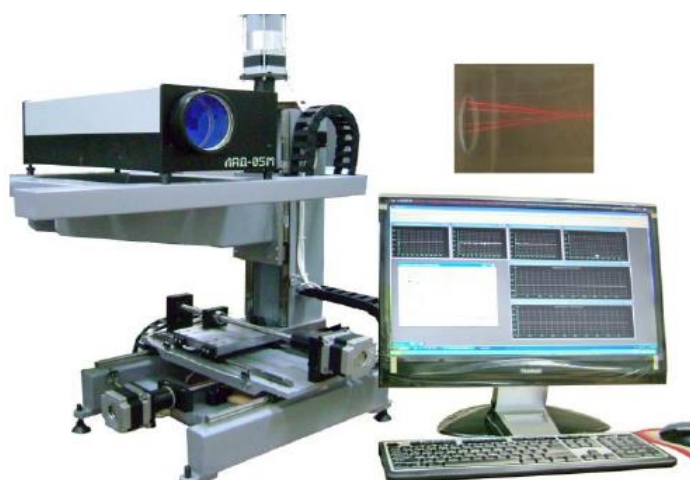


Рисунок 2.4 – Лазерная доплеровская измерительная система ЛАД-06С

Представленный оптический метод LDA имеет неоспоримое преимущество перед PIV в виде возможности изучать параметры и структуры потока газа в конструкциях сложной формы, таких как сотовые ячейки или ячейки компланарных каналов. В них использование PIV затруднено или вовсе невозможно, а применение контактных методов, таких как трубка Пито-Прандтля

или термоанемометр также затруднено в связи вносимыми ими в поток возмущениями, что делает их использование бессмысленным. Тем не менее, оба представленных оптических метода очень хорошо себя показали, а полученные ими результаты имеют хорошее качественное совпадение, что будет продемонстрировано в третьей главе.

### 2.1.3 Экспериментальный стенд для исследования обтекания поверхностей с сотовыми ячейками

Для проведения исследований рабочий канал с сотовыми поверхностями устанавливался на стенде, имеющем все элементы аэродинамической трубы для создания качественного потока: форкамеру, сопло и рабочий канал. Для создания потока в канале используется вентилятор среднего давления 1 ВР 280-46 с трехфазным двигателем мощностью 1.5 кВт с частотой вращения 3 000 об/мин. Схему стенда можно увидеть на рисунке 2.5. В настоящих опытах изучалось развитие течения по всей длине сотовой пластины, а также до и после нее в диапазоне чисел Рейнольдса от  $1 \times 10^4$  до  $4.6 \times 10^4$ ; к началу сотовой пластины течение было развитым. Рабочей средой являлся воздух комнатной температуры, которая измерялась электронным термометром ИТ-7 Рэлсиб Pt 1000.

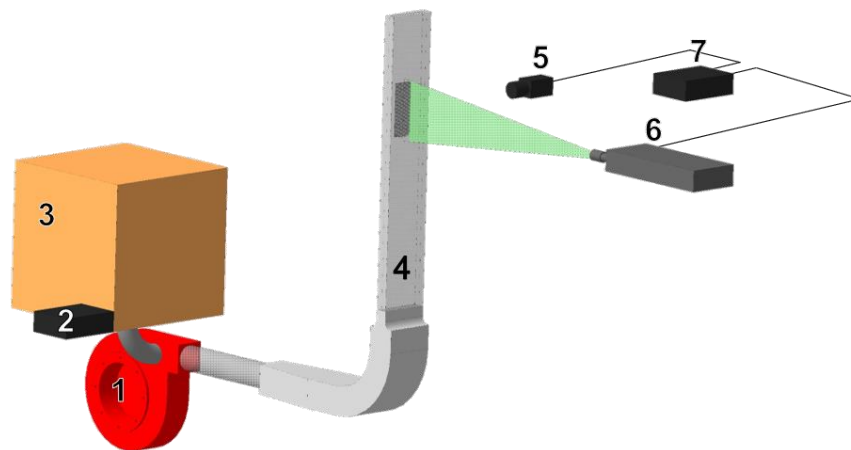


Рисунок 2.5 – Схема экспериментального стенда для исследования течения в канале с сотовыми поверхностями. Состав: 1 – вентилятор; 2 – генератор аэрозоля; 3 – смеситель; 4 – рабочий канал; 5 – цифровая камера; 6 – импульсный твердотельный лазер; 7 – синхронизирующий процессор

Рабочий канал имел прямоугольное сечение с геометрическими параметрами  $20 \times 150 \times 1000$  мм<sup>3</sup> и был выполнен из оптически прозрачного материала толщиной 8 мм. Поперечные размеры входного канала подбирались из условий обеспечения двумерного течения в центральном продольном сечении канала.

На расстоянии 580 мм от входа в канал заподлицо монтировались четыре пластины размером  $58.2 \times 182$  мм<sup>2</sup> с шестиугольными ячейками. Высота сот была равной 2,4, 6, 12 и 24 мм. Они были изготовлены на 3D-принтере из PLA-пластмассы и имели толщину стенок 0,5 мм. Характерные размеры сот указаны в левой части рисунка 2.6 и в таблице 2.1.

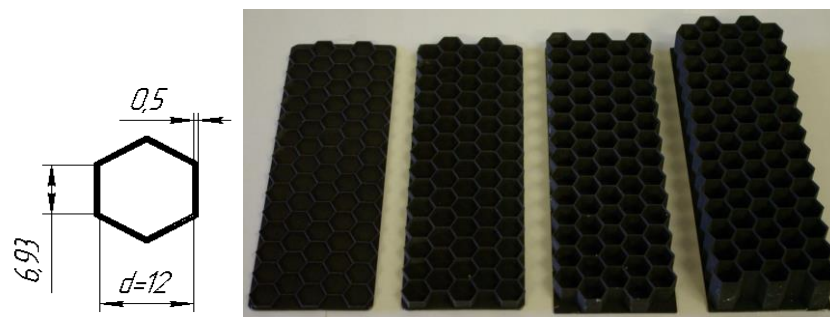


Рисунок 2.6 – Геометрические размеры гексагональной сотовой ячейки (слева) и фото четырех опытных участков (справа)

Таблица 2.1. Основные параметры рабочих участков гексагональных сот

Участок №	Материал	Длина, мм	Ширина, мм	Размер ячейки d, мм	Толщина стенки, мм	Глубина ячейки, мм
1	PLA-пластмасса	182	58.4	12	0.5	2,4
2	PLA-пластмасса	182	58.4	12	0.5	6
3	PLA-пластмасса	182	58.4	12	0.5	12
4	PLA-пластмасса	182	58.4	12	0.5	24

Исследование течения потока с помощью метода PIV проводилось в нескольких сечениях опытного канала с размещенными внутри него поверхностями с сотовыми ячейками. Всего было десять точек измерений с интервалом 15 мм между точками с III по VII, и 30 мм между точками с I по III и с VII по X. Схема расположения измерительных сечений показана на рисунке 2.7.

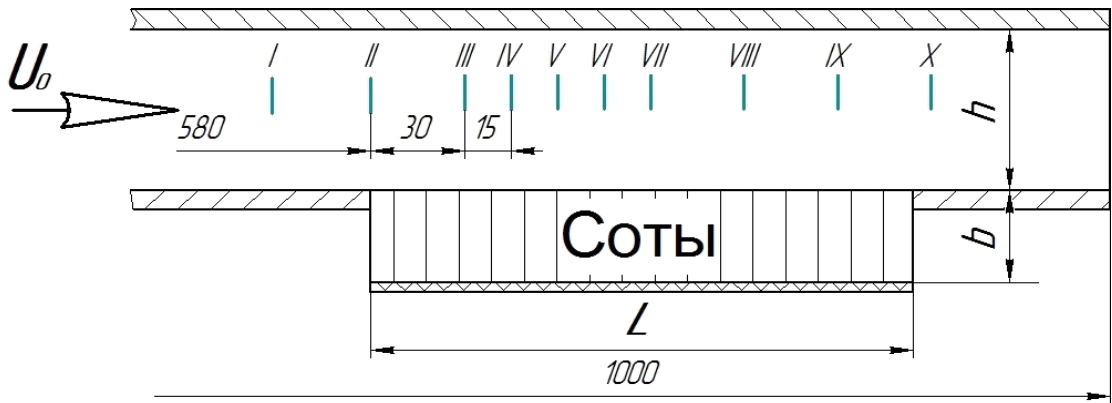


Рисунок 2.7 – Схема расположения сечений внутри рабочего участка с сотовой поверхностью, в которых проводились измерения системой PIV

Основным недостатком представленного метода является невозможность увидеть структуру течения газа внутри сотовых ячеек из-за их непрозрачности. Также из-за отражения лазерного ножа даже от матово черных экспериментальных сотовых участков вблизи исследуемой поверхности появлялись световые блики, что приводило к невозможности получения данных об течении газа в непосредственной близости от верхней и нижней стенок рабочего участка. Поэтому для исследования потока внутри гексагональных ячеек был применен лазерный доплеровский анемометр.

#### 2.1.4 Экспериментальный стенд для исследования аэродинамики и теплообмена в вихревой матрице

Для исследования локальных аэродинамических эффектов внутри компланарных каналов была создана специальная экспериментальная установка, которая состоит из вентилятора высокого давления с расходом воздуха до 0.9 кг/сек (перепад 9 000 Па), управляемого частотным регулятором и аэродинамической трубы. Ее входной участок перед рабочим каналом был выполнен из стальных листов и покрыт полимерной краской. Вход состоит из переходника, диффузора, поворотного колена, участка отбора давления и конфузора. Последний имел форму Витошинского со степенью поджатия потока равному  $K = 5.8$  (Рисунок 2.8). Вентилятор имеет систему обратной связи через электронный дифференциальный манометр ДМ-2, обеспечивающим поддержание



заданных расходных характеристик потока. Поток, подаваемый вентилятором, засеивался частицами глицерина размером около 1 – 1.5 мкм, которые в условиях эксперимента являлись трассерами для измерительной системы LDA и хорошо отслеживали поток.

Опытные участки вихревых матриц имеют длину 400 мм, ширину  $a$  150 мм и высоту  $h$  20 мм. Материалом, из которого сделаны стенки основного канала и боковые стенки рабочих участков, в которых крепились ребра, является текстолит. Ребра, которые образуют компланарные каналы, выполнены из стали толщиной 1 мм и шириной 10 мм, шаг между ребрами был равен 15 мм. Они покрыты тонким слоем покрыты пластмассы черного цвета, тем самым уменьшая интенсивность бликов при изучении аэродинамики.

Всего в экспериментах использовались три рабочие модели с различными значениями угла между пересекающимися ребрами на противоположных стенках канала  $2\beta$  равному  $60^\circ$ ,  $90^\circ$  и  $120^\circ$ . В аэродинамических исследованиях стенки экспериментального канала были выполнены из оптически прозрачного материала – органического стекла.

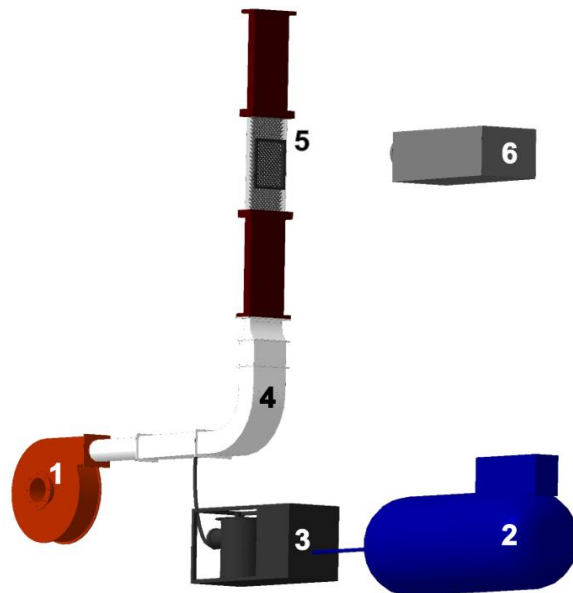


Рисунок 2.8 – Экспериментальный стенд для исследования аэродинамики внутри компланарных каналов. Состав: 1 – вентилятор высокого напора; 2 – компрессор поршневой; 3 – генератор аэрозоля; 4 – входной участок; 5 – экспериментальный участок; 6 – блок LDA

Анализ литературы по данной тематике позволил получить информацию об одних из наиболее исследуемых и используемых на практике углах скрещивания ребер  $2\beta$ , которые образуют компланарные каналы. Ими оказались углы  $60^{\circ}$ ,  $90^{\circ}$  и  $120^{\circ}$ . На рисунке 2.9 представлены фото экспериментального стенда с одним из экспериментальных участков для исследования аэродинамики.



Рисунок 2.9 – Фото экспериментального аэродинамического стенда

На рисунке 2.10 изображены исследуемые в настоящей диссертации рабочие участки, которые различаются только углом скрещивания.



Рисунок 2.10 – Фото трех рабочих участков с компланарными каналами для изучения локальной аэродинамики в вихревых ячейках

Очевидно, что из-за особенностей расположения ребер компланарных каналов изучение течения потока в подканалах, образованных пересекающимися ребрами, является весьма затруднительным. По этой причине все измерения были проведены с помощью LDA. В то же время, использование глицериновых частиц как трассеров для оптического метода приводило к загрязнению рабочего тракта и ухудшению видимости. Поэтому было решено в каждом из опытных образцов вихревых матриц сделать отверстие для металлического окна, в котором размещалось прозрачное стекло толщиной 3 мм (Рисунок 2.9). Окна были выполнены на обеих широких стенках рабочих участков для более простой и качественной очистки канала от конденсирующих частиц. Чистка проводилась после каждого проведенного эксперимента.

Для исследования теплообмена в вихревых матрицах были сконструированы четыре экспериментальных тепловых участка: три с вихревыми матрицами с  $2\beta$  равным  $60^\circ$ ,  $90^\circ$  и  $120^\circ$  и один гладкий канал. Последний использовался для непосредственного сопоставления и обработки данных в относительном виде. Кроме того, для сопоставительного анализа проводились эксперименты, когда ребра присутствовали только на одной из стенок.

Нагревательным элементов в тепловых участках является стальная фольга толщиной 100 мкм, которая размещалась между ребрами компланарных каналов и текстолитовыми стенками. Нагрев производился обеих сторон канала источником питания постоянного тока, который позволял поддерживать на получившихся стальных стенках вихревой матрицы постоянный тепловой поток (Рисунок 2.11). Каждый нагреваемый участок имел размеры  $150 \times 360$  мм<sup>2</sup>. Распределение температуры на их поверхности фиксировалось с помощью тепловизионной камеры фирмы Testo 890-2 и набора термопар, которые размещались в нижней и верхней частях каждого теплового участка.

Текстолитовые стенки были расположены с обеих сторон вихревых матриц, надежно удерживая в натянутом состоянии фольгу и прижимая ее к ребрам матриц. В каждой из стенок было проделано сквозное окно размерами  $130 \times 180$  мм<sup>2</sup> для изучения распределения температуры по поверхности

нагреваемой фольги. Через окна стальная фольга покрывалась тонким слоем термостойкой краски черного цвета, чтобы убрать отражательную способность стального покрытия. Коэффициент теплового отражения краски был равен 0.96, что учитывалось при обработке опытных данных.

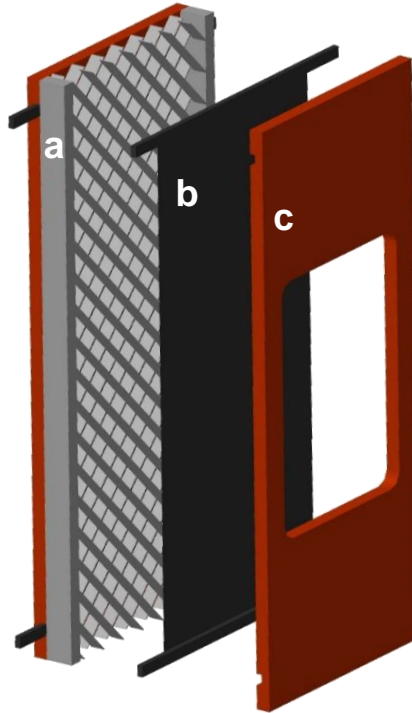


Рисунок 2.11 – Модель теплового экспериментального участка. Состав: (a) – компланарные каналы, (b) – стальная фольга, (c) – текстолитовая стенка с окном для тепловизионных измерений

Исследования проводились в диапазоне чисел Рейнольдса  $3.1 \times 10^3 - 7 \times 10^4$ . При этом тепловые утечки за счет свободной конвекции и излучения, которые, как правило, не превышали 15%, определялись расчетным методом и учитывались при обработке опытных данных.

### 2.1.5 Методика тепловизионных измерений

Для измерения распределения температуры по поверхности теплового рабочего участка использовался тепловизор Testo 890-2 (0563 0890 X1).

Он позволял делать одиночные снимки и получать термограммы в разрешении  $1280 \times 960$  пикселей, которые в дальнейшем обрабатывались с использованием программного продукта, разработанного в Институте теплофизики им. С.С.

Кутателадзе СО РАН. Основные характеристики тепловизионной камеры представлены в таблице 2.2.



Рисунок 2.12 – Изображение тепловизионной камеры

Таблица 2.2 Технические характеристики тепловизионной камеры Testo 890-2 (0563 0890 X1)

<b>Инфракрасное изображение</b>	
Тип детектора	FPA 640×480 пикселей, a.Si
Температурная чувствительность (NETD)	< 40 мК при 30°C
Оптическое поле зрения / мин. фокусное расстояние	42°×32° / 0.1 м (стандартный объектив), 15°×11° / 0.5 м (телеобъектив)
Пространственное разрешение (IFOV)	1.15 мрад (стандартный объектив), 0.42 мрад (телеобъектив)
SuperResolution (пиксели / IFOV) - опция	1 280×960 пикселей / 0.72 мрад (стандартный объектив), 0.26 мрад (телеобъектив)
Частота обновления кадра	9 Гц
Фокусировка	автоматическая / ручная
Спектральный диапазон	8 ... 14 мкм
<b>Реальное изображение</b>	
Размер изображения / мин. фокусное расстояние	3.1 мегапикселей / 0.5 м
<b>Представление изображения</b>	
Дисплей	сенсорный ж/к дисплей 4.3"; 480×272 пикселей
Цифровое масштабирование	1-3х кратное увеличение снимка
Варианты отображения	инфракрасное / реальное изображение
Видеовыход	USB 2.0
Цветовая палитра	8 вариантов (iron, rainbow, cold-hot, blue-red, grey, inverted grey, sepia, Testo)
<b>Измерение</b>	
Температурный диапазон	-20°C ... 100°C / 0 ° ... 350°C (переключаемый)
Измерение высоких температур - опция	-
	+350°C ... +1.200°C
Коэффициент излучения /настройка температурной компенсации отражения	0.01 ... 1 / ручная настройка



Рисунок 2.13 – Фото тепловизионной камеры Testo 890-2 и теплового участка

Тепловизор закреплялся на специальной платформе, которая позволяла размещать его на любом расстоянии от теплового участка и фиксировать под любым углом. При проведении экспериментов он устанавливался так, чтобы площадь основного объектива находилась параллельно площади нагревательного элемента и напротив середины опытного участка с компланарными каналами (Рисунок 2.13).

### 2.1.6 Дифференциальный электронный манометр ДМ-2

Для определения гидравлических потерь как на участке с сотовыми поверхностями, так и с вихревой матрицей, использовался дифференциальный манометр ДМ-2 отечественного производства. Потери определялись по разности статического давления до и после экспериментальной секции. Отбор давления производился через специальные отверстия диаметром 0.8 мм, расположенные на расстоянии 200 мм до участка и 200 мм после него. Тем самым устранялось влияние возможных возмущений турбулентного потока на величину статического давления. Поскольку в работе определялась относительная величина гидравлических потерь, то вклад участков 200 мм до и после матрицы в общие потери специально не рассчитывался.

## 2.2 Неопределенность измерений используемого оборудования

В таблице 2.3 представлены данные по неопределенности измерений используемого в экспериментах измерительного оборудования. Все материалы по достоверности измерений были взяты из технической сопроводительной документации приборов или рассчитывались по известным методикам [110].

Таблица 2.3 Значение неопределенности измерительного оборудования

Прибор	Диапазон измерений	Максимальная погрешность измерений
Термометр электронный IT-7 Рэлсиб Pt 1000	-70...200 <sup>0</sup>	±0,5 <sup>0</sup> С
Тепловизионная камера Testo 890-2 (0563 0890 X1)	-30...100 <sup>0</sup> С	±2 <sup>0</sup> С
Манометр электронный дифференциальный ДМ-2	100,1...2000 Па	±5%
Лазер-доплеровский анемометр ЛАД-06С	0...100 м/с	±0.5%
Термопара хромель-копель	-100...+100 <sup>0</sup> С	±2.5%
Источник питания АКПП-1135- 6-400	1...3 000 Вт	±0.01%

### Выводы по второй главе

Результаты проведенных экспериментов, полученные перечисленной в данной главе измерительной аппаратурой, представлены в работах [51, 52, 111-115]. Опыты по исследованию структуры течения газа в канале с сотовыми поверхностями, а также по исследованию аэродинамики и теплообмена в компланарных каналах, были проведены неоднократно и каждый раз результаты измерений качественно и количественно совпадали (с учетом погрешности измерений). Данный факт говорит о повторяемости исследуемых эффектов, что крайне важно при проведении физических экспериментов серьезного уровня.

## ГЛАВА 3 СТРУКТУРА ТЕЧЕНИЯ В КАНАЛЕ С СОТОВЫМИ ЯЧЕЙКАМИ ГЕКСАГОНАЛЬНОЙ ФОРМЫ

### 3.1 Особенности течения потока при обтекании сотовой поверхности

Как указывалось выше, одной из особенностей обтекания поверхностей с сотовыми ячейками является эффект проскальзывания потока (ненулевая скорость на верхней границе сот), который был обнаружен С.А. Трдатьяном и др. [1-4]. По данным авторов, этот режим характерен снижением трения и теплообмена по причине формирования в ячейках периодической вихревой структуры, которая позволяет уменьшить взаимодействие между потоком среды и поверхностью с сотами. Эффект ослабленного взаимодействия между потоком и поверхности был обнаружен также при течении в канале с демпфирующими полостями (резонаторами Гельмгольца) [44-48]. Схематическое изображение полостей с одним или несколькими отверстиями представлено на рисунке 3.1. При обтекании поверхности в резонаторе Гельмгольца образуется некое подобие воздушного амортизатора, который приводит к уменьшению контакта между газом и стенкой, что влечет за собой снижение коэффициента сопротивления (до 35%), как утверждается в работах [46-48].

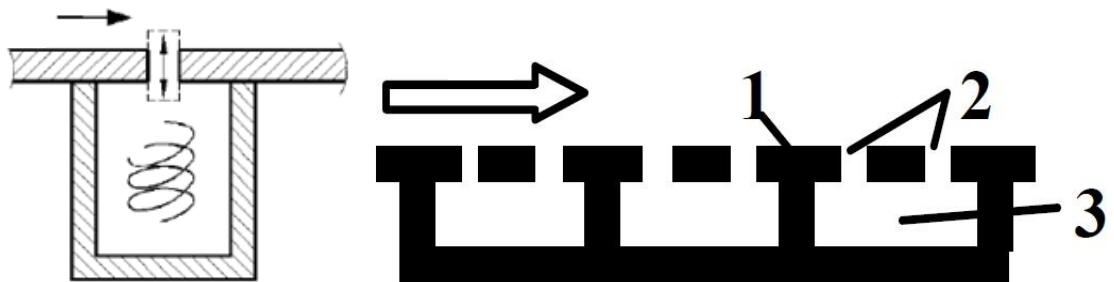


Рисунок 3.1 – Схема перфорированной поверхности с демпфирующими полостями (резонаторами Гельмгольца) [45-48], обтекаемой газовым потоком:

1 – перфорированная поверхность; 2 – отверстия; 3 – демпфирующая полость

Считается, что при правильном выборе геометрии сотовых ячеек и параметров натекающего потока можно добиться подобного эффекта и на поверхностях с сотами. Идея состоит в том, что обтекание гексагональных ячеек приводит к



образованию в них вихревых структур, приводящих к уменьшению взаимодействия между потоком газа и сотовой поверхности.

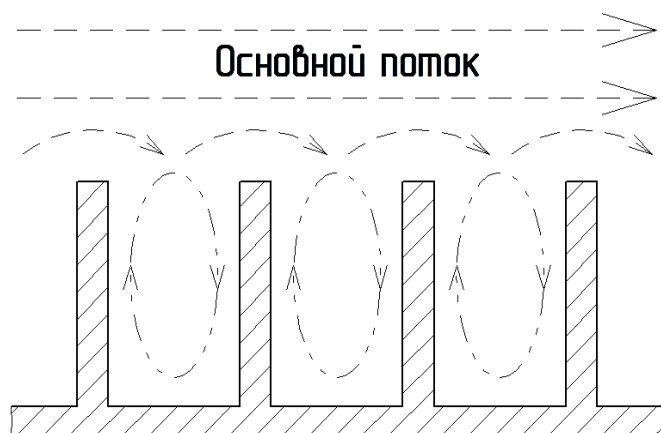


Рисунок 3.2 – Схематическое изображение эффекта проскальзывания потока на сотовой поверхности

Схематичное изображение процесса обтекания сот представлено на рисунке 3.2. По этой причине детальные исследования структуры турбулентного течения могут дать дополнительную информацию для более глубокого понимания механизма обменных процессов при обтекании сотовых поверхностей.

В опытах использовались четыре экспериментальных участка (их основные параметры представлены во второй главе на рисунке 2.6 и таблице 2.1). Геометрические размеры ячеек были аналогичны сотам из работ [39, 40], в которых сотовые поверхности исследовались как уплотнения для турбинных установок. На рисунке 3.3. проиллюстрированы трехмерная модель и фото одного из рабочих участков с гексагональными сотами. Каждый из опытных образцов имел 70 ячеек с диаметром вписанной окружности 12 мм. Одной из задач было изучить влияние сотовых ячеек с различной глубиной на поле течения и гидравлическое сопротивление.

Для исследования течения потока в канале с сотовыми структурами была применена оптическая система PIV, которая подробно описана во второй главе.

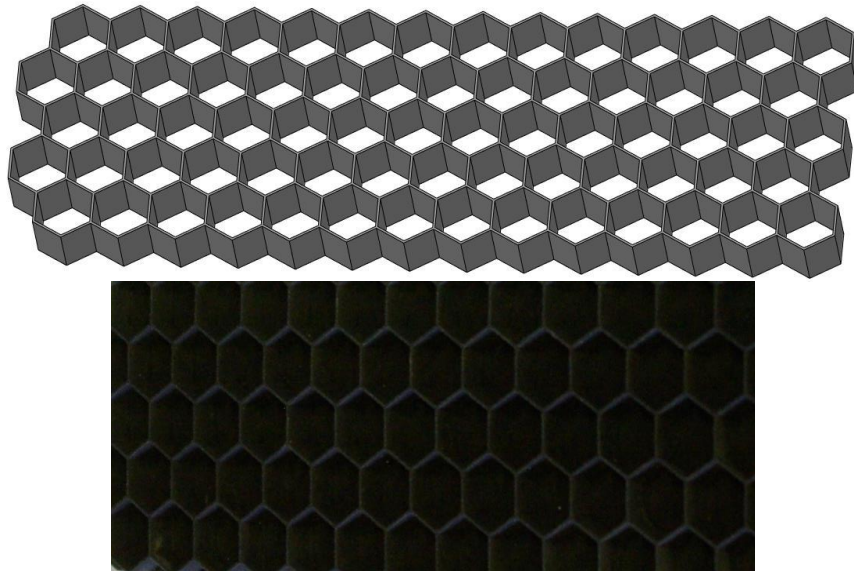


Рисунок 3.3 – 3D-модель (сверху) и фото (снизу) сотовой поверхности с глубиной ячеек 6 мм

Импульсный лазер размещался так, что лазерный нож находился на оси рабочего канала, а цифровая камера могла «захватывать» большие участки экспериментальной модели, что позволяло построить поля скоростей над несколькими ячейками сот. Но, как и описывалось ранее, PIV-система не могла зафиксировать течение внутри сот из-за их непрозрачности. И помимо этого, применение лазерного ножа приводило к образованию бликов на поверхности верхней и нижней стенок опытного канала, несмотря на матовое черное покрытие сотовых поверхностей и полное отсутствие посторонних источников света в помещении в момент проведения эксперимента. Наличие бликов влекло за собой невозможность получения достоверных данных по распределению скорости вблизи стенок канала и сотовой структуры.

Измерения с помощью метода PIV были проведены в десяти сечениях (Рисунок 2.7) рабочего тракта как с гладкими стенками, так и размещенными заподлицо поверхностям с ячейками. Расстояние между точками измерения от начала сотовой пластины изображены на рисунке 3.4.

Результаты исследования течения в канале с сотовыми поверхностями различной глубины представлены на рисунке 3.5. Профили скоростей измерялись по всей высоте канала.

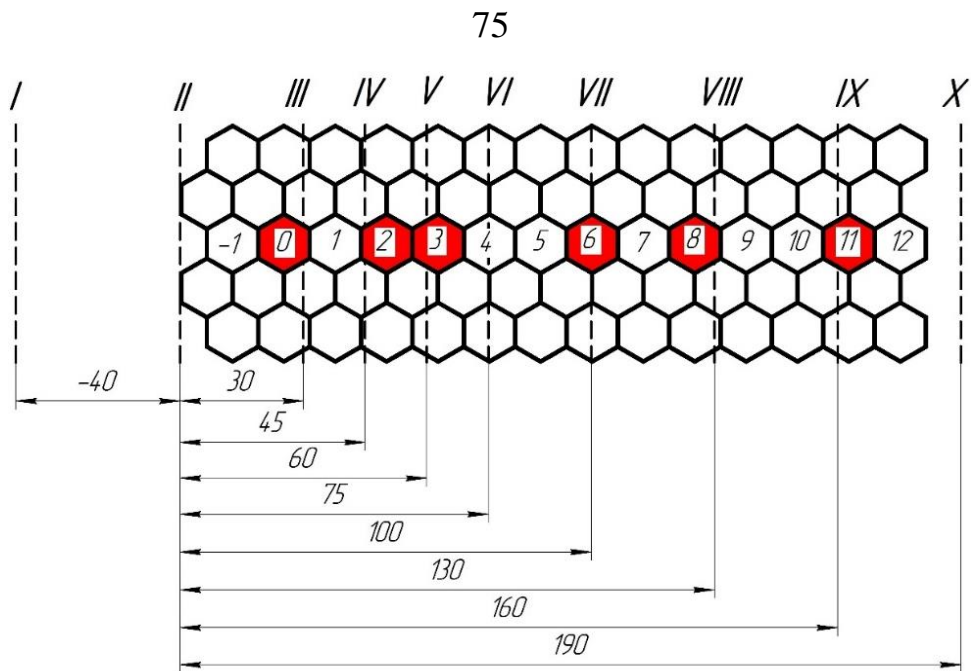


Рисунок 3.4 – Расположение сечений, в которых проводилось измерение параметров потока. Красным цветом отмечены ячейки, которые попали под измерения PIV-системы

На первом графике Рисунок 3.5а показано распределение безразмерной продольной скорости в сечении  $z/h = 6.5$  (130 мм от начала сотовой поверхности) для гладкого канала и канала с четырьмя вариантами сотовых структур. На рисунке видно, что профиль скорости в гладком канале является симметричным относительно середины высоты канала. При установке сотовой поверхности даже с минимальной глубиной ячеек ( $b = 2.4$  мм) вносимые возмущения приводят к меньшей заполненности профиля скорости вблизи границы сот. Профили продольных (Рисунок 3.5b) и поперечных пульсаций (Рисунок 3.5c) подтверждают данный эффект – пульсации на сотовых поверхностях значительно выше, чем на гладкой стенке. Особенно сильно выделяются соты с глубиной с малой глубиной ( $b = 2.4$  мм), когда продольные и поперечные пульсации могут достигать значения в 18% и 11% от максимальной скорости основного потока, соответственно. У остальных опытных моделей наблюдается меньшее вносимое в поток возмущение, но представленные данные говорят, что исследуемые сотовые поверхности приводят также к возмущению потока.

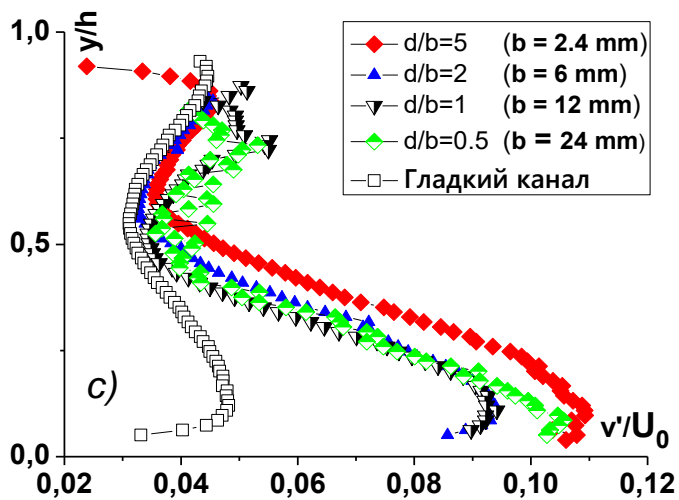
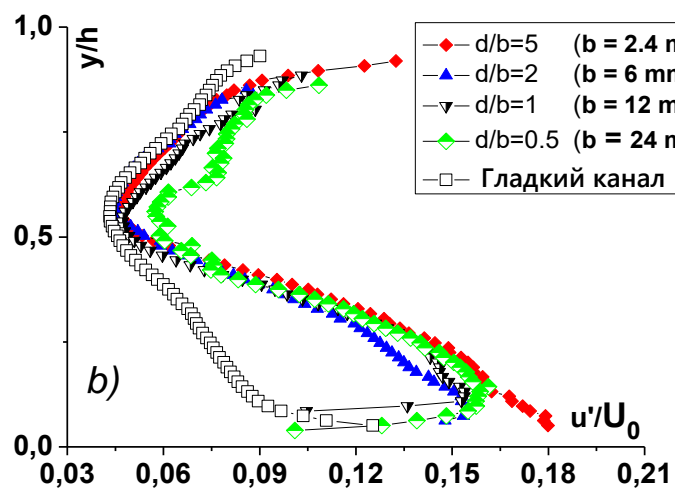
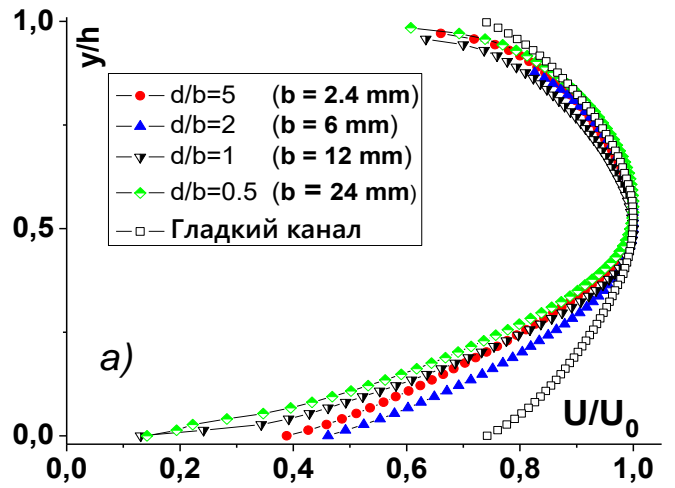


Рисунок 3.5 – Профили безразмерной: а) продольной скорости, б) продольных пульсаций и с) поперечных пульсаций для гладкого канала и канала с сотовыми участками при  $Re_D$  равном  $2.3 \times 10^4$

Можно сделать вывод, что гексагональные ячейки с геометрическими параметрами, аналогичными сотам из работ [39, 40], являются сильными локальными турбулизаторами потока. Для сравнения полученных распределений скорости с имеющимися в литературе данными были использованы данные работ [1-4, 41-43]. Автором U. Butt был проведен ряд экспериментов по изучению обтекания пластины и цилиндра с выпуклой или вогнутой конфигурацией сотовой поверхности [41-43] при числе  $Re$  от  $7.2 \times 10^5$  до  $1.0 \times 10^6$ . Его исследования, проведенные с помощью термоанемометра и интерференции масляной пленки для измерения поверхностного трения, подтверждают результаты визуализации, указывая на пики на профилях пульсаций скорости (Рисунок 3.7b). В случае внешнего обтекания цилиндра с выдавленными наружу сотовыми ячейками наблюдается снижение коэффициента аэродинамического сопротивления примерно в 0.65 раза по сравнению с гладким. Подобные эффекты наблюдались при обтекании сфер и цилиндров при нанесении на их поверхность лунок [116-118].



Рисунок 3.6 – Схема обтекания сот и фото опытных цилиндров с вогнутыми и выпуклыми сотовыми поверхностями [41-43]

На рисунке 3.7 представлены результаты сопоставлений безразмерных продольной средней (Рисунок 3.7a) и пульсационной скорости (Рисунок 3.7b) по высоте канала в гексагональной ячейке различной геометрии. Как видно, полученные различными авторами данные качественно подобны между собой, а имеющееся несовпадение объясняется отличием в геометрии сот.

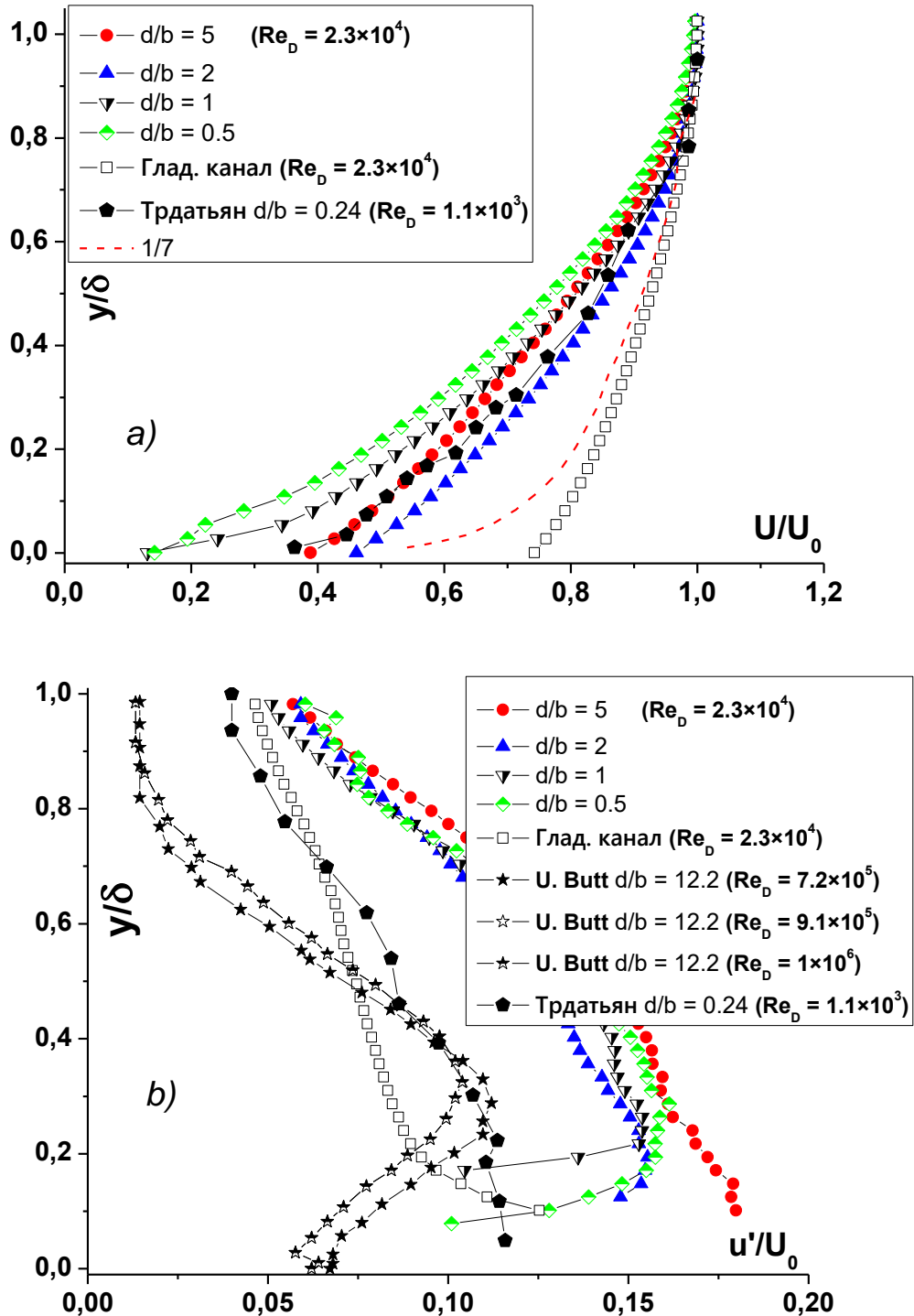


Рисунок 3.7 – Профили безразмерных (а) продольных средних и (б) турбулентных пульсаций в пограничном слое над сотовыми ячейками

Особенно отличается профиль над участком с глубиной ячеек 6 мм ( $d/b = 5$ ), который имеет хорошее совпадение с профилем над пластиной с глубиной и диаметром ячеек равных 21 и 5 мм, соответственно. Тем не менее, все

представленные профили продольной скорости являются менее заполненными по сравнению с профилем, полученным в канале с гладкими стенками.

В то же время, картина распределения продольных пульсаций скорости основного потока (Рисунок 3.7b) показывает, что в работах [1-3] интенсивность пульсаций по своему значению не превышает пульсации над сотовыми поверхностями с  $d/b = 12.2$  из работ U. Butt [41-43]. Следует отметить, что характер распределения продольных пульсаций качественно похож на профили пульсаций, полученные авторами настоящей диссертации, что говорит на схожий сценарий развития течения над сотовыми структурами подобного типа. Одним из важных выводов, следуемых из анализа Рисунок 3.7b, заключается в том, что уровень пульсаций в настоящей работе заметно выше, чем в имеющихся в литературе исследованиях. Возможные причины такого поведения данных обсуждались выше.

Метод PIV не позволяет проводить измерения внутри сот. Поэтому в этой серии экспериментов не удалось измерить величину скорости скольжения на границе сот. Для этих целей был использован оптический метод LDA, лазерные лучи которого ориентировались нормально к сотовой поверхности. Это позволяло достоверно определять две ортогональные компоненты скорости как по сечению канала, так и внутри сот.

Результаты сопоставления данных, полученных методом PIV и LDA, демонстрируются на серии рисунков 3.8. при вариации глубины сот и в ячейках максимально приближенных ко входу и выходу из канала. Как следует из рисунка 3.8, наблюдается хорошая корреляция полученных данных по высоте канала с помощью этих двух методов измерения для всех изученных случаев. Естественно, что совпадения имеют место только в промежутке между верхней стенкой и границей сот; внутри же сот измерения проведены только методом LDA.

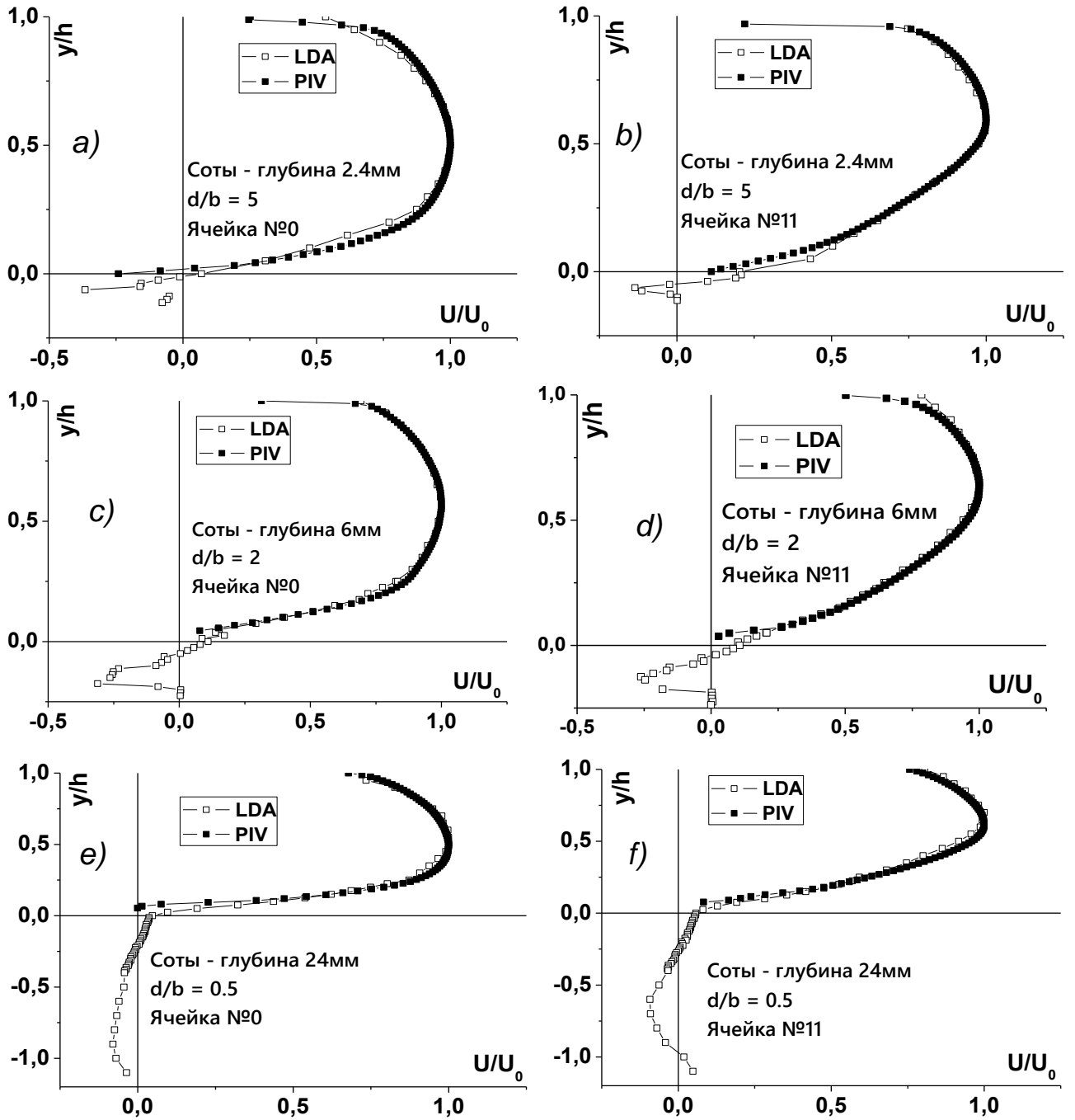


Рисунок 3.8 – Сравнение профилей безразмерной продольной скорости потока вдоль сотовых поверхностей с различной глубиной над ячейками №0 и №11 (Рисунок 3.4), полученных с помощью системы PIV и метода LDA

Профили скорости на серии рисунков 3.8e-f наглядно показывают, что измерительная система LDA позволяет получать информацию о локальных параметрах потока от верхней стенки опытного канала до дна гексагональных ячеек.



На первом этапе экспериментальной программы исследовался профиль скорости по центру трех ячеек № 0, 6 и 11, расположенных на различном расстоянии от входа в канал (Рисунок 3.2). Измерения проведены при постоянном числе Рейнольдса  $Re_D = 2.3 \times 10^4$ . Различие вихревых структур в центрах ячеек № 0, 6 и 11 с разной глубиной наглядно демонстрируется на рисунке 3.9. Во всех трех изученных случаях внутри сот существует область возвратного течения, масштаб и интенсивность которого зависит от глубины сотовой ячейки. Максимальная скорость рециркуляционного течения реализуется в сотах глубиной 6 мм, причем ее значение достигает ~30% от скорости в ядре потока. Эта величина примерно соответствует данным для отрывного течения внутри каверн, что говорит в пользу общности механизмов переноса в отрывных потоках [35].

Значительных отличий в структуре отрывных течений для различных местоположений сотовых ячеек, как это видно на рисунке 3.9 не наблюдается. Логично предположить, что в каждой из гексагональных сот находится подобная вихревая структура, которая является результатом воздействия стенок сотовых ячеек с набегающим потоком воздуха, а интенсивность перемешивания зависит от глубины, и, возможно, скорости потока. Поэтому для более детального изучения вихревой структуры внутри ячейки с разной глубиной, было решено выбрать ячейку № 6, которая исследовалась LDA по оси основного канала с шагом 1 мм.

Схема расположения измерительных точек представлена на рисунке 3.10. Измерения с помощью LDA были проведены в 12 точках четырех сотовых ячеек различной глубины. В ходе экспериментов были получены данные по распределению профиля скорости внутри гексагональных сот, которые подтверждают ранее сделанный вывод о том, что интенсивность вращения вихря внутри сотовой ячейки зависит от ее глубины.

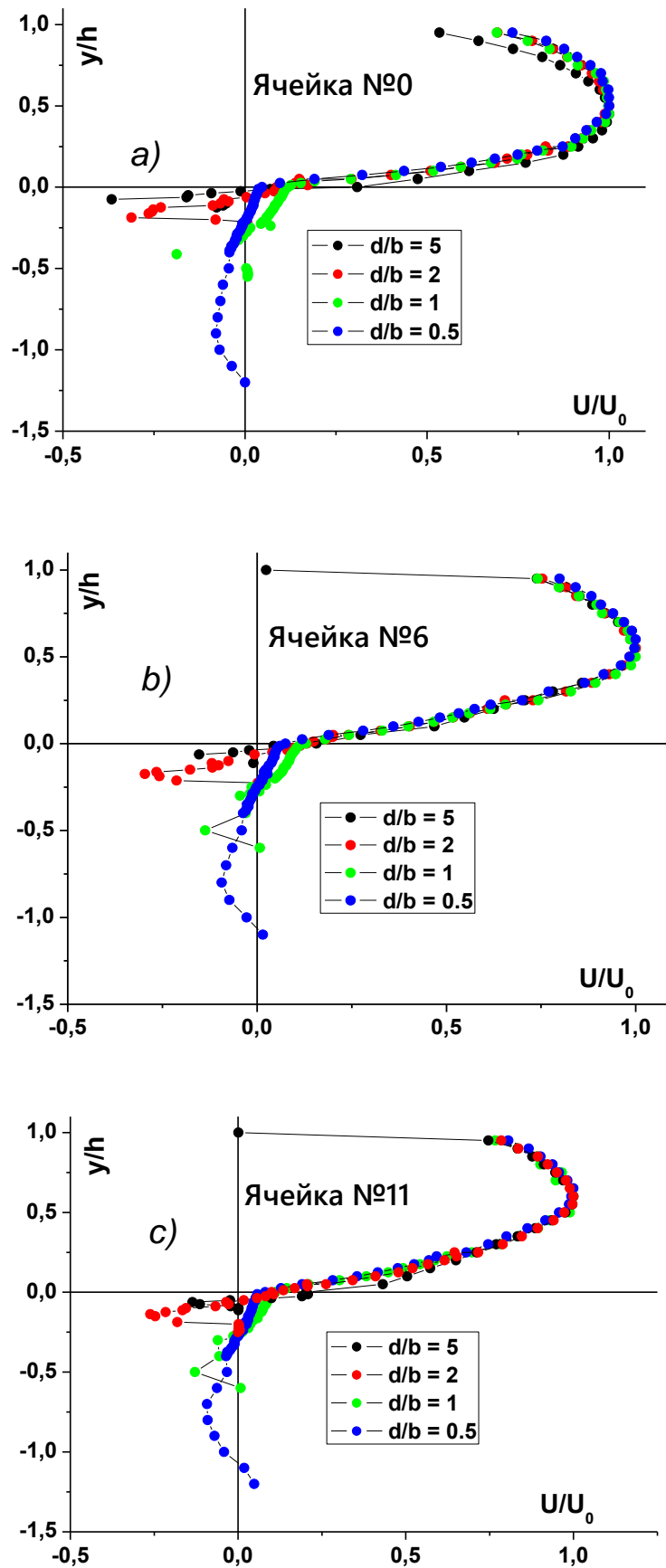


Рисунок 3.9 – Распределение скорости от верхней стенки канала и до дна трех ячеек сот с различной глубиной: а) ячейка №0, б) ячейка №6, в) ячейка №11

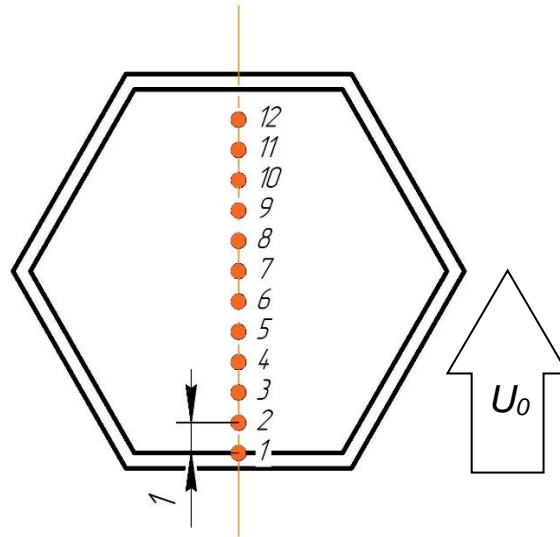


Рисунок 3.10 – Схема расположения точек измерения параметров скорости потока в отдельной ячейке сотовой поверхности

Следует также отметить, что внутри сот с глубинами 12 и 24 мм вихревая структура была самой слабой, что отмечалось низким значением скорости уже на глубине 8 мм, с дальнейшим уменьшения до нуля. При заданной в эксперименте скорости в сотах глубиной 24 мм было обнаружено, что с определенного значения глубины в ячейке формируется застойная зона, при перемещении в направлении дна сотовой ячейки после 8 мм по всей длине ячейки. Измерения с помощью LDA в нижней части сотовой ячейки были весьма затруднительны и требовали большого времени из-за отсутствия в этой области рассеивающих частиц-трассеров.

Полученные данные по развитию застойной зоны в глубоких сотах говорят в пользу того, что сотовые поверхности с отношением  $d/b \leq 1$  в определенном диапазоне чисел Рейнольдса могут служить в качестве эффективного теплозащитного покрытия. В то же время, соты с отношением  $d/b > 1$  являются мощными пристенными турбулизаторами, что может быть актуально в некоторых областях промышленности и техники в связи простотой изготовления сотовых структур и небольшой массы их конструкции.

В ходе измерений с помощью системы LDA удалось получить точные данные по значению скорости проскальзывания потока на поверхности сотовой структуры, которое показаны на рисунке 3.11. При сравнении с данными из

работ [1-3] можно сказать, что величина скорости трения зависит от расположения сотовой ячейки, а также от глубины ячеек сотовой пластины. При  $Re_D = 2.3 \times 10^4$  авторам удалось получить величину проскальзывания  $\sim 30\%$ , что, однако, отличается от результатов работ Трдатьяна и др. Одним из возможных факторов расхождения является геометрия опытного канала, в котором размещались модели сот, а также геометрия гексагональных ячеек.

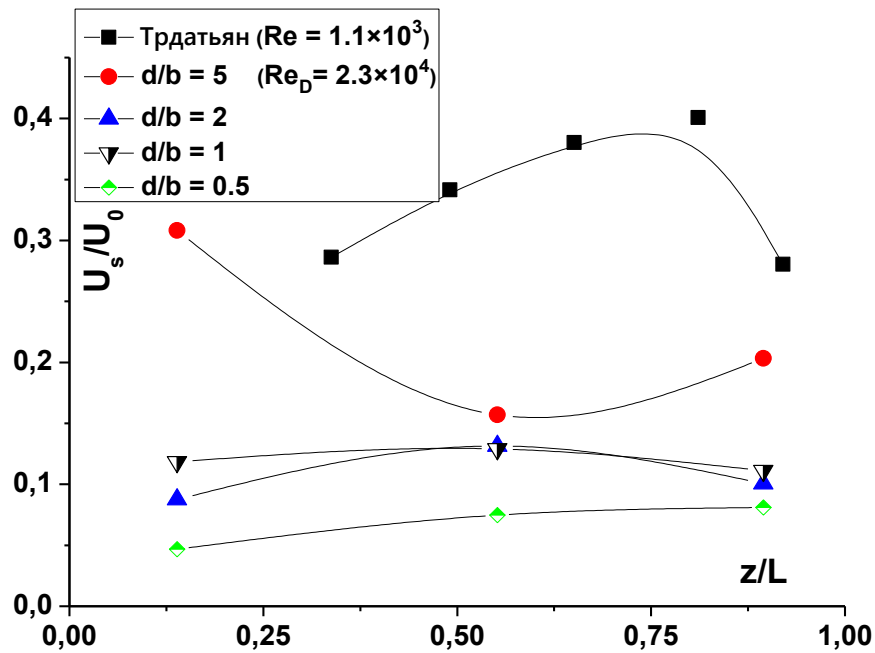


Рисунок 3.11 – Величина скорости скольжения при обтекании сотовых поверхностей

Перейдем непосредственно к анализу результатов измерений по развитию пограничного слоя вдоль сотовой поверхности с геометрическими параметрами, аналогичным из работ [1-4], где  $d/b = 0.24$  и длиной  $L$  185 мм. На рисунке 3.12 демонстрируются полученные опытные данные в полулогарифмических координатах на различных удалениях от начала сотовой поверхности, на которых особенно сильно проявляется деформация поля продольного течения.

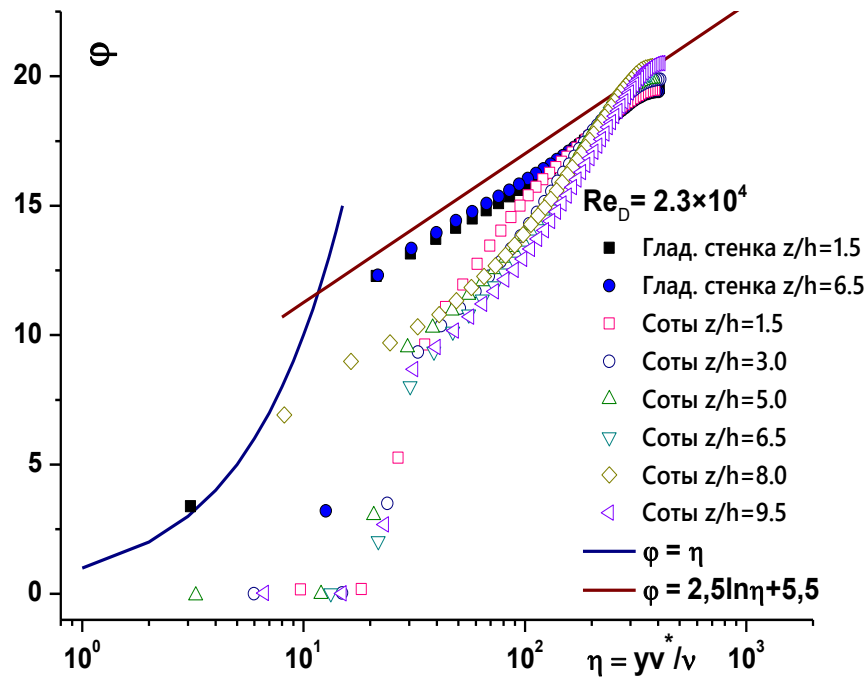


Рисунок 3.12 – Профили продольной скорости в координатах закона стенки

Величина динамической скорости  $v^* = U_0 \sqrt{C_f/2}$ , необходимая для представления экспериментальных данных, определялась методом Клаузера [120]. Если на гладкой стенке опытные точки располагаются вблизи универсальной зависимости для турбулентного ядра ( $\varphi = 2.5 \ln \eta + 5.5$ , где  $\eta = yv^*/\nu$ ), то на сотовой поверхности наблюдается значительное отличие от этой формулы. Столь сильная деформация поля течения вызвана подтормаживающим влиянием крупных вихревых структур, образующихся при взаимодействии потока с сотовыми ячейками.

Как правило [119, 120], меньшая наполненность пристенной части профиля продольной скорости отождествляется с малыми градиентами у стенки и, соответственно, со снижением турбулентных касательных напряжений. В случае обтекания сот ситуация обратная – меньшая наполненность профиля сочетается с сильным ростом турбулентных сдвиговых напряжений. Этот вывод подтверждается результатами измерений реинольдсовых напряжений на гладкой и сотовой поверхностях. Результаты этих измерений представлены на рисунке 3.13. Уровень турбулентных напряжений при обтекании сотовой поверхности почти в 3 раза выше, чем гладкой.

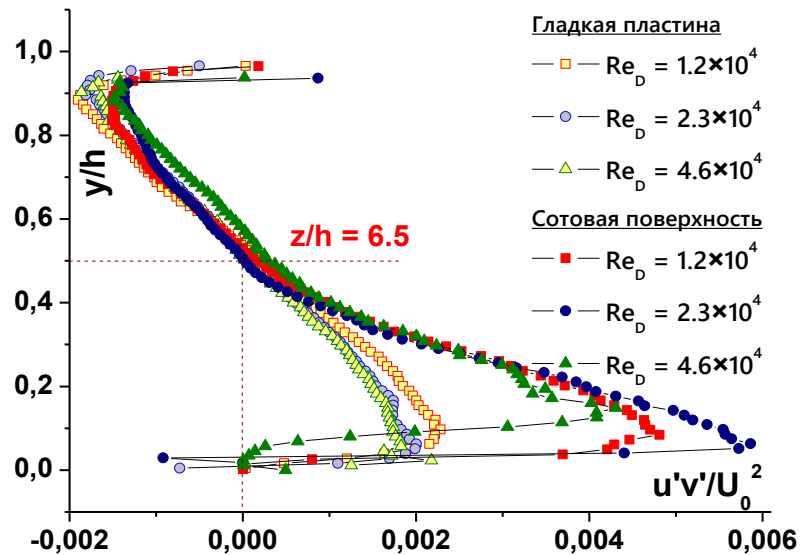


Рисунок 3.13 – Рейнольдсовы напряжения в пограничном слое на гладкой (открытые точки) и сотовой (закрытые точки) поверхности

На верхнюю стенку канала возмущения от вихреобразования при обтекании сот не достигают и здесь все опытные данные совпадают между собой.

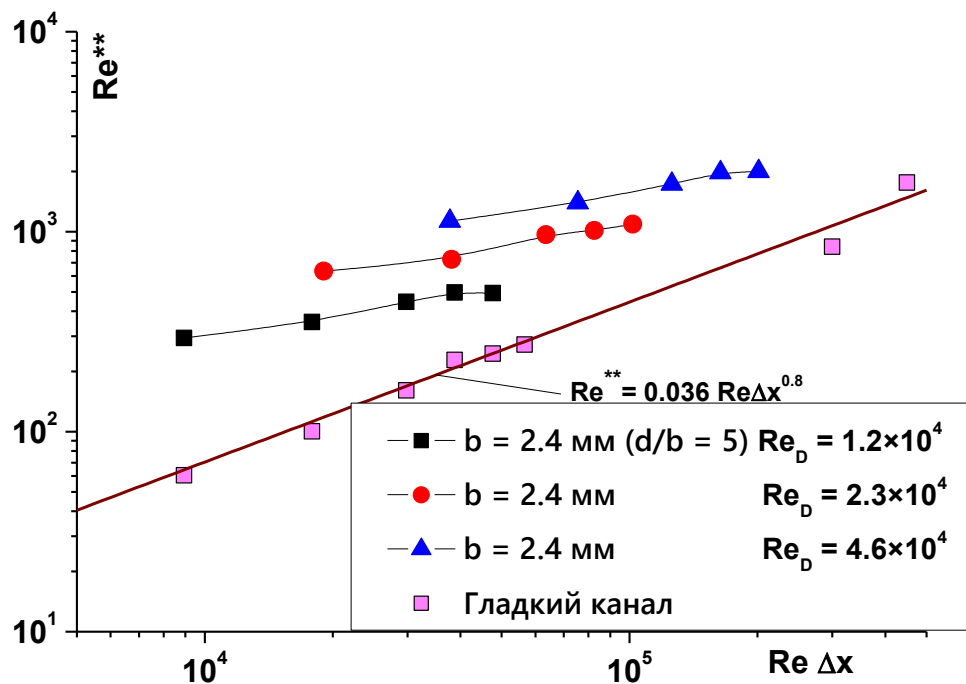


Рисунок 3.14 – Изменение интегрального числа Рейнольдса  $Re^{**}$  по длине пластины для гладкой и сотовой поверхности

В целом картину развития пограничного слоя при воздействии на него различных факторов могут характеризовать интегральные параметры, такие как

толщина вытеснения  $\delta^*$ , толщина потери импульса  $\delta^{**}$  и формпараметр  $H = \delta^*/\delta^{**}$ . Значения этих параметров легко определяются интегрированием профилей продольной скорости.

Изменение интегрального числа Рейнольдса  $Re^{**} = U_m \delta^{**} / \nu$  по длине пластины для гладкой и сотовой поверхности представлено на Рисунок 3.14. Видно, что для гладкой пластины результаты измерений хорошо описываются соотношением, полученным из решения интегрального уравнения импульсов турбулентного пограничного слоя с показателем степени в профиле скорости  $n$  равного  $1/7$  [120]:

$$Re^{**} = 0.036 Re_{\Delta z}^{0.8},$$

где  $Re_{Dz}$  – число Рейнольдса, отсчитываемое с начала сотовой поверхности.

При обтекании сотовой поверхности все опытные данные на Рисунок 3.14 располагаются значительно выше (в 3 и более раза) по сравнению с гладкой. При этом отметим еще одно важное обстоятельство: данные, полученные при разных скоростях при одной и той же конфигурации сот, не совпадают между собой, как то предсказывает теория пограничного слоя. По-видимому, возмущения, генерируемые сотами, зависят от абсолютного значения скорости их обтекания, поэтому и вклад их в деформацию пограничным слоем будет различным.

Экспериментальные результаты по изменению формпараметра  $H = \delta^*/\delta^{**}$  для всего спектра сотовых поверхностей, испытанных в эксперименте, в диапазоне чисел  $Re_D$  от  $1.2 \times 10^4$  до  $4.6 \times 10^4$  показаны на Рисунок 3.15. Можно выделить данные из работ [1-3], которые характерны тем, что при  $Re_D$  равному  $1.1 \times 10^3$ , формпараметр  $H$  на расстоянии  $z/h = 3$  (60 мм от начала сотовой пластины) приближается к значению  $H = 2.7$ , что соответствует ламинарному течению. Аналогичное значение  $H$  было получено и в настоящей диссертационной работе при использовании сот с глубиной 2.4 мм при скорости потока в канале 20 м/с, что соответствует  $Re_D = 4.6 \times 10^4$ . Однако, ни одним из имеющихся методов исследования потока автору не удалось выявить признаки ламинаризации потока.

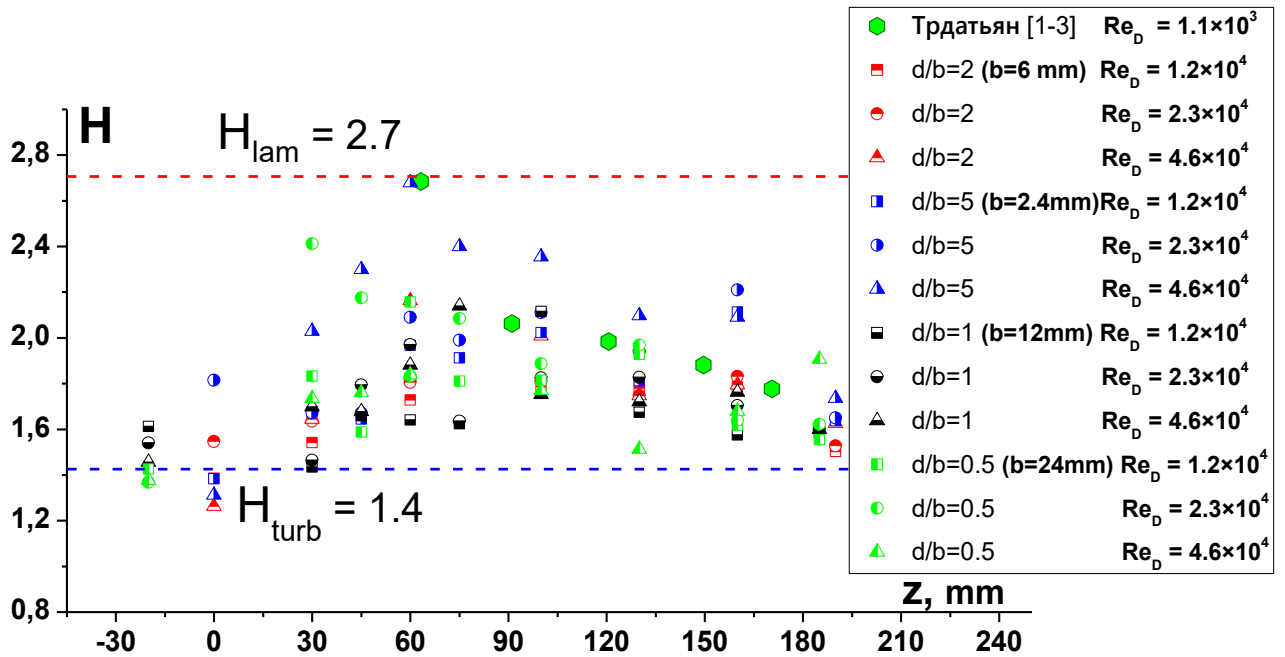


Рисунок 3.15 – Изменение формпараметра  $H = \delta^*/\delta^{**}$  по длине сотовой пластины в сравнении с результатами других авторов

Из чего следует вывод, что на расстоянии  $z/h = 3$  поток терпит деформацию профиля скорости в связи с переходом с гладкой поверхности на ячеистую. Он перестраивается под макрошероховатость, формируя тем самым в каждой гексагональной ячейке вихревую структуру, и эта трансформация течения помимо значительного увеличения роста пульсаций скорости (Рисунок 3.5b, c) также приводит к росту гидравлического сопротивления, что наглядно показано на рисунке 3.16.

По результатам экспериментов по изучению гидравлического сопротивления в канале с сотовыми поверхностями была сделана зависимость относительного коэффициента сопротивления  $\lambda/\lambda_0$  от числа Рейнольдса. На Рисунок 3.16 показано, что даже в канале с параметрами  $150 \times 20 \times 1000$  мм<sup>3</sup> пластина с сотами размерами  $58.4 \times 182$  формирует сопротивление как минимум в 1.8 раза выше, чем в гладком канале. По мере увеличения скорости набегающего потока относительная величина сопротивления растет и может достигать значений больше 400%. Особенно сильно выделяются соты с глубиной 2.4 мм, которые приводят к наибольшим гидравлическим потерям, чем любой другой участок.



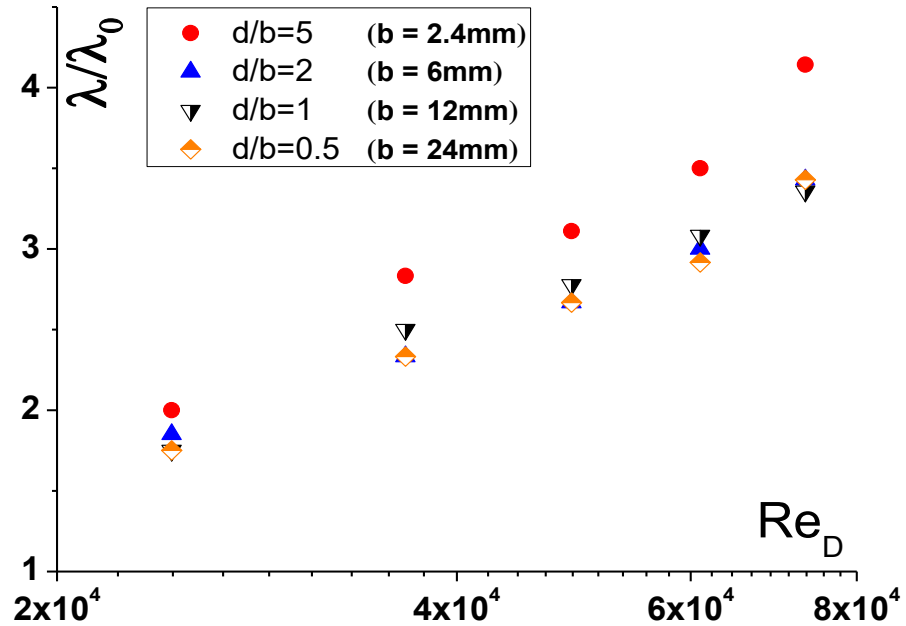


Рисунок 3.16 – Зависимость относительного коэффициента сопротивления  $\lambda/\lambda_0$  от числа  $Re_D$  для сот различной глубины

В то же время сотовая пластина с глубиной 24 мм имеет наименьшее сопротивление, а соты глубиной 6 и 12 мм занимают промежуточное положение. Экспериментальные данные по гидравлическому сопротивлению сотовых поверхностей [39] также подтверждают сильное интенсифицирующее воздействие сот на величину аэродинамических потерь. При этом их максимум приходится в зависимости от числа Рейнольдса на соты глубиной  $d/b = 0.5$ .

Поведение коэффициента теплоотдачи при обтекании сот является совершенно иным по сравнению с гидравлическими потерями. В этом можно убедиться, обратившись к данным, представленным на рисунке 3.17. Здесь демонстрируются результаты численного исследования сотовых поверхностей с такой же геометрией, что и в настоящей работе [121]. Специально подчеркнем, что в этой работе теплопроводность ребер сот принималась бесконечно большой, поэтому тепловой поток, подводимый к сотовой поверхности был таким же, как и на основной поверхности. В результате этого площадь теплообменной

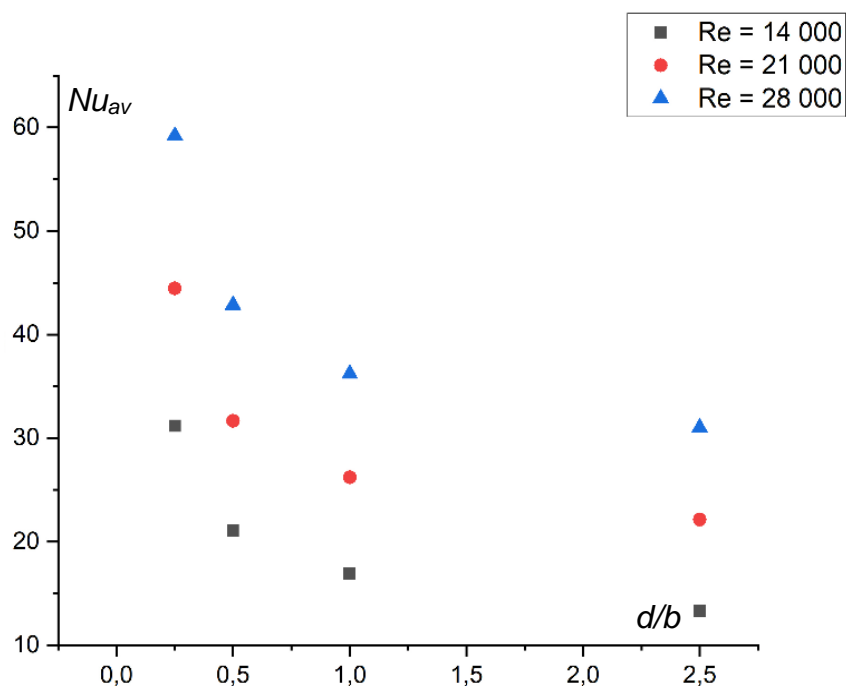


Рисунок 3.17 – Влияние глубины сот на среднюю теплоотдачу [121]

поверхности была больше, чем гладкой и она возрастала по мере увеличения глубины сот. В работе [40] не получено монотонного снижения интенсивности теплообмена с ростом глубины сот, а имеется максимум приходящийся на глубину  $d/b \sim 0.5$ .

Из рисунка 3.17 следует, что теплоотдача на сотовой поверхности значительно снижается по сравнению с гладкой стенкой. И это происходит несмотря на увеличение площади теплообменной поверхности. Одним из возможных объяснений является затрудненное проникновение потока газа к дну ячейки по мере увеличения ее глубины. Подобная ситуация с подавлением теплообмена отмечается и при обтекании каверн различных конфигураций [122, 123]. По этой причине для целей интенсификации теплообмена более эффективными являются мелкие соты. Если сотовая поверхность используется для подавления турбулентного переноса, то ребра сот должны быть высокими и выполнены из материала с малой теплопроводностью. Это ставит новые задачи экспериментального исследования.

Все отмеченное выше может быть связано с особенностями взаимодействия потока газа с сотовыми структурами именно такой конфигурации, как

представлено в таблице 2.1 во второй главе, что также ставит необходимость расширения программы дальнейших исследований.

### **Выводы по третьей главе**

1. Впервые с использованием оптических методов PIV и LDA детально изучена аэродинамическая структура при обтекании поверхности с гексагональными сотами различной глубины. Установлено, что наличие сот приводит к формированию вихревой структуры внутри ячеек и увеличению гидравлического сопротивления.

2. Увеличение глубины сот вызывает большую деформацию профиля скорости в пограничном слое и рост турбулентных пульсаций на внешней границе сот. Внутри сот течение подобно обтеканию лунок с формированием возвратного течения, интенсивность которого заметно ниже у глубоких сот.

3. Также было подтверждено наличие эффекта проскальзывания потока на сотах представленной конфигурации, величина которого может достигать до 30% от скорости в ядре потока. Однако, не было обнаружено уменьшения взаимодействия между ячейками сот и потоком, что отражается в изменении профиля скорости, росте турбулентных пульсаций и гидравлического сопротивления.

## ГЛАВА 4 АЭРОДИНАМИКА ТРАКТА С ВИХРЕВЫМИ МАТРИЦАМИ

Основной особенностью решетчатых матриц является эффективное отведение тепла от теплонапряженных участков сложных конструкций, что привело к активному их распространению в технике. В течении длительного периода времени интерес к таким теплообменным устройствам не ослабевает и продолжается дальнейшая модернизация вихревых матриц с целью повышения пределов снимаемого ими тепла, уменьшения гидравлического сопротивления и массы конструкции, повышения прочности и компактности. В большинстве имеющихся работ по исследованию компланарных каналов полученные результаты имеют интегральный характер в виде зависимостей суммарного теплообмена и гидравлических потерь при вариации числа Рейнольдса. Поэтому без изучения локальных динамических и тепловых параметров затруднительно обоснованно описать сложные механизмы процессов переноса, производить масштабирование и создавать методы расчетов.

Схема решетчатой (вихревой) матрицы приведена на рисунке 4.1. Конструктивно она имеет систему одинаковых по толщине и высоте ребер, которые закрепляются либо на широких стенках основного тракта, либо на боковых (как сделано в данной работе), для создания системы параллельных каналов, скрещивающихся под углом  $2\beta$  по отношению к таким же каналам на противоположной стенке. Получившиеся отдельные каналы носят название *подканалов*. Их наличие приводит к формированию в решетчатой матрице интенсивной турбулентности и перемешивания, что и является причиной столь высокого теплообменного эффекта в компланарных каналах. Помимо этого, наличие ребер приводит к увеличению поверхности теплообмена, что также вносит свой вклад в повышение его эффективности. Также ребра повышают жесткость всей матричной конструкции, что делает их еще более актуальными для использования в лопатках газотурбинных установок.



Рисунок 4.1 – Схема течения разделившего потока по подканалам вихревой матрицы

Все измерения полей скоростей и турбулентности в вихревых матрицах были выполнены с помощью двухкомпонентной системы LDA. Предварительные измерения показали, что течение внутри матриц имеет ярко выраженный трехмерный характер с примерно одинаковыми значениями компонент скорости по всем трем координатам. По этой причине измерения производились в два этапа. На первом этапе измерялось поле скоростей в плоскости Z-X (компоненты скоростей  $U_z$  и  $U_x$ ) на различных расстояниях от стенок. При этом оптическая система LDA располагалась нормально к этой плоскости, т.е. к стенке канала. Целью второго этапа было измерение нормальной к поверхности канала компоненты скорости  $U_y$ . Для этого оптическая система поворачивалась на угол  $\theta$  относительно нормали к поверхности, так чтобы данная компонента проецировалась на интерференционную решетку измерительного объема (Рисунок 4.2).

Поскольку LDA является точечным оптическим методом измерения параметров потока, то для детального исследования течения внутри компланарных каналов была составлена схема точек измерения внутри отдельной ячейки в центре экспериментального участка на расстоянии 200 мм от его начала с углом скрещивания ребер  $2\beta = 90^\circ$  (Рисунок 4.3).



Рисунок 4.2 – Оптическая система LDA (а) и вихревая матрица (б)

Наиболее подробные измерения были проведены при угле  $2\beta = 90^\circ$ . Данный угол был выбран по причине обеспечения приемлемых оптимальных теплогидравлических характеристик устройств, в которых он используется, что объясняет его распространенность на практике. Число  $Re_D$  изменялось в диапазоне  $(1 - 7) \times 10^4$ .

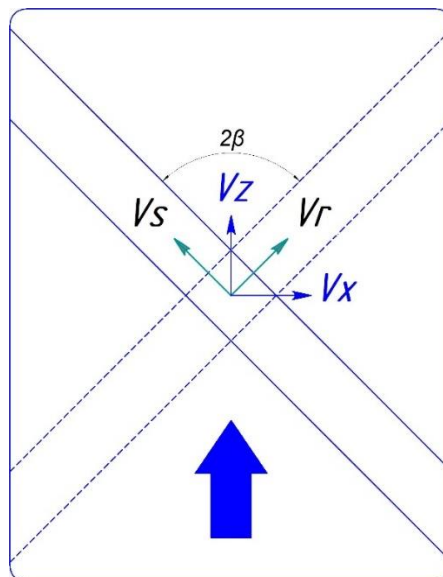


Рисунок 4.3 – Схема расположения ребер и системы координат в матрице

На рисунке 4.3 даны направления координатных осей, связанных как с основным каналом ( $Z-X$ ), так и с подканалами ( $r-s$ ). Для проведения исследований аэродинамики потока в ячейке решетчатой матрицы были выбраны двенадцать точек по горизонтали с шагом 1 мм – центральная точка с координатой (0:0), девять точек слева до точки с координатой (0:-9) и две справа до координаты (0:2). Расположение измерительных точек показано на рисунке 4.4.

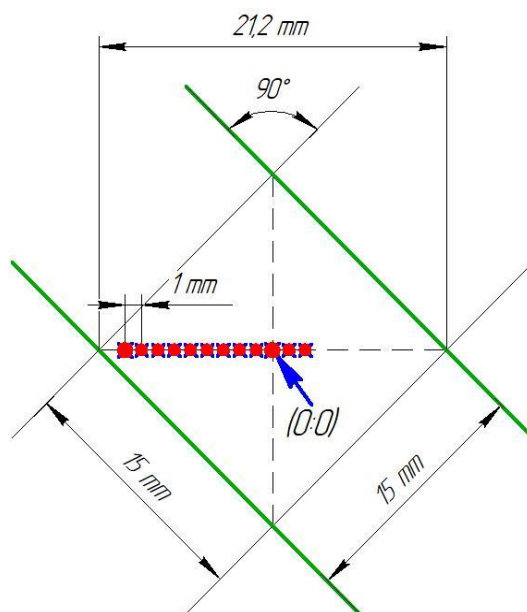


Рисунок 4.4 – Схема расположения точек измерения скоростей в ячейке вихревой матрицы

В эксперименте были проведены измерения средней и пульсационной скорости в ортогональных направлениях  $Z-X$  координат по высоте плоского канала более чем в 70 точках. Компоненты скоростей в координатах  $r-s$  рассчитывались из измерений в  $Z-X$  направлениях.

#### 4.1 Результаты экспериментов по исследованию аэродинамики в ячейке компланарных каналов в плоскости $Z-X$

Для более глубокого понимания особенностей сложной трехмерной структуры течения внутри ячейки компланарного канала рассмотрим вначале трансформацию потоков в плоскости  $Z-X$  на различных расстояниях от стенки. Профили относительной продольной  $U_z$  (вдоль оси канала) и поперечной  $U_x$  скоростей по высоте канала при числе  $Re_D = 9.6 \times 10^3$  в центре ячейки вихревой

матрицы ( $x = 0$ ) представлены на серии графиков на рисунке 4.5. В качестве масштаба использовалась величина среднерасходной скорости в канале  $U_m$ . Все представленные здесь данные получены по высоте канала  $h$  на расстоянии 200 мм от начала рабочего участка и на расстоянии 75 мм от боковых стенок. Следует заметить, что в непосредственной близости от стенок рабочего канала ( $\sim 0.8$  мм), данные по значению скорости и ее пульсациям являются не совсем корректными, что обусловлено сложностью методики измерения с помощью LDA-системы вблизи твердых поверхностей.

Как видно из представленных данных на рисунке 4.5а, продольная компонента скорости  $U_z$  в центре ячейки с углом  $2\beta = 90^\circ$  является симметричной относительно середины высоты канала. В центре канала имеется протяженное плато с величиной скорости, примерно равной среднерасходному значению. В пристенных областях на обеих стенках профили имеют меньшую заполненность по сравнению со стабилизированным течением газа в плоском канале. Трансверсальная компонента скорости антисимметрична относительно продольной оси канала, а газовый поток на верхней и нижней стенках движется в противоположных направлениях.

Компоненты скорости в системе координат, связанной с ребрами, определялись из геометрических соображений

$$U_s = U_z \cos \beta - U_x \sin \beta \quad U_r = U_z \sin \beta + U_x \cos \beta .$$

Как следует из рисунка 4.4b, профили скоростей в r-s направлениях являются подобными и зеркально отраженными. Действительно, в той части канала, где течение газа формируется в промежутке между ребрами, профиль скорости является наполненным, тогда как во второй половине высоты канала происходит резкое снижение скорости с образованием возвратного течения небольшой интенсивности.



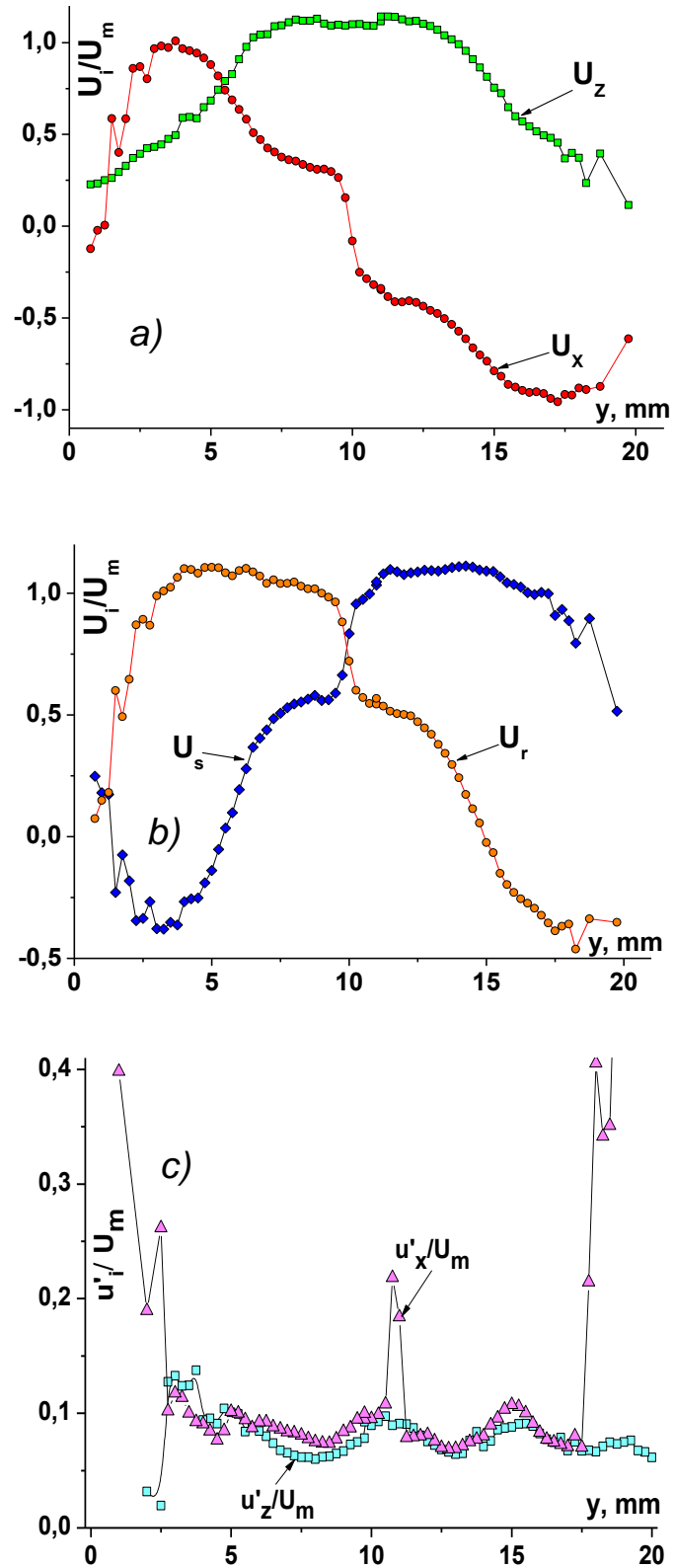


Рисунок 4.5 – Профили безразмерных скоростей и турбулентных пульсаций.  
 а) Средняя скорость в координатах  $Z$ - $X$ , б) средняя скорость в координатах подканалов  $r$ - $s$ , в) пульсации скорости в  $Z$  и  $X$  направлениях

Можно отметить неустойчивый характер течения в окрестности стенок, что является причиной значительной турбулизации близи обеих стенках канала. В этом можно убедиться, обратившись к рисунку 4.5с, где демонстрируется поведение турбулентных пульсаций в Z и X направлениях.

Распределение пульсационных скоростей является неравномерным по высоте канала, что объясняется неоднородностью течения и наличием больших градиентов скорости. Продольная компонента турбулентных пульсаций, как в окрестности стенок, так и в ядре течения не превышает величины, характерной для течения в канале  $u'_z/U_m < 0.12$ , тогда как трансверсальная составляющая вблизи поверхности боковых стенок превышает величину  $u'_x/U_m > 0.4$ . По всей видимости, эта особенность поля турбулентности является одной из причин интенсификации теплообмена в решетчатых матрицах. Как видно на рисунке 4.5 компоненты скорости в плоскости Z-X сопоставимы между собой и их величина может существенно изменяться по высоте канала. Проанализируем поведение величин полной скорости в этой плоскости и ее направления в ячейке решетчатой матрицы.

Как видно на рисунке 4.5 компоненты скорости в плоскости Z-X сопоставимы между собой и их величина может существенно изменяться по высоте канала. Проанализируем поведение величин полной скорости в этой плоскости и ее направления в ячейке решетчатой матрицы. Такие данные демонстрируются на рисунке 4.6.

Модуль вектора скорости и его направление при угле скрещивания ребер  $2\beta = 90^\circ$  могут быть найдены из следующих очевидных соотношений:

$$V_\Sigma = \sqrt{(V_Z^2 + V_X^2)} \quad \beta = \arctg(U_X/U_Z).$$

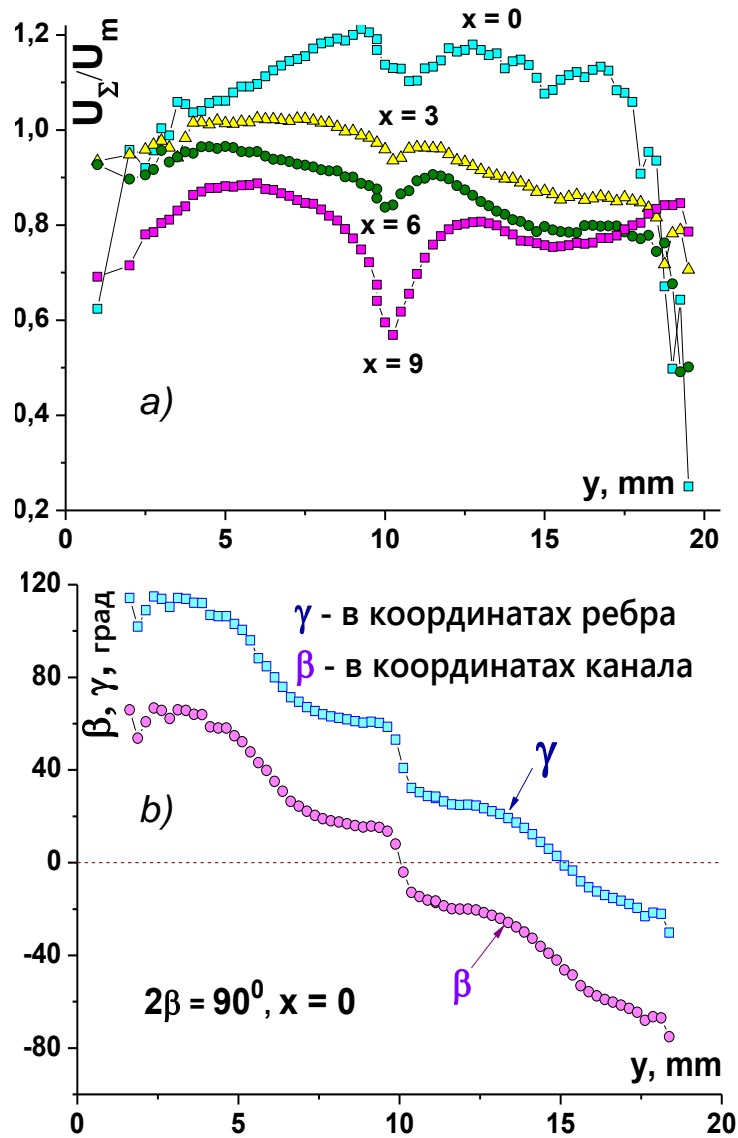


Рисунок 4.6 – Изменение модуля скорости (а) и ее направления (б) в промежутке между стенками канала

Изменение модуля полной скорости и ее направления относительно продольной оси представлено на рисунке 4.6а и 4.6б, соответственно. Профили полной скорости определялись для различных расстояний от центра ячейки. Величина  $x = 0$  соответствует центру ячейки, а  $x = 9$  самому удаленному расстоянию от ее оси (Рисунок 4.4). Профили полной скорости для различных удалений от центра оказались сходными между собой: вблизи стенок канала течение имеет типичный погранслойный характер, а в окрестности центра наблюдается своеобразный провал, обусловленный взаимодействием двух скрещивающихся потоков газа на противоположных стенках канала. Следует

отметить, что величина полной скорости заметно уменьшается по мере перемещения от центра ячейки к периферии, что объясняется торможением потока, но уже ребрами, что приводит к формированию пограничных слоев на поверхности ребер.

Направление вектора скорости внутри решетчатой ячейки, как это видно на рисунке 4.6b, непрерывно меняется по высоте канала. Угол наклона  $\beta$  определяется взаимным расположением ребер на нижней и верхней стенке канала и при ортогональной их ориентации максимальное значение угла поворота вектора скорости составляет  $2\beta_{max} = 90^0$ . Подобным образом изменяется и величина угла  $\gamma$ , характеризующего угол скоса потока в системе координат  $r-s$ , связанной с направлением ребер.

#### 4.2 Трехмерная структура течения в ячейке вихревой матрицы

Течение внутри вихревой матрицы имеет ярко выраженный трехмерный характер. В этом можно убедиться, обратившись к серии графиков на рисунке 4.7. Здесь представлены результаты измерений трех компонент скоростей, а также расчетные данные для модуля полной скорости. Ее величина определялась из условия ортогональности компонент скорости

$$U_{\Sigma} = \sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2}.$$

Поведение продольной  $U_z$  и поперечной  $U_x$  компонент скорости обсуждалось выше. Вертикальная составляющая скорости  $U_y$  (Рисунок 4.7с) изменяется по высоте канала сложным образом. В пристенных областях на обеих стенках наблюдаются зоны опускного течения небольшой интенсивности. На оси канала газ наоборот движется вверх, образуя локальный максимум. Подобные максимумы вертикальной скорости образуются и в промежутке между продольной осью и стенками канала, что говорит о возможном образовании вихревого течения, распространяющегося вдоль направления подканала, образованного параллельными ребрами. При этом наблюдается несимметрия поведения компоненты  $U_y$  относительно оси канала.

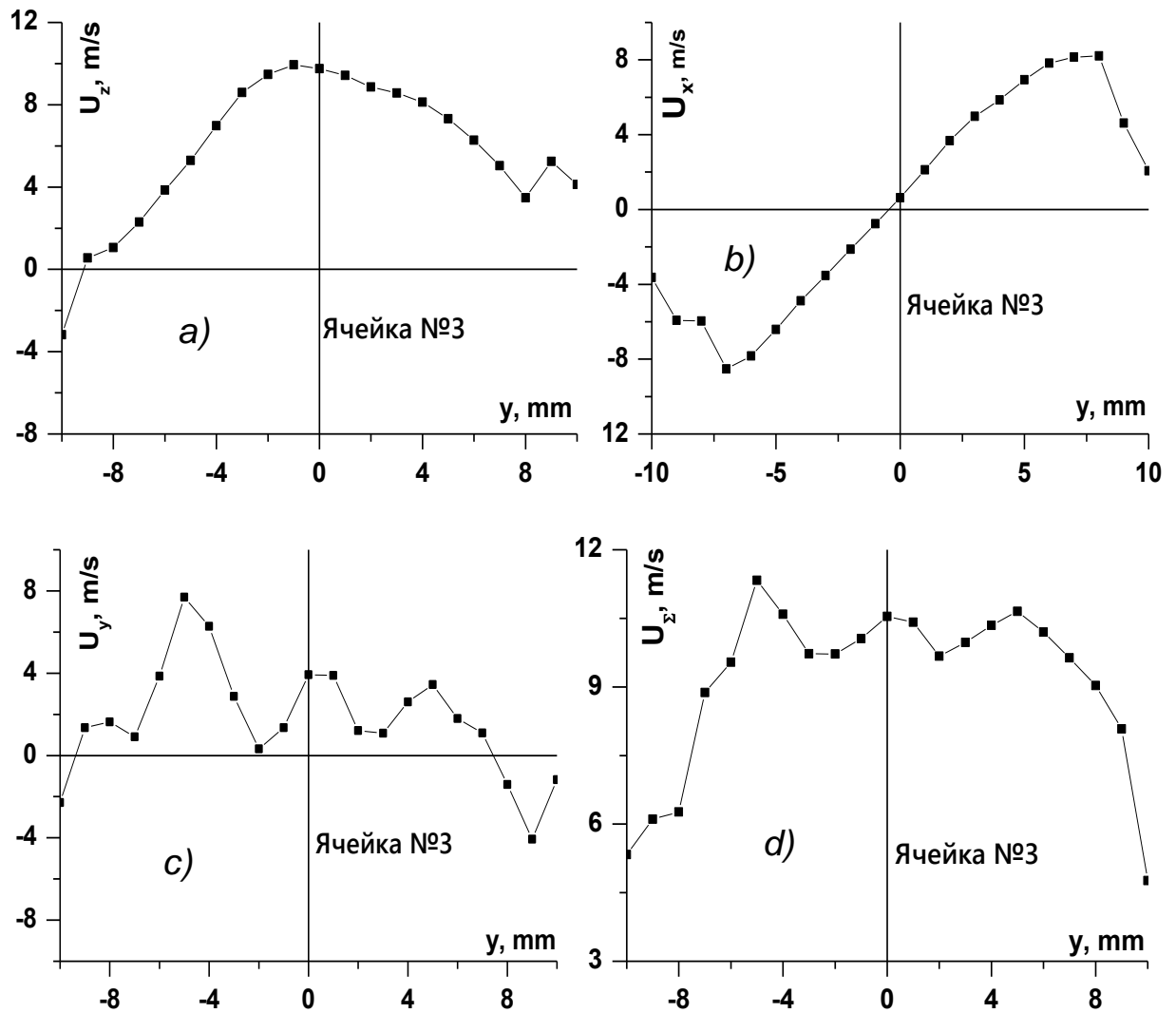


Рисунок 4.7 – Распределение компонент скоростей по высоте вихревой матрицы в ячейке №3 (Рисунок 4.2): а) – продольная  $U_z$ ; б) – поперечная  $U_x$ ; в) – вертикальная  $U_y$  компоненты; д) – модуль полной скорости  $U_\Sigma$

Если сопоставить распределение 3D модуля полной скорости в представлении (Рисунок 4.7с) с двумерным представлением (Рисунок 4.6а), то можно отметить, что учет вертикальной компоненты скорости приводит к выравниванию профиля по высоте канала. Действительно, в этом случае локальный минимум на полной скорости оси в случае 3D представления не проявляется.

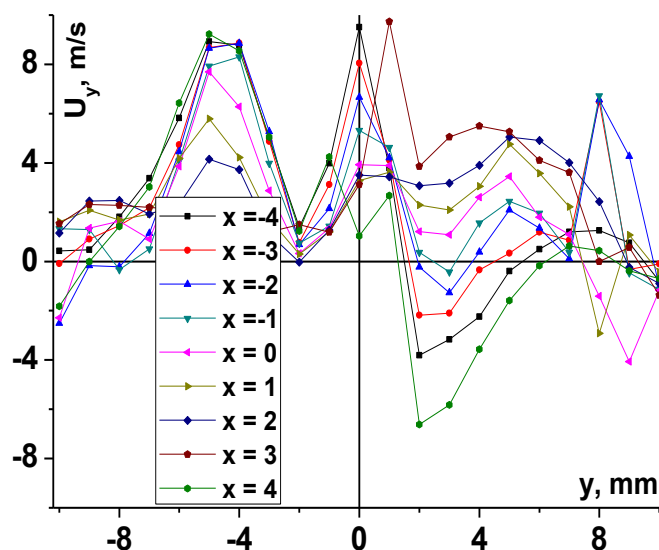


Рисунок 4.8 – Профили вертикальной компоненты  $U_y$  скорости в ячейке вихревой матрицы

Поведение вертикальной компоненты скорости сильно изменяется в зависимости от местоположения измеряемого профиля. Этот вывод следует из анализа данных рисунка 4.8, где показаны профили вертикальной компоненты скорости при различных расстояниях от оси ячейки (Рисунок 4.4), хотя качественно распределения скорости подобны между собой, количественно они значительно отличаются. Причем по мере удаления от оси ячейки величина скорости постепенно возрастает.

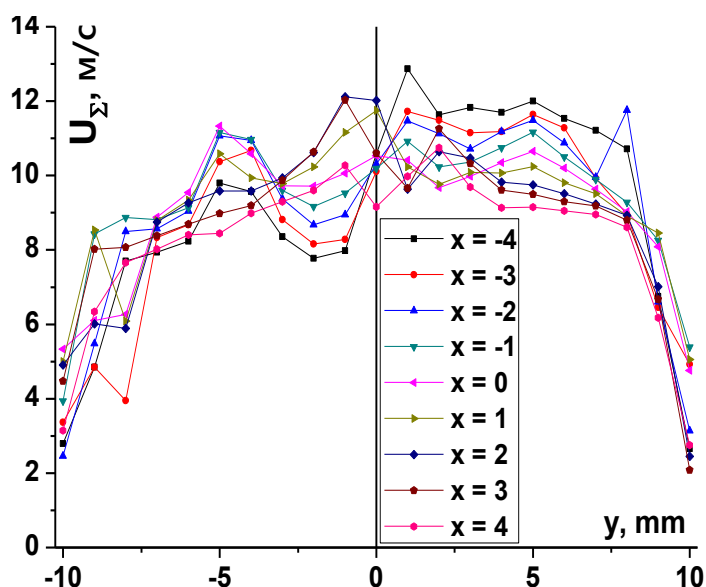


Рисунок 4.9 – Распределение модуля полной скорости  $U_\Sigma$  на различных удалениях от оси ячейки

В то же время, как показали измерения, отмеченные отличия в величине вертикальной скорости слабо сказывается на распределении полной скорости в канале. Такой вывод следует из рисунка 4.9, где представлены результаты распределения  $U_y$  в промежутке между стенками вихревой матрицы.

### 4.3 Аэродинамические потери вихревой матрицы

Важным параметром для оценки эффективности используемых приемов интенсификации теплообмена является рост гидравлических потерь за счет установки вихрегенераторов.

Определение гидравлических потерь на участке с решетчатой матрицей производилось по разности статического давления до и после нее с помощью дифференциального электронного манометра ДМ-2. Отбор давления производился через специальные отверстия диаметром 0.8 мм, расположенные на расстоянии 200 мм до участка и 200 мм после него. Тем самым устранялось влияние возможных возмущений турбулентного потока на величину статического давления.

Коэффициент гидравлического сопротивления рассчитывался как

$$\xi = \frac{2\Delta p}{\rho U_m^2},$$

где  $\Delta p$  – перепад статического давления между точками отбора, а  $U_m$  – среднерасходная скорость в канале.

Все опытные данные по гидравлическим потерям представлены на рисунке 4.10 в относительном виде, где  $\xi_0$  – коэффициент гидравлического сопротивления в плоском канале при отсутствии решетчатой матрицы. Гидравлические потери возрастают по мере увеличения числа Рейнольдса и угла скрещивания ребер. При этом уровень потерь достаточно велик и для условий проведенных экспериментов они могут возрастать до  $\xi/\xi_0 \sim 20$ .

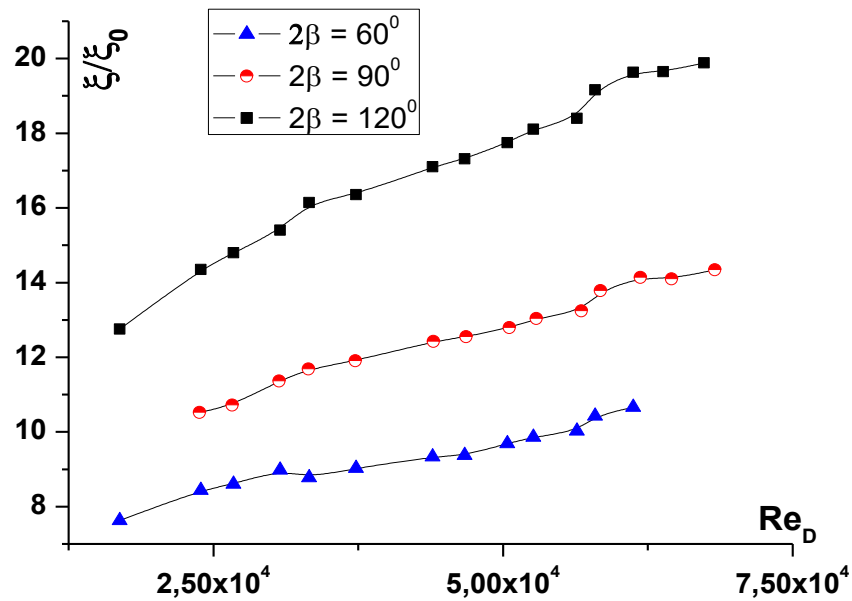


Рисунок 4.10 – Зависимость относительного коэффициента гидравлического сопротивления решетчатых каналов от числа Рейнольдса

В то же время, для оценки пригодности использования решетчатых матриц в приложениях полученные результаты необходимо рассматривать совместно с данными по интенсификации теплообмена в форме параметра теплогидравлической эффективности.

#### 4.4 Сопоставление с результатами измерений других авторов

Результаты сопоставления полученных данных с результатами измерений структуры течения, имеющимися в литературе, демонстрируются на рисунке 4.11. Единственными экспериментальными результатами в данной области являются работы [124, 125], измерения в которых проведено многоканальным пневмозондом. Для продольной компоненты скорости  $V_z$ , как это следует из анализа рисунка 4.11а, хорошего согласия с данными настоящей работы получить не удастся. Особенно сильные отличия наблюдаются в пристенных зонах, где измерения [124] дают более наполненный профиль скорости. Причин несовпадения данных может быть много, к основным из которых можно отнести отличия в геометрии каналов, числах Рейнольдса, погрешностей контактных методов диагностики и др. Кроме того, в указанных работах измерялись только



две компоненты скорости, тогда как по данным рисунка 4.7 – 4.9 течение в матрице носит ярко выраженный трехмерный характер.

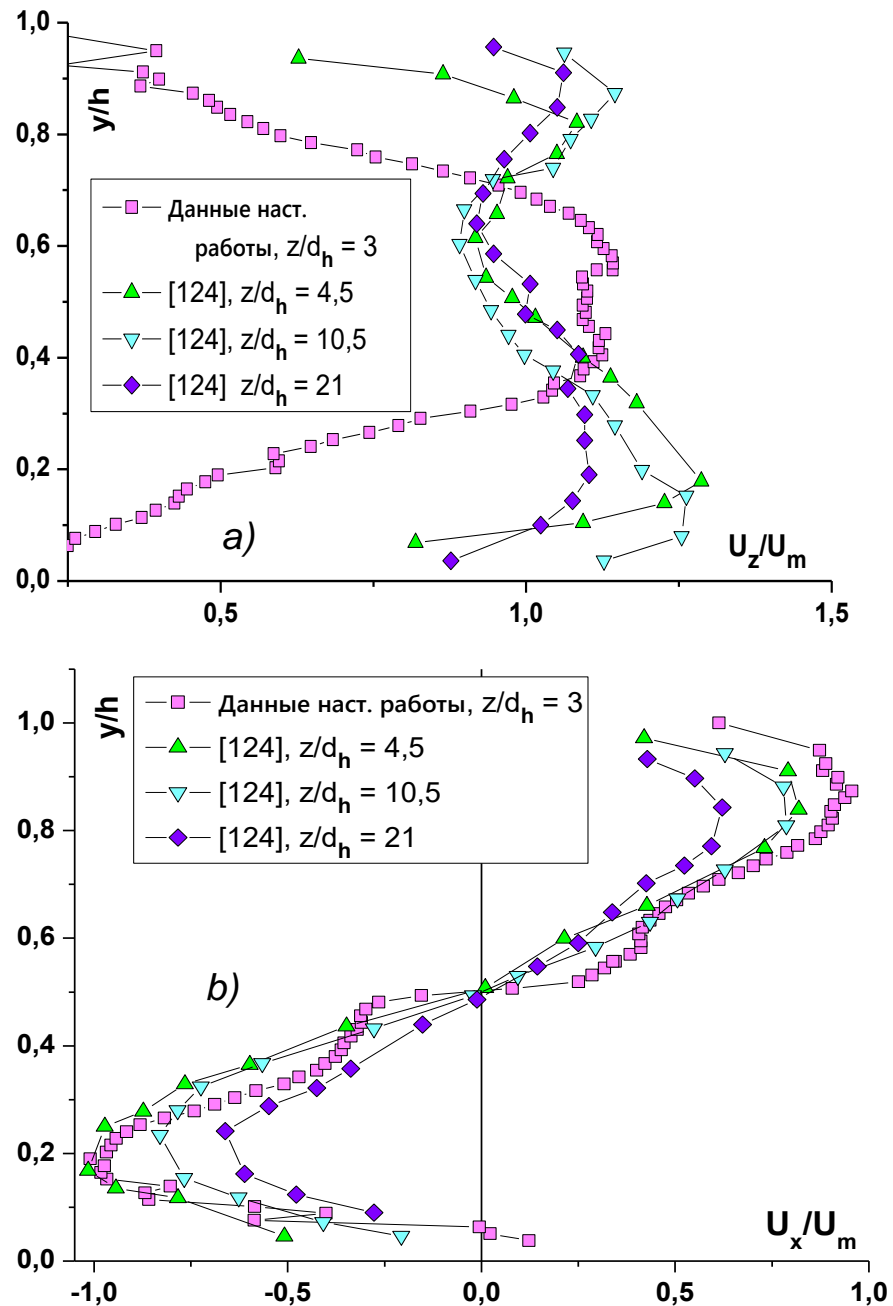


Рисунок 4.11 – Сопоставление профилей, а) продольных и б) поперечных скоростей внутри решетчатых матриц с данными работы [124]

В отличие от распределения продольной скорости измерения трансверсальной компоненты, несмотря на отличия в условиях течения, хорошо совпадают между собой. Такой вывод следует из данных, показанных на рисунке 4.11b. Подобная универсальность распределения скоростей в трансверсальном направлении может

быть использована, как при обобщении результатов, так и разработке моделей расчета течения и теплообмена.

### **Выводы по четвертой главе**

1. Проведенный комплекс экспериментальных исследований структуры течения в плоском канале при наличии решетчатой матрицы с помощью бесконтактной оптической системы LDA показал, что течение в вихревой ячейке имеет сложный трехмерный характер. Продольная компонента скорости имеет вид, сходный с течением в плоском канале за исключением образования своеобразного плато в центре канала при существенно меньшей наполненности пристенных пограничных слоев. Трансверсальная компонента средней скорости антисимметрична относительно центра канала и по порядку величины равна продольной компоненте. Турбулентные пульсации в этом направлении в окрестности стенок достигают больших значений, что может быть одной из причин интенсификации теплопереноса.

2. Распределение модуля вектора полной скорости имеет минимум в центре канала, а его направление непрерывно меняется в промежутке между стенками канала, где значительное влияние на формирование течения оказывают ребра решетчатой матрицы. Вертикальная компонента скорости по порядку величины близка к продольной и трансверсальной. Гидравлические потери возрастают с увеличением числа Рейнольдса и угла скрещивания ребер в матрице. Сопоставления с литературными данными свидетельствуют об отсутствии хорошей корреляции по продольной компоненте скорости и в то же время о полном согласии результатов измерения трансверсальной компоненты.

## ГЛАВА 5 ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В КОМПЛАНАРНЫХ КАНАЛАХ

### 5.1 Методика проведения измерений и обработки результатов

В настоящей главе представлены результаты исследования теплообмена на поверхности тепловых участков с расположенными внутри решетчатыми матрицами с тремя углами скрещивания  $2\beta$ , равным  $60^\circ$ ,  $90^\circ$  и  $120^\circ$ , и одного с гладкими стенками. Всего было проведено три серии экспериментов. Первая была посвящена изучению теплопереноса в плоском канале с гладкими стенками. Цель этой серии состояла в тестовых испытаниях комплекса используемой аппаратуры и методик измерения теплоотдачи. Во второй серии ребра, образующие вихревую матрицу, располагались только на одной стенке. Тем самым, предоставлялась возможность сопоставление уровня интенсификации теплообмена от широко использования на практике метода оребрения поверхностей по сравнению с вихревыми матрицами. При этом теплообмен измерялся как на стенке с ребрами, так и на противоположной гладкой. Наконец, в третьем случае измерения проводились собственно в вихревой матрице.

Геометрия теплового участка была идентичной таковой при изучении структуры течения. Ребра толщиной 1 мм, изготовленные из стали, имели хороший тепловой контакт с нагреваемой стенкой, поэтому они также участвовали в теплообменном процессе.

Измерения температуры стенки в опытных участках проводились с помощью тепловизионной камеры фирмы Testo (Рисунок 2.12) и комплекта термопар, расположенных на поверхности нагреваемых элементов, для контроля распределения температуры и дальнейшего сопоставления показаний различных методов измерений.

Тепловизор позволял получать двумерные картины температур в инфракрасном спектре через специальное окно на открытой поверхности теплового элемента, охлаждаемого с помощью вихревых матриц (Рисунок 2.11). В ходе проведения экспериментов были получены поля распределения температур

на четырех опытных тепловых участках: один с гладкими стенками и три с компланарными каналами. Области измерения соответствовали размерам окон в текстолитовых стенках экспериментальных моделей, которые составляли  $130 \times 180$  мм<sup>2</sup>. Примеры получаемых температурных полей представлены на рисунке 5.1. Видно, что температурное поле в канале с гладкими стенками за пределами начального теплового участка является однородным. При наличии матриц на теплообменном участке появляются характерные полосы, угол наклона которых равен углу скрещивания ребер. Кроме того, необходимо отметить большую неравномерность поля температур по всей поверхности нагреваемого участка. Измерения локальной и интегральной теплоотдачи производились в диапазоне чисел Рейнольдса от  $3.1 \times 10^3$  до  $7 \times 10^4$ .

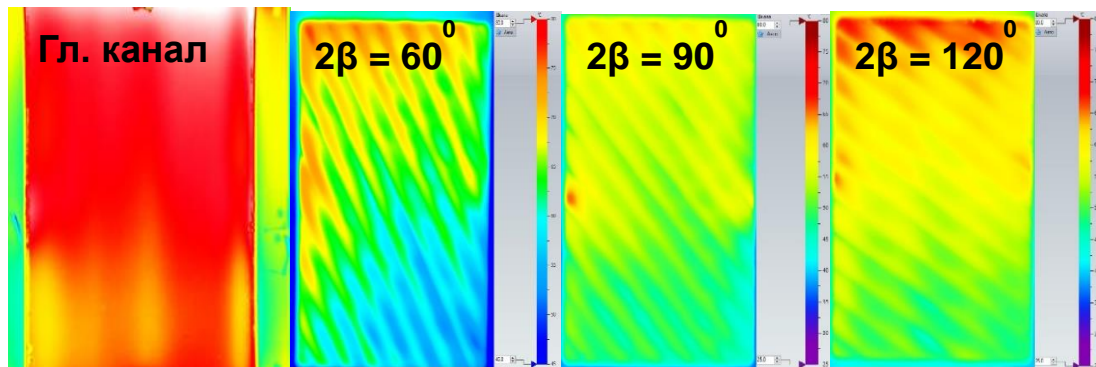


Рисунок 5.1 – Примеры полей температур на поверхности нагреваемого теплового участка

Данные по температурным полям преобразовывались в табличный вид для дальнейшей обработки с помощью программы, разработанной на языке C++ в лаборатории термогазодинамики ИТ СО РАН. В результате ее использования можно было получать локальные распределения чисел Нуссельта в исследуемой области, а также их интегральные значения.

В экспериментах выполнялось граничное условие  $q_w = const$ . Локальное значение коэффициента теплоотдачи определялось по следующей формуле

$$\alpha = q_w (T_w - T_z),$$

где  $q_w$  – плотность теплового потока на стенке,  $T_w$  – температура стенки в измеряемой точке, а  $T_z$  – среднемассовая температура воздушного потока в этой же точке.

Последняя величина определялась расчетным методом из уравнения сохранения энергии газового потока в канале. Из условия постоянства потока тепла на стенке, среднемассовая температура будет линейно возрастать по длине

$$T_z = T_{ex} + 2q_w \bar{z} / (Cp \cdot \rho_m \cdot U_m).$$

Здесь  $T_{ex}$  – температура газа на входе в канал, а  $Cp$ ,  $\rho_m$ , и  $U_m$  – теплоемкость, плотность и среднемассовая скорость газа в канале, соответственно.

Локальное число Нуссельта рассчитывалось из соотношения

$$Nu_i = \alpha D / \lambda,$$

а его среднее по всей поверхности значение определялось интегрированием по двум координатам

$$Nu_{int} = \int_0^h \int_0^a Nu_i dz dx.$$

Теплофизические свойства газа находились по характерной температуре, равной  $T_r = T_w - (1/3)T_z$ . Величина теплового потока при обработке опытных данных корректировалась с учетом потерь на излучение и свободную конвекцию. Как будет показано далее, результаты измерений в канале без матрицы хорошо согласуются с классическими соотношениями для средней теплоотдачи [126].

## 5.2 Результаты измерений локальной теплоотдачи в вихревой матрице

Характерные поля распределений чисел Нуссельта для вихревых матриц с различными значениями угла пересечения ребер можно видеть на рисунке 5.2. Для сравнения здесь представлены данные для канала с гладкими стенками, где интенсивность теплообмена значительно ниже, чем при наличии в канале вихревой матрицы. Числа Нуссельта, подобно полям температур обогреваемой стенки на рисунке 5.1, неравномерно распределены по поверхности теплообмена из-за наличия проточных каналов в вихревой матрице. Заметное влияние, как это

и ожидалось, на общий уровень теплообмена оказывает величина угла скрещивания ребер матрицы.

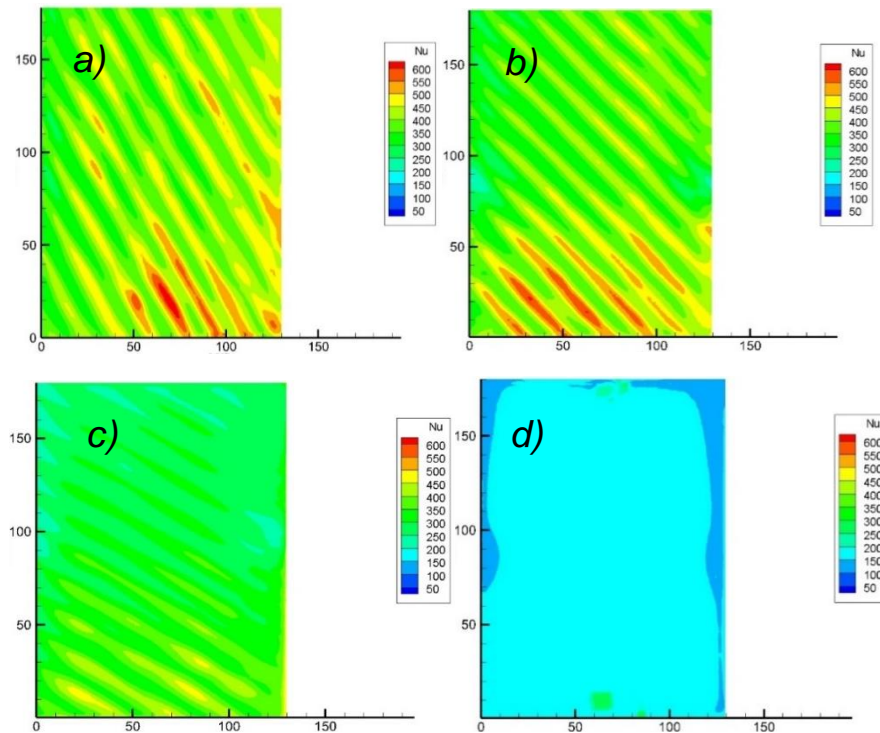


Рисунок 5.2 – Распределение чисел Нуссельта по поверхности охлаждаемого теплового элемента при числе  $Re = 2.3 \times 10^4$ .  $2\beta$  равен: а)  $60^\circ$ , б)  $90^\circ$ , в)  $120^\circ$ , д) данные для гладкого канала

Рассмотрим более детально эволюцию коэффициента теплоотдачи по мере развития течения вдоль канала. Исследовалось влияние подканалов вихревых матриц с различным углом скрещивания ребер на интенсивность теплообмена вдоль миделева сечения, как это показано на рисунке 5.3.

Данные по интенсивности теплообмена для каждого опытного участка с решетчатыми матрицами представлены в виде трех графиков на рисунке 5.4. Графики представляют собой распределение числа  $Nu$  вдоль вертикальной оси координат  $Z$ . На каждом из представленных графиков отчетливо видно, что распределение числа  $Nu$  имеет синусоидальный характер, и с повышением числа Рейнольдса разница между максимальным и минимальным значением  $Nu$  увеличивается, и она может быть двукратной и более. Особенно ярко это видно у матриц с углом пересечения, равным  $2\beta = 120^\circ$ . У этой матрицы наиболее

интенсивный теплообмен наблюдается в начале участка, и по мере удаления от него значения чисел  $Nu$  уменьшаются.

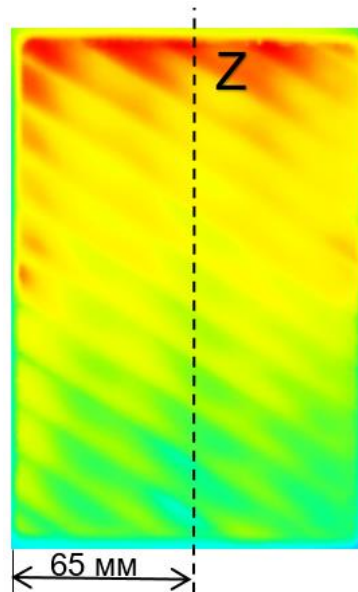


Рисунок 5.3 – Расположение линии исследуемого сечения локального числа Нуссельта на поверхности теплообмена

Этого нельзя сказать про компланарные каналы с углом скрещивания  $60^\circ$  и  $90^\circ$  – у них распределение значений числа Нуссельта в начале тепловой области и в конце различается не более чем на 25%. Увеличение числа Рейнольдса ведет к повышению теплообмена между нагреваемым элементом и потоком воздуха, протекающего в вихревых матрицах. Наибольшие значения числа  $Nu$  в каждом из исследуемых участков находятся в центрах подканалов вихревых матриц, а наименьшие значения наблюдаются в местах соприкосновения ребер с нагреваемой стенкой, из чего следует, что основным фактором, способствующим наибольшему теплосъему с поверхности, является высокая турбулизация потока и интенсивные процессы теплового перемешивания, имеющие место в подканалах матриц. Также следует отметить, что тепловой участок с компланарными каналами с  $2\beta$  равному  $120^\circ$  обеспечивает более эффективный теплообмен при всех числах Рейнольдса, но только на начальном участке – по мере удаления от начала канала эффективность теплосъема значительно падает.

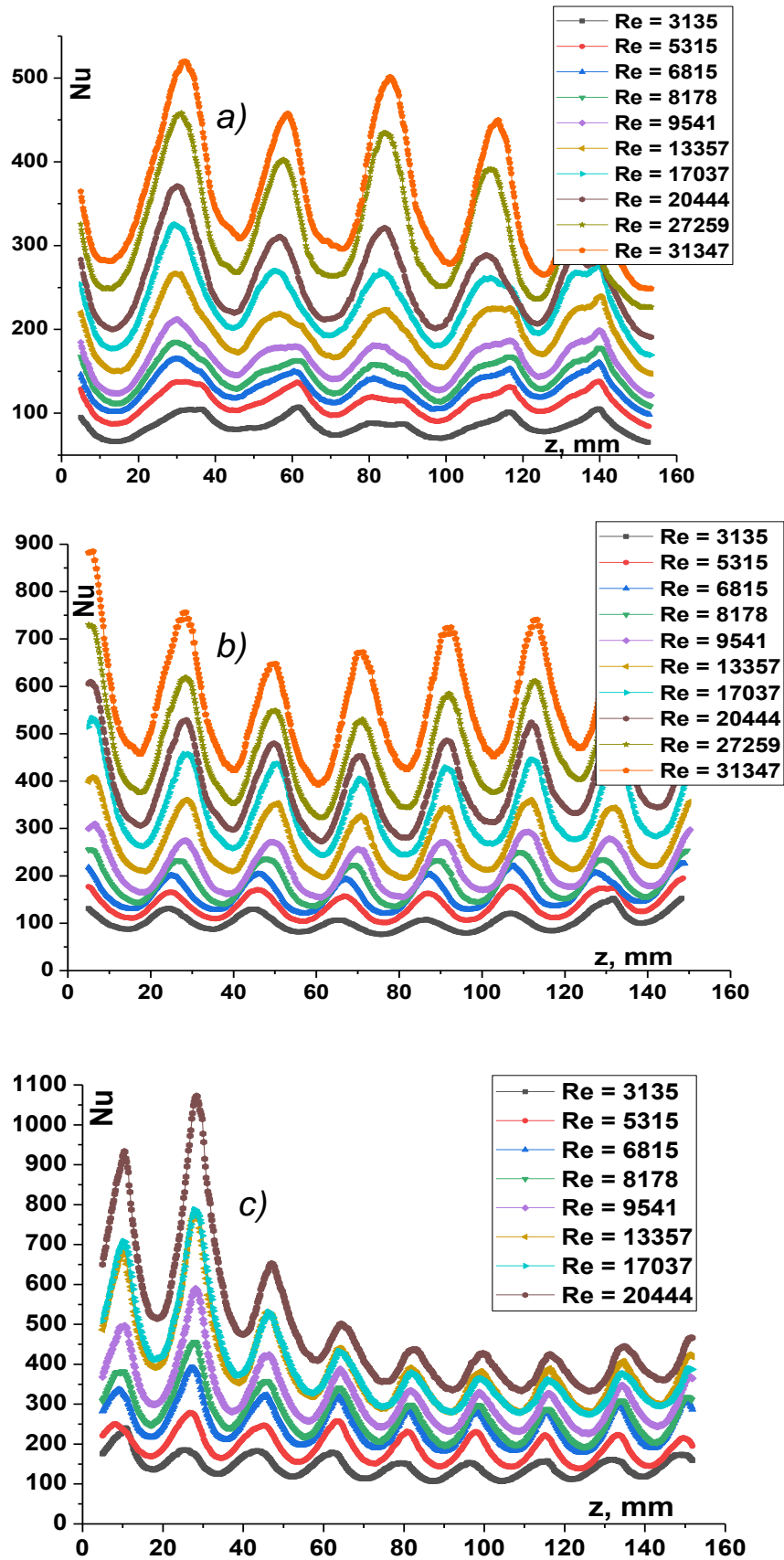


Рисунок 5.4 – Распределение локального числа Нуссельта при различных числах Рейнольдса вдоль теплового участка с  $2\beta$  равному: а)  $60^\circ$ , б)  $90^\circ$ , в)  $120^\circ$



В то же время матрицы с  $2\beta$  равному  $60^\circ$  и  $90^\circ$  имеют более равномерное распределение числа  $Nu$  по всей длине исследуемой области, однако  $90^\circ$  более эффективны во всем диапазоне чисел  $Re$ .

Помимо исследования теплообмена в решетчатых матрицах авторами было решено изучить теплообмен в нагреваемых каналах, но с наклонными ребрами, закрепленными на одной из стенок канала. По вопросу обтекания ребер и теплообмена в каналах с прямыми и наклонными ребрами имеется обширная информация [22, 24, 25, 27]. В этих работах утверждается, что наличие ребер приводит к формированию в канале возмущений потока, и, следовательно, к увеличению теплосъема на оребренной стенке.

В данной работе исследования теплообмена проводились в экспериментальных каналах с ребрами, наклоненными относительно оси канала под углом  $\beta = 30^\circ, 45^\circ$  и  $60^\circ$ . Один из тепловых элементов (стальной фольги) был непосредственно прижат к ребрам, а второй свободно контактировал с протекающим в канале потоком. Ребра имели высоту 10 мм, что составляло половину от общей высоты канала. Измерения температуры происходили с двух сторон теплового участка с оребренным каналом – стороны как гладкой, так и оребренной стенки. Полученные данные представлены на обобщающем графике зависимости интегрального числа Нуссельта от числа Рейнольдса на рисунке 5.5.

### 5.3 Интегральный теплообмен в вихревых матрицах

Значение среднего числа Нуссельта определялось интегрированием по всей поверхности теплообменника. Эти данные в зависимости от числа Рейнольдса демонстрируются на рисунке 5.5. Здесь представлены три группы данных, среди которых находятся результаты измерений в гладком канале, при наличии оребрения одной из стенок и, собственно, вихревых матриц. Важно, что в случае оребрения одной стенки теплообмен изучался на обеих стенках.

Данные, полученные в гладком канале, хорошо совпадают с формулой Михеева [126] для теплообмена на развитом участке в трубе.

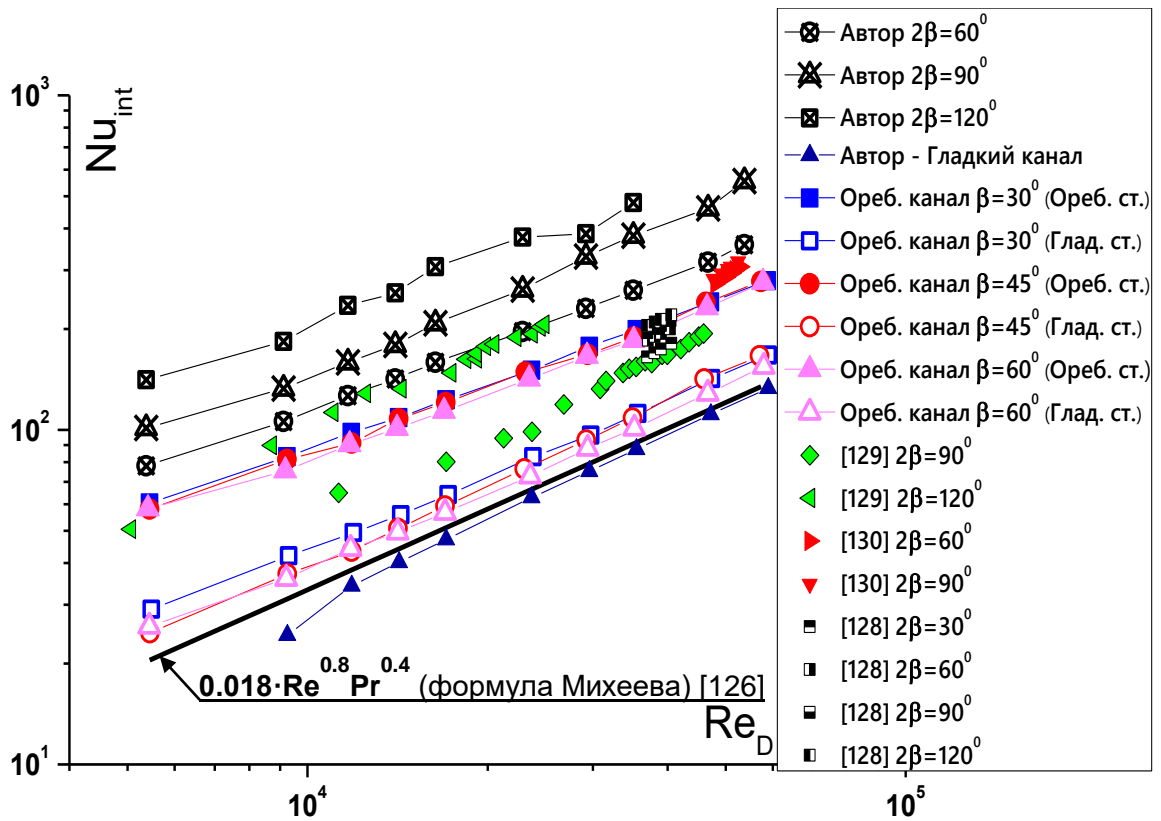


Рисунок 5.5 – Зависимость интегрального числа Нуссельта от числа Рейнольдса

Небольшое отличие в области малых чисел Рейнольдса возможно вызвано влиянием предвключенного динамического участка. Несколько больший теплообмен наблюдается на противоположной гладкой стенке оребренных каналов. При этом влияние угла наклона ребер и практически не сказывается на значении интегрального числа  $Nu$ . Эффективность теплообмена примерно в 2.5 раза выше на стенке, где расположены ребра. Немного меньшие значения теплообмена были получены в [127, 128] при всех исследуемых углах  $2\beta$  ( $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$  и  $120^\circ$ ), а также [129] с  $2\beta$  равным  $90^\circ$ . Однако, большие значения были получены в вихревых матрицах в [130] организации ЛНПО им. В.Я. Климова с углом скрещивания  $60^\circ$  и  $90^\circ$ , что можно объяснить несовершенством методов исследования теплообмена в данных работах: в [128] использовался метод калориметрирования, в [130] температура измерялась шестью проволочными термопарами градуировки хромель-копель, а в [129] коэффициенты теплоотдачи определялись с помощью электрокалориметрирования.

После получения результатов теплообмена в компланарных каналах с углом скрещивания  $60^\circ$ ,  $90^\circ$  и  $120^\circ$ , и сравнения их с данными из работ других авторов, можно сделать вывод, что во всем исследованном диапазоне чисел Рейнольдса наиболее выделяется матрица с углом скрещивания ребер  $120^\circ$  – теплообмен по сравнению с гладким каналом может быть выше до 7 раз (для  $2\beta = 90^\circ$  теплообмен выше в  $\sim 5$  раз, а для  $2\beta = 60^\circ$  может достигать до 3.7 раз). Из этого следует, что для условий данной работы, вихревая матрица с  $2\beta = 120^\circ$  дает наиболее высокий эффект интенсификации теплоотдачи.

При изучении характеристик теплообменных устройств определяющими параметрами является коэффициент аналогии Рейнольдса и тепло - гидравлической эффективности. При обработке опытных результатов использовались величины прироста коэффициента теплообмена и относительных гидравлических потерь.

Изменение коэффициента аналогии Рейнольдса  $R = (2St/St_0)/(\xi/\xi_0)$  показано на рисунке 5.6. В силу превалирования гидравлических потерь над приростом теплоотдачи фактор аналогии ниже единицы  $R < 1$  во всем диапазоне чисел Рейнольдса и для всех исследованных матриц. При этом величина  $R$  примерно одинакова для всех углов пересечений ребер.

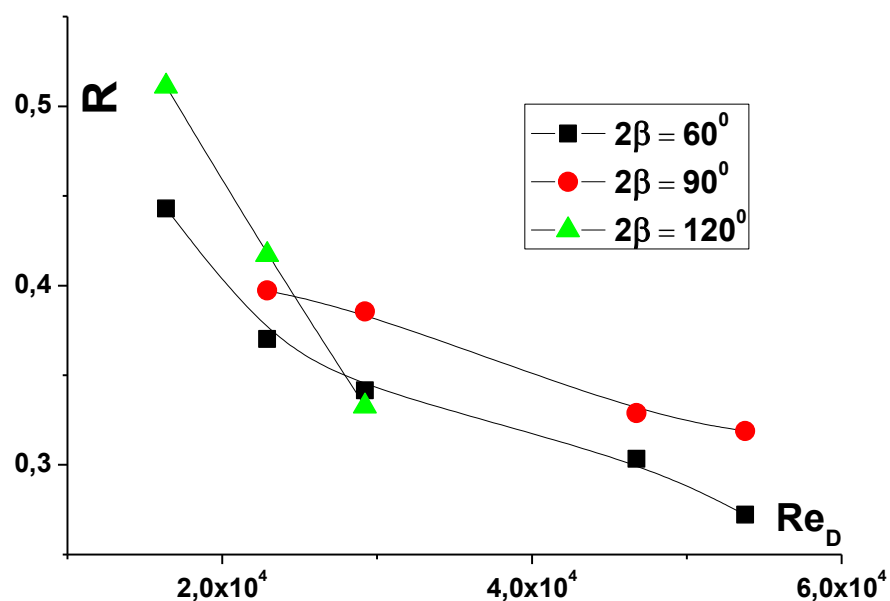


Рисунок 5.6 – Зависимость коэффициента аналогии от числа Рейнольдса

Параметр теплогидравлической эффективности, характеризующий эффект выигрыша в теплоотдаче к возрастанию механической энергии на прокачку теплоносителя, требуемой на преодоление дополнительных потерь, определяет степень совершенства используемых методов интенсификации теплоотдачи. Величина этого параметра рассчитывалась по следующей формуле:

$$\eta = \frac{Nu/Nu_0}{(\xi/\xi_0)^{1/3}}.$$

Экспериментальные данные по коэффициенту теплогидравлической эффективности от числа Рейнольдса для вихревых матриц с тремя углами пересечения  $2\beta$  ( $60^\circ$ ,  $90^\circ$  и  $120^\circ$ ) представлены на рисунке 5.7. Отметим, что все из представленных вихревых матриц имеют параметр  $\eta > 1$ , что говорит об их высокой эффективности.

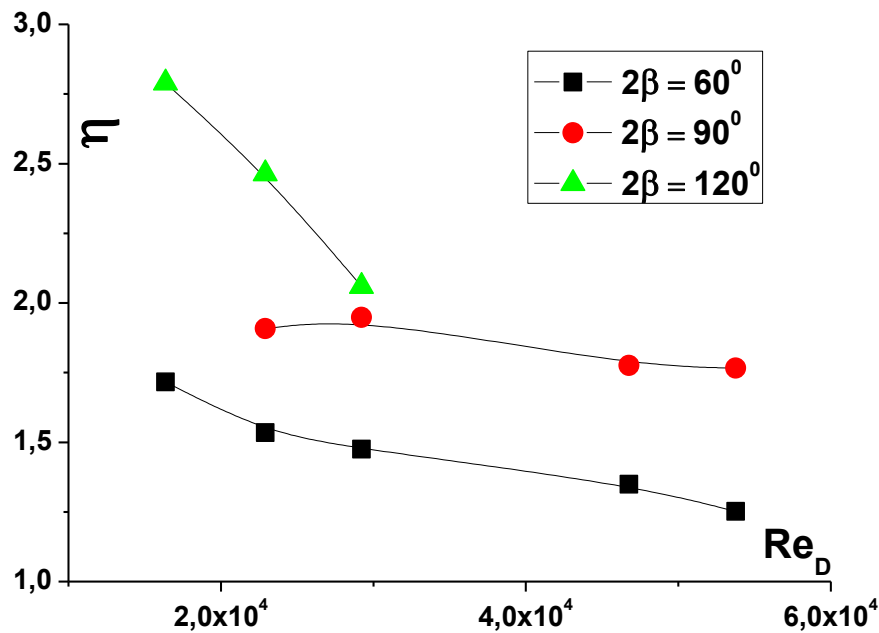


Рисунок 5.7 – Зависимость коэффициента теплогидравлической эффективности от числа Рейнольдса

Особенно сильно здесь выделяется матрица с углом  $2\beta = 120^\circ$ , у которой в области низких чисел Рейнольдса, значение коэффициента теплогидравлической эффективности достигает  $\sim 2,7$ , в то время как у матриц с углом  $2\beta$  равным  $60^\circ$  и  $90^\circ$  этот показатель значительно ниже. Этот результат говорит о том, что данные теплообменные устройства обладают чрезвычайно высокими характеристиками,

что являйся основанием их успешного использования в различных энерготехнологиях.

### **Выводы по пятой главе**

В данной главе представлены результаты экспериментального исследования теплообмена на поверхности вихревых матриц в большом диапазоне режимов потока. Здесь же представлены результаты по теплогидравлической эффективности матриц, которая показала, что подобные теплообменники являются крайне эффективными теплообменными устройствами.

Показано, что повышение скорости протекающего в компланарных каналах потока приводит к увеличению числа Нуссельта на исследуемой поверхности, но в вихревой матрице с углом  $2\beta$  равному  $120^\circ$  эффективной является только зона около начала тепловой области, по мере удаления от нее тепловая эффективность снижается, что следует учесть в будущих исследованиях.

Величина коэффициента теплогидравлической эффективности во всех исследованных теплообменных участках с вихревыми матрицами оказалась больше 1. В матрице с углом  $2\beta = 120^\circ$  при относительно низких числах  $Re$  коэффициент равен  $\sim 2.7$ , но он снижается с уменьшением угла  $2\beta$  и увеличением скорости основного потока.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Впервые с использованием оптических методов PIV и LDA детально изучена аэродинамическая структура при обтекании поверхности с гексагональными сотами различной глубины.

2. Установлено, что наличие сот приводит к формированию вихревой структуры внутри ячеек и эффекту «проскальзывания» потока. Над сотовыми поверхностями с исследованной геометрией ячеек скорость «проскальзывания» потока составляет ~30% от скорости в ядре потока. Однако, влияние сот способствует увеличению турбулентных пульсаций и росту коэффициента сопротивления до 4.5 раз.

3. Впервые лазер–доплеровским измерителем скорости (методом LDA) подробно изучена трехмерная структура осредненного и пульсационного течений внутри ячеек вихревой матрицы. Показано, что профиль вектора скорости по высоте канала сходен с течением в гладком канале с тем отличием, что направление потока меняется по высоте. При этом градиенты скорости вблизи стенок канала возрастают, а также в ячейке не наблюдается вихревой характер течения.

4. Получены новые результаты систематических экспериментальных исследований локального и интегрального теплообмена в вихревых матрицах. Определены области повышенного теплообмена, а также степень интенсификации теплопереноса в зависимости от угла наклона ребер и числа Рейнольдса. Рост теплоотдачи по сравнению с гладким каналом составляет 4-7 раз.

5. Параметр теплогидравлической эффективности вихревых матриц, характеризующий отношение роста теплопереноса к гидравлическим потерям, возрастает по мере увеличения угла между ребрами и при малых числах Рейнольдса может достигать до значения 2.7. С увеличением чисел Рейнольдса эта тенденция нарушается вследствие роста гидравлических потерь.

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$a$  – ширина рабочего участка, м;

$b$  – глубина ячеек сотового участка, м;

$d$  – диаметр вписанной окружности в сотовой ячейке гексагональной формы, м;

$D_h = 2ah/(a+h)$  – гидравлический диаметр канала, м;

$f/f_0$  – относительный коэффициента трения;

$f_0$  – коэффициента трения на гладкой поверхности;

$h$  – высота рабочего участка, м;

$H = \delta^*/\delta^{**}$  – формпараметр;

$H_{lam}$  – значение формпараметра, соответствующее ламинарному режиму течения;

$H_{turb}$  – значение формпараметра, соответствующее турбулентному режиму течения;

$K$  – степень поджатия потока;

$L$  – длина участка с сотовыми ячейками, м;

$n$  – показатель степени в профиле скорости;

$Nu = \alpha z/\lambda_{возд}$  – число Нуссельта;

$Nu_{av}$  – среднее число Нуссельта;

$Nu_{int}$  – интегральное число Нуссельта;

$Pr = \nu/a$  – число Прандтля;

$Re^{**} = U_m \delta^{**}/\nu$  – интегрального числа Рейнольдса;

$Re = U_m h/\nu$  – число Рейнольдса, рассчитанное по характерному размеру;

$Re_D = U_m D_h/\nu$  – число Рейнольдса, рассчитанное по гидравлическому диаметру;

$T_Z$  – температура поверхности в точке, град;

$T_\Gamma$  – температура воздуха внутри рабочего участка, град;

$U_i$  – скорость потока в канале, м/с;

$U_m$  – среднерасходная скорость в канале, м/с;

$U_S$  – скорость проскальзывания потока, м/с;

$v^* = U_0 \sqrt{C_f/2}$ , – динамическая скорость, м/с;

$X$  – поперечная ось координат;

$x$  – расстояние по оси  $X$ , м;

$Y$  – вертикальная ось координат;

$y$  – расстояние по оси  $Y$ , м;

$Z$  – продольная ось координат;

$z$  – расстояние по оси  $Z$ , м;

$\bar{z} = z/h$  – расстояние по оси  $Z$ , отнесенное к высоте канала;

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;

$\beta$  – угол между ребром и осью основного канала, град;

$2\beta$  – угол скрещивания ребер. Угол между подканалами вихревой матрицы, град;

$\delta$  – толщина пограничного слоя, м;

$\delta^*$  – толщина вытеснения, м;

$\delta^{**}$  – толщина потери импульса, м;

$\Delta p$  – перепад статического давления между точками отбора, Па;

$\eta$  – коэффициент теплогидравлической эффективности;

$\lambda/\lambda_0$  – относительный коэффициент сопротивления;

$\lambda_0$  – коэффициент сопротивления на гладкой поверхности;

$\lambda_{возд}$  – теплопроводность воздуха, Вт/(м<sup>2</sup>град);

$\xi/\xi_0$  – относительный коэффициент гидравлического сопротивления;

$\xi_0$  – коэффициент гидравлического сопротивления на гладкой поверхности;

$\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$\nu$  – кинетическая вязкость воздуха, м<sup>2</sup>/с.



**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Trdatyan, S. A. Friction and heat transfer on a honeycomb surface in laminar and turbulent flows / S. A. Trdatyan, A. A. Klimov // Proc. of the 12th Intern. Heat Transfer Conf. (2002, Grenoble, France). – Grenoble, 2002. – Vol. 2. – P. 609–614.
2. Трдатьян, С. А. Пограничный слой на сотовой поверхности при натекании на нее ламинарного потока / С. А. Трдатьян, А. А. Климов // Труды 3-й Рос. нац. конф. по теплообмену (2002, Москва, Россия). – Москва, 2002. – Т. 2. «Вынужденная конвекция однофазной жидкости». – Издательство МЭИ. – С. 281–284.
3. Климов, А. А. Использование сотовой поверхности для управления пограничным слоем / А. А. Климов, С. А. Трдатьян // Теплофизика Высоких Температур. – 2003. – Т. 41 (6). – С. 901–906.
4. Трдатьян, С. А. Течение на сотовой поверхности в конфузормом канале при втекании в него ламинарного потока / С. А. Трдатьян, А. А. Климов // Тепловые процессы в технике. – 2010. – Т. 2 (1). – С. 10–13.
5. Кикнадзе, Г. И. Самоорганизация смерчеобразных струй в потоках вязких сплошных сред и интенсификация тепломассообмена, сопровождающая это явление / Г. И. Кикнадзе, И. А. Гачечиладзе, В. В. Алексеев. – М. : Издательство МЭИ, 2005. – 84 с.
6. Исаев, С. А. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена при турбулентном обтекании сферической лунки на стенке узкого канала / С. А. Исаев, А. И. Леонтьев // Теплофизика Высоких Температур. – 2003. – Т. 41 (5). – С. 755–770.
7. Isaev, S. A. Influence of the Reynolds number and the spherical dimple depth on the turbulent heat transfer and hydraulic loss in a narrow channel / S. A. Isaev, N. V. Kornev, A. I. Leontiev, E. Hassel // Int. J. of Heat and Mass Transfer. – 2010. – Vol. 53 (1–3). – P. 178–197. – DOI : 10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2009.09.042.
8. Халатов, А. А. Теплообмен и гидродинамика около поверхностных углублений (лунок) / А. А. Халатов. – Киев : ИТТФ НАН Украины, 2005. – 76 с.

9. Гортышов, Ю. Ф. Теплогидравлическая эффективность перспективных способов интенсификации теплоотдачи в каналах теплообменного оборудования. Интенсификация теплообмена: монография / Ю. Ф. Гортышов, И. А. Попов, В. В. Олимпиев, А. В. Щелчков, С. И. Каськов; под общей ред. Ю. Ф. Гортышова. – Казань : Центр инновационных технологий, 2009. – 531 с.
10. Ligrani, P. M. Flow structure and local Nusselt number variation in a channel with dimples and protrusions on opposite walls / P. M. Ligrani, G. I. Mahmood, J. L. Harrison, C. M. Clayton, D. L. Nelson // *Int. J. of Heat and Mass Transfer*. – 2001. – Vol. 44 (23). – P. 4413–4425. – DOI : 10.1016/S0017-9310(01)00101-6.
11. Xie, G. Numerical predictions of augmented transfer of an internal blade tip-wall by hemispherical dimples / G. Xie, B. Sunden // *Int. J. of Heat and Mass Transfer*. – 2010. – Vol. 53 (25–26). – P. 5639–5650. – DOI : 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.08.019.
12. Волчков, Э. П. Некоторые результаты экспериментального исследования аэродинамики и теплообмена на поверхности с полусферическими кавернами / Э. П. Волчков, С. В. Калинина, И. И. Матрохин, Ю. М. Мшвидобадзе, В. И. Терехов, С. П. Третьяков, Н. И. Ярыгина // *Сиб. физ.-техн. журн.* – 1992. – Вып. 5. – С. 3–9.
13. Terekhov, V. I. Heat transfer coefficient and aerodynamic resistance on a surface with a single dimple / V. I. Terekhov, S. V. Kalinina, Yu. M. Mshvidobadze // *Enhanced Heat Transfer*. – 1997. – Vol. 4 (2). – P. 131–145. – DOI : 10.1615/JENHHEATTRANSF.V4.I2.60.
14. Терехов, В. И. Теплоотдача от каверны сферической формы, расположенной на стенке прямоугольного канала / В. И. Терехов, С. В. Калинина, Ю. М. Мшвидобадзе // *Теплофизика высоких температур*. – 1994. – Т. 32 (2). – С. 249–254.
15. Terekhov, V. I. Heat transfer from a spherical cavity located in the wake of another cavity / V. I. Terekhov, S. V. Kalinina, Yu. M. Mshvidobadze // *Thermophysics and Aeromechanics*. – 2001. – Vol. 8 (2). – P. 219–224.
16. Терехов, В. И. Структура течения и теплообмен при обтекании единичной сферической каверны. Состояние вопроса и проблемы (обзор) / В. И. Терехов, С. В. Калинина // *Теплофизика и аэромеханика*. – 2002. – Т. 9 (4). – С. 497–520.

17. Ануров, Ю. М. Опытное исследование гидравлических сопротивлений в прямых щелевых каналах с упорядоченными системами сферических углублений / Ю. М. Ануров, К. Д. Андреев, В. Г. Полищук, В. А. Рассохин, Н. П. Соколов // Теплоэнергетика. – 2007. – № 7. – С. 40–45.
18. Калинин, Э. К. Интенсификация теплообмена в каналах / Э. К. Калинин, Г. А. Дрейцер, С. А. Ярхо. – М. : Машиностроение, 1981. – 205 с.
19. Ekkad, S. V. Detailed heat transfer distributions in two-pass square channels with rib turbulators / S. V. Ekkad, J.-C. Han // Int. J. of Heat and Mass Transfer. – 1997. – Vol. 40 (11). – P. 2525–2537. – DOI : 10.1016/S0017-9310(96)00318-3.
20. Gao, X. Heat transfer distribution in rectangular ducts with V-shaped ribs / X. Gao, B. Sunden // Int. J. of Heat and Mass Transfer. – 2001. – Vol. 37. – P. 315–320. – DOI : 10.1007/s002310000148.
21. Bergmann, J. Comparison of experimental and numerical investigation on local and global heat transfer in turbulent square channel flow with roughness elements in the form of V-shaped broken ribs / J. Bergmann, M. Fiebig // Flow, Turbulence and Combustion. – 1999. – Vol. 62. – P. 163–181. – DOI : 10.1023/A:1009943429753.
22. Iaccarino, G. Conjugate heat transfer predictions in two-dimensional ribbed passages / G. Iaccarino, A. Ooi, P. A. Durbin, M. Behnia // Int. J. of Heat and Fluid Flow. – 2002. – Vol. 23 (3). – P. 340–345. – DOI : 10.1016/S0142-727X(02)00181-9.
23. AL-Hadhrami, L. Heat transfer in two-pass rotating rectangular channels ( $AR=2$ ) with five different orientations of 45 deg V-shaped rib turbulators / L. AL-Hadhrami, T. Griffith, J.-C. Han // Journal of Heat Transfer. – 2003. – Vol. 125 (2). – P. 232–242. – DOI : 10.1115/1.1561455.
24. Tanda, G. Heat transfer in rectangular channels with transverse and V-shaped broken ribs / G. Tanda // Int. J. of Heat and Mass Transfer. – 2004. – Vol. 47 (2). – P. 229–243. – DOI : 10.1016/S0017-9310(03)00414-9.
25. Won, S. Y. Flow structure and local Nusselt number variations in a channel with angled crossed-rib turbulators / S. Y. Won, G. I. Mahmood, P. M. Ligrani // Int. J. of Heat and Mass Transfer. – 2003. – Vol. 46 (17). – P. 3153–3166. – DOI : 10.1016/S0017-9310(03)00103-0.

26. Tsia, J. P. Measurements of heat transfer and fluid flow in a rectangular duct with alternate attached-detached rib-arrays / J. P. Tsia, J. J. Hwang // *Int. J. of Heat and Mass Transfer*. – 1998. – Vol. 42. – P. 2072–2083.
27. Bonhoff, B. Experimental and numerical study of developed flow and heat transfer in coolant channels with 45 degree ribs / B. Bonhoff, S. Parneix, J. Leusch, B. V. Johnson, J. Schabacker, A. Bolcs // *Int. J. of Heat and Fluid Flow*. – 1999. – Vol. 20. – P. 311–319.
28. Viswanathan, A. K. Detached eddy simulation of turbulent flow and heat transfer in a ribbed duct / A. K. Viswanathan, D. K. Tafti // *Journal of Fluids Engineering*. – 2005. – Vol. 127. – P. 888–896. – DOI : 10.1115/1.2033010.
29. Murata, A. Comparison between laminar and turbulent heat transfer in a stationary square duct with transverse or angled rib turbulators / A. Murata, S. Mochizuki // *Int. J. of Heat and Mass Transfer*. – 2001. – Vol. 44 (6). – P. 1127–1141. – DOI : 10.1016/S0017-9310(00)00180-0.
30. Islam, M. S. Experimental analysis of turbulent flow structure in a fully developed rib-roughened rectangular channel with PIV / M. S. Islam, K. Haga, M. Kaminaga, R. Hino, M. Monde // *Experiments in Fluids*. – 2002. – Vol. 33. – P. 296–306. – DOI : 10.1007/s00348-002-0432-9.
31. Astarita, T. Convective heat transfer in ribbed channels with a 180° turn / T. Astarita, G. Cardone, G. M. Carlomagno // *Experiments in Fluids*. – 2002. – Vol. 33. – P. 90–100. – DOI : 10.1007/s00348-002-0460-5.
32. Jang, Y.-J. Computation of flow and heat transfer in two-pass channels with 60 deg ribs / Y.-J. Jang, H.-C. Chen, J.-C. Han // *Journal of Heat Transfer*. – Vol. 123 (3). – P. 563–575. – DOI : 10.1115/1.1371931.
33. Won, S. Y. Comparisons of flow structure and local Nusselt numbers in channels with parallel- and crossed-rib turbulators / S. Y. Won, P. M. Ligrani // *Int. J. of Heat and Mass Transfer*. – 2004. – Vol. 47 (8–9). – P. 1573–1586. – DOI : 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2003.10.026.

34. Gao, X. Effects of inclination angle of ribs on the flow behavior in rectangular ducts / X. Gao, B. Sunden // *J. of Fluids Engineering*. – 2004. – Vol. 126. – P. 692–699. – DOI : 10.1115/1.1778715.
35. Терехов, В. И. Теплообмен в дозвуковых отрывных потоках / В. И. Терехов, Т. В. Богатко, А. Ю. Дьяченко, Я. И. Смутьский, Н. И. Ярыгина. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2018. – 247 с.
36. Terekhov, V. I. Heat transfer in highly turbulent separated flows: a review / V. I. Terekhov // *Energies*. – 2021. – Vol. 14 (4). – P. 1005. – DOI : 10.3390/en14041005.
37. Давлетшин, И. А. Отрыв пульсирующего потока / И. А. Давлетшин, Н. И. Михеев, В. М. Молочников // *Доклады Академии Наук*. – 2007. – Т. 417 (6). – С. 760–763.
38. Давлетшин, И. А. Турбулентный отрыв потока и характеристики теплообмена в условиях гидродинамической нестационарности / И. А. Давлетшин, О. А. Душина, Ф. С. Занько, Н. И. Михеев, В. М. Молочников // *Изв. РАН, Энергетика*. – 2011. – № 1. – С. 56–69.
39. Буглаев, В. Т. Экспериментальное исследование гидравлических сопротивлений в канале с сотовой структурой / В. Т. Буглаев, В. Т. Перевезенцев, М. А. Шилин // *Вестник Брянского государственного технического университета*. – 2012. – Т. 3 (35). – С. 84–89.
40. Буглаев, В. Т. Экспериментальное исследование теплообмена в канале с сотовой структурой / В. Т. Буглаев, В. Т. Перевезенцев, М. А. Шилин, В. М. Шкодин // *Вестник Брянского государственного технического университета*. – 2013. – Т. 1 (37). – С. 72–79.
41. Butt, U. Experimental investigation of the flow over macroscopic hexagonal structured surfaces : doctors thesis / Usman Butt. – Brandenburg, 2014. – 101 p. – urn:nbn:de:kobv:col-opus4-30555.
42. Батт, У. Структура течения на плоской поверхности при наличии гексагональных полостей и выступов / У. Батт, К. Эгберс // *Теплофизика и аэромеханика*. – 2016. – Т. 23 (6). – С. 875–884. – DOI : 10.1134/S0869864316060068.

43. Butt, U. Mechanism of drag reduction for circular cylinders with patterned surface / U. Butt, L. Jehring, C. Egbers // *Int. J. of Heat and Fluid Flow*. – Vol. 45 (1). – P. 128–134. – DOI : 10.1016/j.ijheatfluidflow.2013.10.008.
44. Control of turbulence through a row on Helmholtz resonators / R. L. Panton, K. P. Flynn, D. G. Bogard // *Proc. of the AIAA 25th Aerospace Sciences Meeting (12–15 January 1987, Reno, USA)*. – Reno, 1987. – AIAA–87–0436. – P. 1–7.
45. Ковальногов, Н. Н. Течение и сопротивление трения турбулентного потока в перфорированной трубе с демпфирующими полостями / Н. Н. Ковальногов, Л. В. Хахалева // *Изв. высших учебных заведений. Авиационная техника*. – 2002. – № 3. – С. 19–21.
46. Ковальногов, Н. Н. Ламинаризация течения в перфорированной трубе с демпфирующими полостями / Н. Н. Ковальногов, Л. В. Хахалева, Е. Ю. Седова, Д. А. Буинов // *Вестник УлГТУ*. – 2002. – Т. 3 (19). – С. 101–108.
47. Влияние демпфирующих полостей на интенсивность обменных процессов турбулентного потока в перфорированной трубе / Н. Н. Ковальногов, Л. В. Хахалева // *Труды 3-й Рос. нац. конф. по теплообмену (2002, Москва, Россия)*. – Москва, 2002. – Т. 6. «Интенсификация теплообмена». – Издательство МЭИ. – С. 122–125.
48. Ковальногов, Н. Н. Модель турбулентного переноса в пограничном слое на перфорированной поверхности с глухими демпфирующими полостями / Н. Н. Ковальногов // *Проблемы энергетики*. – 2003. – № 5–6. – С. 41–47.
49. Leon, O. Near-wall aerodynamic response of an acoustic liner to harmonic excitation with grazing flow / O. Leon, F. Mery, E. Piot, C. Conte // *Experiments in Fluids*. – 2019. – Vol. 60 (9). – Article number: 144. – DOI : 10.1007/s00348-019-2791-5.
50. Lewandowski, W. M. The limitation of heat losses from horizontal surfaces by a layer of open hexagonal cells / W. M. Lewandowski, H. Bieszk, P. Kubski, T. Wilczewski, M. Buzuk, S. Szymahki // *Chem. Engin. and Proces.* – 1996. – Vol. 35 (3). – P. 195–201. – DOI : 10.1016/0255-2701(95)04121-4.

51. Терехов, В. И. Структура пограничного слоя при обтекании сотовой поверхности в плоском канале / В. И. Терехов, Я. И. Смутьский, К. А. Шаров, А. В. Золотухин // Теплофизика и аэромеханика. – 2014. – Т. 21 (6). – С. 719–724.
52. Terekhov, V. I. Investigating the influence of cells with various geometric parameters on the air flow in the channel / V. I. Terekhov, Ja. I. Smulsky, K. A. Sharov, A. V. Zolotukhin // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 980 (1). – P. 012027. – DOI : 10.1088/1742-6596/980/1/012027.
53. Zimmerer, C. Comparison of heat and mass transfer in different heat exchanger geometries with corrugated walls / C. Zimmerer, P. Gschwind, G. Gaiser, V. Kottke // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2002. – Vol. 26 (2). – P. 269–273. – DOI : 10.1016/S0894-1777(02)00136-X.
54. Ma, T. Numerical study on thermo-hydraulic performance of an offset-bubble primary surface channels / T. Ma, M. Zeng, T. Luo, Y.-T. Chen, Q.-W. Wang // Applied Thermal Engineering. – 2013. – Vol. 61 (1). – P. 44–53.
55. Metwally, H. M. Enhanced heat transfer due to curvature-induced lateral vortices in laminar flows in sinusoidal corrugated-plate channels / H. M. Metwally, R. M. Manglik // Int. J. of Heat and Mass Transfer. – 2004. – Vol. 47 (10–11). – P. 2283–2292. – DOI : 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2003.11.019.
56. Tsai, Y.-C. Investigations of the pressure drop and flow distribution in a chevron-type plate heat exchanger / Y.-C. Tsai, F.-B. Liu, P.-T. Shen // Int. Commun. in Heat and Mass Transfer. – 2009. – Vol. 36 (6). – P. 574–578. – DOI : 10.1016/j.icheatmasstransfer.2009.03.013.
57. Karlsson, G. Numerical study of heat transfer, flow fields, turbulent length scales, and anisotropy in corrugated heat exchanger channels / G. Karlsson, C. Fureby, L. Wang, C. Norberg // Physics of Fluids. – 2022. – Vol. 34 (5). – P. 055123. – DOI : 10.1063/5.0089839.
58. Sundberg, J. Heat transfer correlations for gas turbine cooling / J. Sundberg. – Linköping University, 2006. – 280 p.
59. Heat transfer enhancement for turbine blade internal cooling / L. M. Wright, J.-C. Han // Journal of Enhanced Heat Transfer. – Proc. of the ASME 2013 Heat Transfer

- Summer Conference (14–19 July 2013, Minneapolis, MN, USA). – Minneapolis, 2013. – Vol. 21 (2). – 14 p. – DOI : 10.1115/HT2013-17813.
60. Nagoga, G. Intensification of the heat transfer in the cooling ducts of the gas turbine blade / G. Nagoga. – Finspång HTC Database, Folder No. 1. – Alstom, Russia, 2000.
61. Egger, C. Combined experimental/numerical method using infrared thermography and finite element analysis for estimation of local heat transfer distribution in an internal cooling system / C. Egger, J. von Wolfersdorf, M. Schnieder // Journal of Turbomachinery. – 2013. – Vol. 136 (6). – 12 p. – DOI : 10.1115/GT2013-95472.
62. Han, J. C. Augmented heat transfer in rectangular channels of narrow aspect ratios with rib turbulators / J. C. Han, S. Ou, J. S. Park, C. K. Lei // Int. J. of Heat and Mass Transfer. – 1989. – Vol. 32 (9). – P. 1619–1630. – DOI : 10.1016/0017-9310(89)90044-6.
63. Prajapati, A. Thermal visualization and performance evaluation of the open matrix structures using liquid crystal thermography / A. Prajapati, A. Tariq // J. of Flow Visualization and Image Processing. – 2018. – Vol. 25 (3–4). – P. 277–295. – DOI : 10.1615/JFlowVisImageProc.2018027508.
64. Deng, H. Experimental study on heat transfer and flow resistance in improved latticework cooling channels / H. Deng, K. Wang, J. Zhu, W. Pan // J. Thermal Science. – 2013. – Vol. 22 (3). – P. 250–256. – DOI : 10.1007/s11630-013-0620-3.
65. Carcasci, C. Heat transfer and pressure loss measurements of matrix cooling geometries for gas turbine airfoils / C. Carcasci, B. Facchini, M. Pievaroli, L. Tarchi, A. Ceccherini, L. Innocenti // J. of Turbomachinery. – 2014. – Vol. 136 (12). – P. 121005. – DOI : 10.1115/1.4028237.
66. Maletzke, F. Investigation of the influence of geometrical parameters on heat transfer in matrix cooling a computational fluid dynamics approach / F. Maletzke. – Linköpings Universitet, 2021. – 103 p.
67. Oh, I. T. Local heat/mass transfer and friction loss measurement in a rotating matrix cooling channel / I. T. Oh, K. M. Kim, D. H. Lee, J. S. Park, H. H. Cho // J. of Heat Transfer. – 2009. – Vol. 134 (1). – P. 773–782. – DOI : 10.1115/GT2009-59873.



68. Local heat/mass transfer and friction loss measurement in a rotating matrix cooling channel / I. T. Oh, K. M. Kim, D. H. Lee, J. S. Park, H. H. Cho // *Journal of Heat Transfer*. – Proc. of the ASME Turbo Expo 2009: Power for Land, Sea and Air (8–12 June 2009, Orlando, Florida, USA). – Orlando, 2009. – Vol. 134 (1). – P. 773–782. – DOI : 10.1115/GT2009-59873.
69. Luo, J. Computational analysis of turbulent flow and heat transfer in latticework cooling structures under various flow configurations / J. Luo, Y. Rao, L. Yang, M. Yang, H. Su // *Int. J. of Thermal Sciences*. – 2021. – Vol. 164. – P. 106912. – DOI : 10.1016/j.ijthermalsci.2021.106912.
70. Heat transfer and pressure measurements in a lattice-cooled trailing edge of a turbine airfoil / K. Saha, S. Guo, S. Acharya, C. Nakamata // *Proc. of the ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea and Air* (9–13 June 2008, Berlin, Germany). – Berlin, 2008. – GT2008-51324. – P. 1117–1125. – DOI : 10.1115/GT2008-51324.
71. Heat transfer and pressure drop in a converging lattice structure for airfoil trailing edge cooling / K. Saha, S. Acharya, C. Nakamata // *Proc. of the ASME 2008 International Mechanical Engineering Congress and Exposition* (31 October – 6 November 2008, Boston, Massachusetts, USA). – Boston, 2008. – IMECE2008-68152. – P. 1175–1184. – DOI : 10.1115/IMECE2008-68152.
72. Heat transfer and pressure drop in a lattice channel with bleed holes / K. Saha, S. Acharya, C. Nakamata // *Proc. of the ASME 2012 Summer Heat Transfer Conference* (8–12 July 2012, Rio Grande, Puerto Rico). – HT2012-58531. – P. 863–871. – DOI : 10.1115/HT2012-58531.
73. Saha, K. Heat transfer enhancement and thermal performance of lattice structures for internal cooling of airfoil trailing edges / K. Saha, S. Acharya, C. Nakamata // *J. of Thermal Science and Eng. Appl.* – 2013. – Vol. 5 (1). – P. 011001. – DOI : 10.1115/1.4007277.
74. Yang, L. Cooling effectiveness of matrix, pin fin array and hybrid structure: A comparative study / L. Yang, Y. Luan, S. Bu, H. Sun, F. Magagnato // *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers Part G: Journal of Aerospace Engineering*. – 2020. – Vol. 235 (9). – DOI : 10.1177/0954410020965401.

75. Arik, M. Electronics packaging cooling: technologies from gas turbine engine cooling / M. Arik, R. S. Bunker // *Journal of Electronic Packaging*. – 2006. – Vol. 128 (3). – P. 215–225. – DOI : 10.1115/1.2229219.
76. Bunker, R. S. Innovative gas turbine cooling techniques / R. S. Bunker // *GE Global Research Center, USA WIT Transactions on State of the Art in Science and Engineering*. – 2008. – Vol. 42. – P. 199–229. – DOI : 10.2495/978-1-84564-062-0/07.
77. Evolution of turbine cooling / R. S. Bunker // *Proc. of the ASME Turbo Expo 2017: Turbomachinery Technical Conference and Exposition (26–30 June 2017, Charlotte, USA)*. – Charlotte, 2017. – GT2017-63205. – V001T51A001. – 26 p. – DOI : 10.1115/GT2017-63205.
78. Latticework (vortex) cooling effectiveness: Part 1 – stationary channel experiments / R. S. Bunker // *Proc. of the ASME Turbo Expo 2004: Power for Land, Sea, and Air (14–17 June 2004, Vienna, Austria)*. – Vienna, 2004. – DOI : 10.1115/GT2004-54157.
79. Hosseinalipour, S. M. A numerical frame work for heat transfer and pressure loss estimation of matrix cooling geometry in stationary and rotational states / S. M. Hosseinalipour, P. Afkari, H. Shahbazian, B. Sunden // *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*. – 2019. – Vol. 76 (5). – P. 348–368. – DOI : 10.1080/10407782.2019.1630236.
80. Su, S. An numerical investigation of fluid flow and heat transfer in a turbine blade with serpentine passage and latticework cooling / S. Su, J.-J. Liu, J.-l. Fu, J. Hu, Bai-Tao // *Proc. of the ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea and Air (9–13 June 2008, Berlin, Germany)*. – Berlin, 2008. – GT2008-50392.
81. Bu, S. The influence of lateral ejection on the thermal performance of matrix cooling channel / S. Bu, C. Shi, L. Zhang, W. Xu, L. Liu // *Applied Thermal Engineering*. – 2019. – Vol. 157 (8). – P. 113506. – DOI : 10.1016/j.applthermaleng.2019.03.077.
82. Bu, S. Research on the thermal performance of matrix cooling channel with response surface methodology / S. Bu, Z. Yang, W. Zhang, H. Liu, H. Sun // *Applied Thermal Engineering*. – 2016. – Vol. 109 (Part A). – P. 75–86. – DOI : 10.1016/j.applthermaleng.2016.08.005.

83. Computational study of flow and heat transfer in matrix cooling channels / S. R. Ramireddy, P. G. Siddappa, V. Kesavan, S. K. Kumar // Proc. of the ASME 2014 Gas Turbine India Conference (15–17 December 2014, New Delhi, India). – New Delhi, 2014. – GTINDIA2014-8252. – V001T04A007. – 7 p. – DOI : 10.1115/GTINDIA2014-8252.
84. Numerical investigation on flow and heat transfer in a lattice (matrix) cooling channel / T. Hagari, K. Ishida // Proc. of the ASME Turbo Expo 2013: Turbine Technical Conference and Exposition (3–7 June 2013, San Antonio, Texas, USA). – San Antonio, 2013. – GT2013-95412. – V03AT12A040. – 10 p. – DOI : 10.1115/GT2013-95412.
85. Tsuru, T. Three-dimensional visualization of flow characteristics using a magnetic resonance imaging (MRI) in a lattice cooling channel / T. Tsuru, K. Ishida, J. Fujita, K. Takeishi // J. of Turbomachinery. – 2019. – Vol. 141 (6). – P. 061003. – DOI : 10.1115/1.4041908.
86. Tsuru, T. Study on thermofluid characteristics of a lattice cooling channel / T. Tsuru, R. Morozumi, K. Takeishi // Int. J. of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems. – 2020. – Vol. 11 (1). – P. 1–8. – DOI : 10.38036/jgpp.11.1\_1.
87. Focke, W. W. The effect of the corrugation inclination angle on the thermohydraulic performance of plate heat exchangers / W. W. Focke, J. Zachariades, I. Olivier // Int. J. of Heat and Mass Transfer. – 1985. – Vol. 28 (8). – P. 1469–1479. – DOI : 10.1016/0017-9310(85)90249-2.
88. Du, W. Numerical investigation of flow field and heat transfer characteristics in a latticework duct with jet cooling structures / W. Du, L. Luo, S. Wang, J. Liu, B. Sunden // Int. J. of Thermal Sciences. – 2020. – Vol. 158 (7). – P. 106553. – DOI : 10.1016/j.ijthermalsci.2020.106553.
89. Du, W. Heat transfer and flow structure in a detached latticework duct / W. Du, L. Luo, S. Wang, J. Liu, B. Sunden // Applied Thermal Engineering. – 2019. – Vol. 155. – P. 24–39. – DOI : 10.1016/j.applthermaleng.2019.03.148.
90. Large eddy simulation of flow and heat transfer mechanism in matrix cooling channel / Y. Luan, L. Yang, B. Wan, T. Sun // Proc. of the ASME Turbo Expo 2017:

Turbomachinery Technical Conference and Exposition (26–30 June 2017, Charlotte, NC, USA). – Charlotte, 2017. – GT2017-63515. – V05AT11A003. – 10 p. – DOI : 10.1115/GT2017-63515.

91. Flow and heat transfer characteristics in latticework cooling channels with dimple vortex generators / Y. Rao, X. Zhang, S. Zang // Proc. of the ASME Turbo Expo 2013: Turbine Technical Conference and Exposition (3–7 June 2013, San Antonio, Texas, USA). – San Antonio, 2013. – GT2013-95237. – V03AT12A036. – 10 p. – DOI : 10.1115/GT2013-95237.

92. Александренков, В. П. Теплогидравлическая эффективность применения компланарных трактов охлаждения камер ЖРД / В. П. Александренков // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Машиностроение”. – 2015. – № 2. – С. 44–56.

93. Горелов, Ю. Г. Интенсификация теплообмена и трения в вихревых матрицах с полуцилиндрическими выступами на поверхности ребер / Ю. Г. Горелов // Изв. высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2002. – № 2. – С. 33–37.

94. Пелевин, Ф. В. Применение компланарных каналов в технике / Ф. В. Пелевин, О. И. Ильинская, С. А. Орлин // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2014. – № 37. – С. 71–85.

95. The investigation of heat transfer in cooled blades of gas turbines / V. Goreloff, M. Goychengerg, V. Malkoff // Proc. of the 26th Joint Propulsion Conference (16–18 July 1990, Orlando, FL). – Orlando, 1990. – AIAA 90-2144.

96. Numerical investigation on flow and heat transfer in matrix cooling channels for turbine blades / Y. Luan, S. Bu, H. Sun, T. Sun // Proc. of the ASME Turbo Expo 2016: Power for Land, Sea, and Air (13–17 June 2016, Seoul, South Korea). – Seoul, 2016. – GT2016-56279. – V05BT11A005. – 12 p. – DOI : 10.1115/gt2016-56279.

97. Gschwind, P. Transport phenomena in micro heat exchangers with corrugated walls / P. Gschwind, G. Gaiser, C. Zimmerer, V. Kottke // Microscale Thermophysical Engineering. – 2001. – Vol. 5 (4). – P. 285–292. – DOI : 10.1080/10893950152646740.

98. Analysis and experimental visualization of the flow behavior between parallel separated cross-corrugated plates / J. M. Luna, R. Romero-Mendez, A. Hernandez-Guerrero, J. L. Luviano-Ortiz // Proc. of the ASME 2009 International Mechanical

Engineering Congress and Exposition (13–19 November 2009, Lake Buena Vista, Florida, USA). – Lake Buena Vista, 2009. – IMECE2009-11224. – P. 185–193. – DOI : 10.1115/IMECE2009-11224.

99. Reynolds number effects on flow in a spacer-filled channel / S. M. Mojab, S. B. Beale, J. G. Pharoah, A. Pollard, E. S. Hanff // Proc. of the 20th Annual Conference of the CFD Society of Canada (2012, Canmore, Alberta, Canada). – Canmore, 2012. – DOI : 10.1006/adnd.1995.1002.

100. Орлов, В. В. Измерение кинематических характеристик турбулентных потоков методом визуализации течения / В. В. Орлов. – В кн. С.С. Кутателадзе «Пристенная турбулентность». – Новосибирск : Наука, 1973. – с. 180–190.

101. Хабахпашева, Е. М. Поля скоростей и турбулентных пульсаций при малых добавках к воде высокомолекулярных веществ / Е. М. Хабахпашева, Б. В. Перепелица // Инженерно-физический журнал. – 1968. – Т. 14 (4). – С. 598.

102. Adrian, R. J. Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics / R. J. Adrian // Annual Review of Fluid Mechanics. – 1991. – Vol. 23 (1). – P. 261–304. – DOI : 10.1146/annurev.fluid.23.1.261.

103. Алексеенко, С. В. Применение метода цифровой трассерной визуализации для анализа турбулентных потоков с периодической составляющей / С. В. Алексеенко, А. В. Бильский, Д. М. Маркович // Приборы и техника эксперимента. – 2004. – № 5. – С. 145–153.

104. Михеев, Н. И. Метод измерения динамики векторных полей скорости турбулентного потока по видеосъемке дымовой визуализации / Н. И. Михеев, Н. С. Душин // Приборы и техника эксперимента. – 2016. – № 6. – С. 114–122.

105. Tropea, C. Laser Doppler anemometry: recent developments and future challenges / C. Tropea // Measurement Science and Technology. – 1995. – Vol. 6 (6). – P. 605–630. – DOI : 10.1088/0957-0233/6/6/001.

106. Kliebisch, O. Real-time laser Doppler anemometry for optical air data applications in low aerosol environments / O. Kliebisch, P. Mahnke // The Review of scientific instruments. – 2020. – Vol. 91 (9). – P. 095106. – DOI : 10.1063/5.0014389.

107. Kumara, W. A. S. Comparison of particle image velocimetry and Laser Doppler Anemometry measurement methods applied to the oil–water flow in horizontal pipe / W. A. S. Kumara, G. Elseth, B. M. Halvorsen, M. C. Melaaen // *Flow Measurement and Instrumentation*. – 2010. – Vol. 21 (2). – P. 105–117. – DOI : 10.1016/j.flowmeasinst.2010.01.005.
108. Zhang, Z. LDA Application Methods / Z. Zhang. – Springer-Verlag, 2010. – 272 p.
109. Shtork, S. I. Application of a Laser-Doppler anemometry for the study of unsteady flow structure in a model micro-hydro turbine / S. I. Shtork, I. V. Litvinov, E. Yu. Gorelikov, D. G. Mukhin, S. V. Dremov, D. A. Suslov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2019. – Vol. 1421 (1). – P. 012068. – DOI : 10.1088/1742-6596/1421/1/012068.
110. Зайдель, А. Н. Ошибки измерений физических величин: учебное пособие / А. Н. Зайдель. – 3-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2009. – 112 с.
111. Terekhov, V. I. Experimental study of a turbulent structure in coplanar channels / V. I. Terekhov, A. V. Zolotukhin, I. A. Chohar // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2020. – Vol. 1677 (1). – P. 012029. – DOI : 10.1088/1742-6596/1677/1/012029.
112. Terekhov, V. I. Experimental study of a flow structure in coplanar channels / V. I. Terekhov, A. V. Zolotukhin, I. A. Chohar // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2020. – Vol. 1683 (3). – P. 022088. – DOI : 10.1088/1742-6596/1683/2/022088.
113. Philippov, M. V. Reconstruction of the flow structure in a matrix channel based on two-component LDA data / M. V. Philippov, A. V. Zolotukhin, I. A. Chokhar, V. V. Terekhov, V. I. Terekhov, I. N. Baranov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – Vol. 2127 (1). – P. 012006. – DOI : 10.1088/1742-6596/2127/1/012006.
114. Philippov, M. V. Experimental study of the three-dimensional flow structure in matrix channels / M. V. Philippov, I. A. Chokhar, A. V. Zolotukhin, A. V. Barsukov, V. V. Terekhov, V. I. Terekhov, I. N. Baranov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – Vol. 2057 (1). – P. 012027. – DOI : 10.1088/1742-6596/2057/1/012027.
115. Золотухин, А. В. Экспериментальное исследование турбулентной структуры течения в ячейке решетчатой матрицы / А. В. Золотухин, И. А. Чохар, В. И. Терехов // *Теплофизика и аэромеханика*. – 2022. – № 6.

116. Davies, J. M. The aerodynamics of golf balls / J. M. Davies // *J. Applied Physics*. – 1949. – Vol. 20 (9). – P. 822–828.
117. Bearman, P. W. Control of circular cylinder flow by the use of dimples / P. W. Bearman, J. K. Harvey // *AIAA Journal*. – 1993. – Vol. 31 (10). – P. 1753–1756. – DOI : 10.2514/3.11844.
118. Lienhart, H. Drag reduction by dimples? – A complementary experimental/numerical investigation / H. Lienhart, M. Breuer, C. Koksoy // *Int. J. of Heat and Fluid Flow*. – 2008. – Vol. 29 (3). – P. 783–791. – DOI : 10.1016/j.ijheatfluidflow.2008.02.001.
119. Кутателадзе, С. С. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое / С. С. Кутателадзе, А. И. Леонтьев. – М. : Энергия, 1972. – 344 с.
120. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. – М. : Наука, 1969. – 742 с.
121. Барсуков, А. В. Численное исследование структуры турбулентного течения и теплообмена в плоском канале с гексагональными сотами различной глубины / А. В. Барсуков, В. В. Терехов, В. И. Терехов // *Сибирский Журнал Индустриальной Математики*. – 2022. (Принято к печати)
122. Terekhov, V. I. Forced-convection heat transfer from the bottom of trenches with rectangular or inclined walls / V. I. Terekhov, N. I. Yarygina // *Exp. Heat Transfer*. – 1996. – Vol. 9 (2). – P. 133–148. – DOI : 10.1080/08916159608946518.
123. Dyachenko, A. Yu. Vortex formation and heat transfer in turbulent flow past a transverse cavity with inclined frontal and rear walls / A. Yu. Dyachenko, V. I. Terekhov, N. I. Yarygina // *Int. J. of Heat and Mass Transfer*. – 2008. – Vol. 51 (13–14). – P. 3275–3286. – DOI : 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.11.039.
124. Нагога, Г. П. Теплообмен и гидравлическое сопротивление в трактах из компланарно-скрещивающихся каналов / Г. П. Нагога, И. С. Копылов, М. В. Рукин. – Рабочие процессы в охлаждаемых турбомашинах газотурбинных двигателей: Межвуз. науч. сб. – Казань : Изд-во КАИ, 1989. – С. 35–41.
125. Копылов, И. С. Теплообмен, гидросопротивление и макро-структура потока в трактах из компланарно-скрещивающихся каналов / И. С. Копылов, Г. П. Нагога.

- Тепломассообмен. – ММФ. Конвективный радиационный и комбинированный теплообмен. – Минск : ИМО им. А.В. Лыкова АН БССР, 1991. – С. 47–52.
126. Михеев, М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – Изд. 2-е, стереотип. – М. : Изд-во «Энергия», 1977. – 344 с.
127. Расчет и анализ внутренней теплоотдачи в охлаждаемых конструкциях с перекрестным течением охладителя / М. Н. Галкин [и др.] // Тез. докл. Всесоюз. конф.: Методы и средства машинной диагностики газотурбинных двигателей и их элементов (1983, Харьков). – Харьков: ХАИ, 1983. – С. 105–106.
128. Галкин, М. Н. Внутренняя теплоотдача в оребренных каналах со скрещивающимися струями охлаждающего воздуха / М. Н. Галкин, А. Н. Бойко, В. Г. Попов, Н. Л. Ярославцев // Машиностроение (Изв. высш. учеб. заведений). – 1984. – № 5. – С. 56–60.
129. Исследование теплообмена в системе охлаждения рабочих лопаток газовых турбин на базе вихревых матриц. Исследование гидравлики и теплообмена в каналах с вихревыми взаимопроникающими матрицами: отчет о НИР / Ленинградский гос. техн. ун-т. (ЛГТУ); рук. Арсеньев Л. В. – Л., 1991. – Инв. № 304009. – 70 с.
130. Лебедев, А. С. Совершенствование охлаждения лопаток газовых турбин с целью повышения их долговечности на основе исследования теплонапряженного состояния на переменных режимах : дис. ... канд. техн. наук : 05.04.12 / А. С. Лебедев. – Л. : ЛПИ, 2011. – 260 с.



**ПРИЛОЖЕНИЕ «А»**  
**СПРАВКА-ОТЗЫВ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ**  
**ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

Общество с ограниченной ответственностью  
**«КАТАВИСТА»**

ИНН 7731291559, КПП 540801001, ОГРН 1157746823794, ОКПО 40357195  
РФ, 630117, г. Новосибирск, ул. Демакова 18. Тел.: +7 913-947-53-48, E-mail: besov@catalysis.ru.

Исх № 2 от 09.09.2022

Вх № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Справка-отзыв.

ООО «КАТАВИСТА» с 2015 года занимается разработкой металлотетчатых каталитических реакторов полного окисления углеводородов (каталитических нагревательных элементов). Одной из узловых проблем разрабатываемых на их основе нагревательных систем является интенсификация процессов переноса, так как на данном этапе это основное ограничение на пути увеличения их удельной мощности. Особенно это актуально для совершенствования компактных нагревательных систем каталитического окисления водорода (для нужд водородной энергетики).

Для решения этой задачи было принято решение использовать теплообменники аппараты в виде компланарных каналов. При их разработке были использованы результаты экспериментальных исследований, выполненные в Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН. Эти результаты обобщены в кандидатской диссертации Золотухина А.В. «Аэродинамика и теплообмен в каналах с сотовыми поверхностями и вихревыми матрицами». Они послужили основой для проведения оптимизационного анализа конструкции теплообменного устройства с металлотетчатым каталитическим нагревательным элементом.

Генеральный директор  
ООО «КАТАВИСТА»



/А.С. Бесов/