

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

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» и Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск

Научный руководитель: **Терехов Виктор Иванович**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория термогазодинамики, главный научный сотрудник, г. Новосибирск

Официальные оппоненты:

Кузнецов Гений Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», научно-образовательный центр И.Н. Бутакова, профессор, г. Томск

Михеев Николай Иванович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», Институт энергетики и перспективных технологий, руководитель, г. Казань

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург

Защита диссертации состоится «7» апреля 2023 г. в 10⁰⁰ на заседании диссертационного совета 24.2.347.04 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, 1 корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» и на сайте www.nstu.ru.

Автореферат разослан «__» января 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, доцент



Олеся Владимировна Боруш

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. На сегодняшний день большую роль в энергетике 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 и 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 широком диапазоне параметров. 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 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 изучаются два типа макро-шероховатостей – это поверхности с ячейками гексагональной формы (сотами) и перекрещенные ребра, которые образуют компланарные каналы (вихревые или решетчатые матрицы). Такие устройства противоположно воздействуют на интенсивность теплообмена – на поверхностях с сотами он значительно подавляется, а в решетчатых матрицах – интенсифицируется. 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 Третьякова и Климова был обнаружен эффект проскальзывания потока воздуха над поверхностями с сотами. 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 двигателях), 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 значительно увеличивает сопротивление, но и способствует возрастанию теплообмена на 300 – 600% и более, что чрезвычайно актуально для снятия 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, Э.П. Волчков, 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. Трдастьян, 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: С. 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.

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.

2. Исследование аэродинамики в вихревых матрицах с различным углом пересечения ребер оптическими методами.

3. Исследование локального и интегрального теплообмена на поверхности вихревых матриц. Измерение аэродинамических потерь и параметра теплогидравлической эффективности. Сопоставление полученных данных с имеющимися литературными данными.

Методы исследований. Для исследования процессов были использованы современные бесконтактные оптические методы: PIV (Particle Image Velocimetry), LDA (Laser Doppler Anemometry) и тепловизионная 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 каверн с формированием возвратного течения, интенсивность которого заметно ниже у глубоких сот.

3. Впервые с помощью 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, как и пульсации скоростей.

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 в 4-7 раз больше по сравнению с гладким каналом.

5. Показано, что параметр теплогидравлической эффективности (ТГЭ) вихревой матрицы возрастает по мере увеличения угла между ребрами. С увеличением числа Рейнольдса величина ТГЭ понижается, но ее величина во всем диапазоне остается выше единицы.

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 трехмерного 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 ТГЭ вихревых матриц.

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 представления

докладов на конференциях производилась совместно с научным руководителем и консультантами.

Практическая значимость результатов проведенных исследований заключается в возможности использования их в разработке инженерных методов расчета теплообменных устройств в авиации, космонавтике, энергетике и химических технологиях. На данный момент полученные результаты использованы компанией ООО «Катависта» при создании эффективных теплообменников с каталитическими стенками для решения проблем водородной энергетики.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались 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, 2017 г.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.).

Публикации. 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.

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность исследования обтекания сотовых поверхностей и вихревых матриц. Описывается научная новизна, личный вклад соискателя, практическая значимость проделанной работы, перечисляются её основные цели и задачи, приведены положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ современного состояния исследований аэродинамики и теплообмена в каналах с макрошероховатостями сложных форм. Рассмотрен широкий класс вихрегенераторов в виде одиночных или системы ребер, каверн различной формы, лунки, траншеи и т.д. Отмечается огромный объем экспериментальных и численных исследований, полученных у нас в стране (Дрейцер Г.А., Калинин Э.К., Мигай В.К., Исаев С.А., Михеев Н.И., Попов И.А. и др.) и за рубежом (Han J.-C., Bergles A., Sunden B., Rao Y. et al.). Разнообразие сценариев течения, их сложность и зависимость от большого числа факторов не позволяют провести обобщения опытной информации и создать инженерные методы расчета подобных устройств.

Широкое распространение в качестве интенсификаторов теплообмена в практических приложениях получило оребрение стенок каналов. Если ребра на противоположных стенках располагаются под некоторым углом друг к другу, то это приводит к перекрестному течению теплоносителя и такие каналы получили название компланарных или вихревых (решетчатых) матриц. Такие каналы нашли широкое применение, и они продолжают активно исследоваться. Последние работы в данной области говорят о высоких потенциальных возможностях данного метода, когда интенсивность теплообмена возрастает в 3-6 раз и более. Однако большинство экспериментальных данных имеют интегральный характер в виде зависимости среднего теплообмена и гидравлических потерь от числа Рейнольдса (Александренков В.П., Ануров Ю.М., Нагога Г.П., Соколов Н.П.). Отсутствие данных о локальных аэродинамических и тепловых характеристиках в значительной мере затрудняет понимание сложных особенностей турбулентного течения и тепловых характеристик в ячейках вихревых матриц.

В результате анализа литературных источников были определены основные направления проводимых исследований и поставлены задачи настоящей диссертационной работы.

Во второй главе описаны методы, измерительная аппаратура и экспериментальное оборудование для решения поставленных в диссертации

задач. Представлен метод PIV, который дает возможность получения информации о динамике структур, их масштабов, пространственных и пространственно-временных корреляций и статистических характеристик потока. Часть измерений проведена с помощью метода LDA, для чего использовался двухкомпонентный анемометр ЛАД-06С (производство ИТ СО РАН).

Измерение распределения температуры на поверхности тепловых участков, производилось тепловизионной камерой Testo 890-2 (0563 0890 X1) с матрицей 640×480 пикселей.

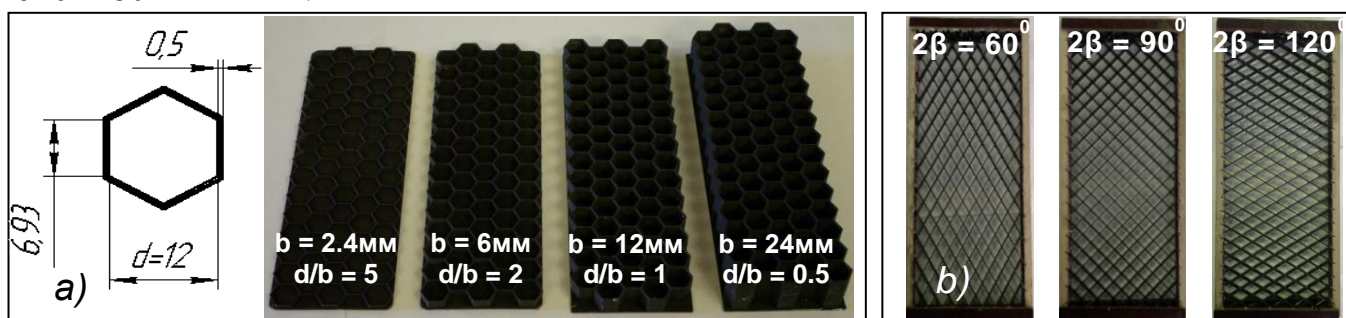


Рисунок 1 – Фото опытных участков сотовых поверхностей с различной глубиной ячеек равной 2.4, 6, 12 и 24 мм (а) и вихревых матриц с углами скрещивания $2\beta = 60^\circ$, 90° и 120° (b)

Специально разработанное программное обеспечение позволяло определять поле локальных температур по поверхности матрицы, а также их интегральные значения.

Объектами исследований были участки с сотовыми структурами гексагональной формы (Рисунок 1а) и компланарные каналы (Рисунок 1б). Рабочий канал имел прямоугольное сечение с геометрическими параметрами $20 \times 150 \times 1000 \text{ мм}^3$ и был выполнен из оптически прозрачного материала. Размеры сот в плане даны на рисунке 1а. Они были изготовлены на 3D принтере из пластмассы и имели толщину стенок 0.5 мм. Глубина сот была равной 2.4, 6, 12 и 24 мм. Опытные участки вихревых матриц имеют длину 400 мм, ширину 150 мм и высоту 20 мм. Ребра, которые образуют компланарные каналы, выполнены из стали толщиной 1 мм и шириной 10 мм.

Исследования теплообмена в вихревых матрицах выполнены в режиме $q_w = \text{const}$. Нагревательным элементом в тепловых участках является омически нагреваемая постоянным током стальная фольга толщиной 100 мкм, которая располагалась на обеих стенках матрицы. Кроме тепловизионных съемок температура стенок определялась набором термопар. Для сопоставительного анализа проводились эксперименты, когда ребра присутствовали только на одной из стенок, которая размещалась между ребрами компланарных каналов и текстолитовыми стенками.

Для определения гидравлических потерь как на участке с сотовыми поверхностями, так и с вихревой матрицей, использовался дифференциальный манометр ДМ-2. Потери определялись по разности статического давления до и после экспериментальной секции через отборники давления диаметром 0.8 мм, расположенные на расстоянии 200 мм до участка и 200 мм после него.

В третьей главе представлены результаты исследования течения потока в канале с сотовыми участками при различной глубине ячеек. Первая серия экспериментов была проведена с использованием PIV-системы. Результаты измерения продольной компоненты скорости и ее пульсаций демонстрируются на рисунке 2. В гладком канале профиль скорости имеет вид, характерный для течения между параллельными пластинами. На сотовой поверхности, по мере роста глубины ячеек наблюдается все более сильная деформация поля течения, так что профиль скорости становится все менее заполненным. Подобную картину можно наблюдать при ламинаризации течения. Однако этого явления в данном случае не происходит, о чем свидетельствуют данные по продольной компоненте пульсационной скорости. Как следует из рисунка 2b, эта величина в пристенной зоне сотовой поверхности в 2 раза выше, чем на гладкой. Более сильный эффект турбулизации имеет место на сотах с меньшей глубиной. Таким же образом ведет себя и нормальная к стенке компонента пульсационной скорости.

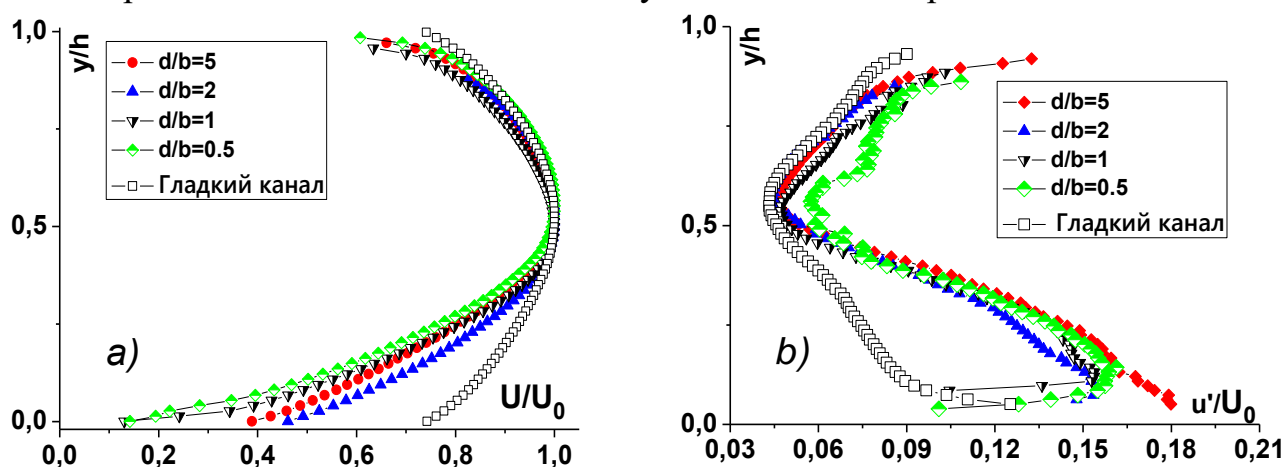


Рисунок 2 – Профили безразмерной: а) продольной скорости, б) продольных пульсаций в канале с сотовыми участками при $Re_D = 2.3 \times 10^4$, $z/h = 6.5$

Изучение течения внутри сотовых ячеек производилось с помощью LDA. Лазерные лучи при этом ориентировались нормально к поверхности, что позволяло определять две ортогональные компоненты скорости как по сечению канала, так и внутри сотовых ячеек. Сопоставление данных, полученных с помощью PIV и LDA, показало хорошее их соответствие в промежутке между верхней стенкой канала и границей сот.

Характерное распределение продольной скорости, включая и область внутри ячейки, показана на рисунке 3. Измерения проведены при постоянном числе

Рейнольдса $Re_D = 2.3 \times 10^4$ и на расстоянии $z/h = 5$ от начала сотовой поверхности. Как видно, 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 $\sim 30\%$ 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.

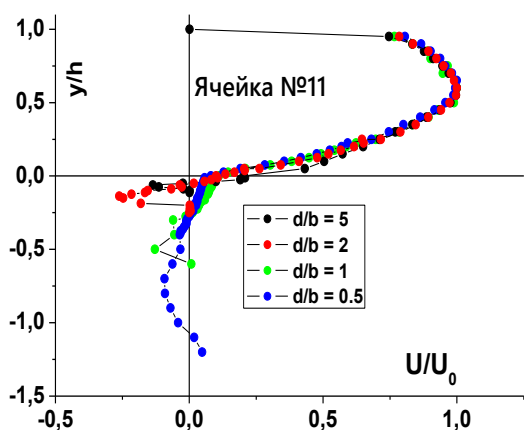


Рисунок 3 – Распределение скорости в канале с различной глубиной сот

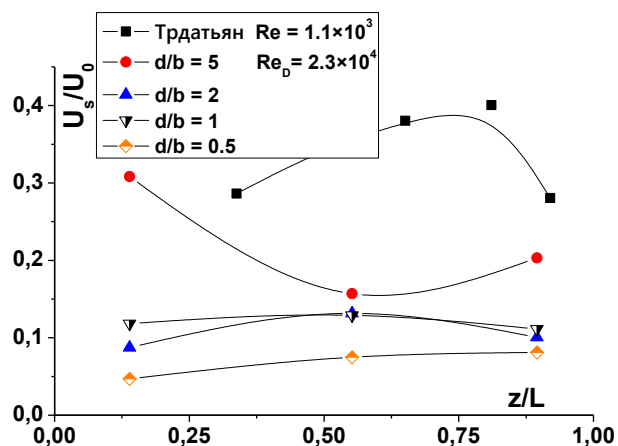


Рисунок 4 – Скорость скольжения газа на границе сот

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 $d/b \leq 1$ могут служить в качестве эффективной тепловой защиты. В то же время, соты с отношением $d/b > 1$ являются мощными пристенными турбулизаторами, что может быть актуально в ряде технологий в связи простотой изготовления сотовых структур и небольшой массы их конструкции.

Как видно из данных рисунка 3 на границе сотовой поверхности скорость газа не обращается в ноль, что обусловлено эффектом скольжения потока. Величина скорости скольжения, как это следует из данных рисунка 4, зависит как от глубины сот, так и продольной координаты. При обтекании мелких сот скорость скольжения максимальна и в начале канала она достигает 30% от скорости на оси

канала. По мере увеличения глубины сот эффект скольжения ослабляется и скорость на границе может снижаться более чем 5 раз. Полученные данные качественно и количественно отличаются от результатов экспериментов [1]. Одним из возможных факторов расхождения данных является отличие в геометрии опытного канала, в котором размещались модели сот, а также размеры гексагональных ячеек.

Важным параметром модифицированных поверхностей является их гидравлическое сопротивление. Результаты измерений гидравлических потерь в виде относительного коэффициента сопротивления λ/λ_0 от числа Рейнольдса для сот различной глубины представлены на рисунке 5. Гидравлические потери при обтекании сотовой поверхности значительно (в 2-4 раза) возрастают. Более сильное влияние на величину потерь оказывает число Рейнольдса и по мере его увеличения потери растут линейно.

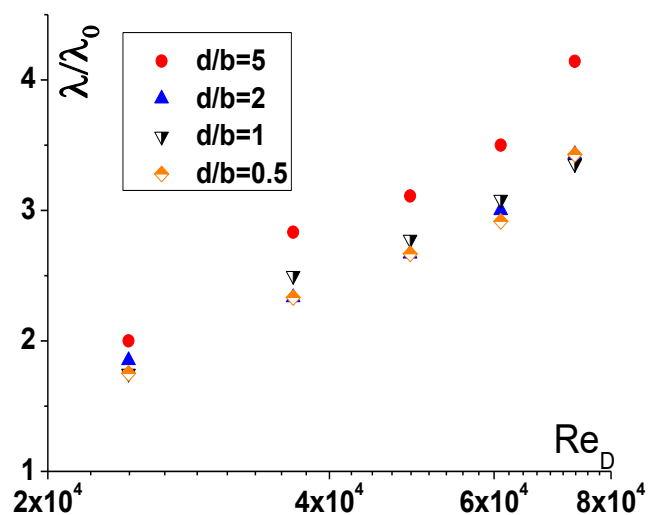


Рисунок 5 – Относительный коэффициент сопротивления поверхностей с сотами различной глубины

Глубина сот сказывается не столь сильно, но при этом есть устойчивая тенденция увеличения потерь для мелких сот. Таким образом, экспериментально установлено, что увеличение глубины сот вызывает большую деформацию профиля скорости в пограничном слое и рост турбулентных пульсаций на внешней границе сот. Кроме того, было обнаружено, что внутри сот течение подобно обтеканию лунок с формированием возвратного течения, интенсивность которого заметно ниже у глубоких сот. 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 росте турбулентных пульсаций и гидравлического сопротивления.

В четвертой главе представлены результаты исследования аэродинамики внутри отдельных ячеек, образованных скрещивающимися ребрами вихревой матрицы, полученные с помощью бесконтактного оптического метода LDA. Вихревая матрица имеет систему одинаковых по толщине и высоте ребер,

[1] Климов А.А., Трдастьян С.А. Использование сотовой поверхности для управления пограничным слоем // ТВТ.2003. Т. 41. №6. С. 901-906;

которые закрепляются либо на широких стенках основного тракта, либо на боковых (как сделано в данной работе), для создания системы параллельных каналов, скрещивающихся под углом 2β 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 высокой интенсивности теплообмена 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.

Предварительные измерения с помощью двухкомпонентной системы LDA 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 стенке канала. Целью второго этапа было измерение нормальной к поверхности канала компоненты скорости U_y . Для этого оптическая система поворачивалась на угол θ относительно нормали к поверхности, так чтобы данная компонента проецировалась на интерференционную решетку измерительного объема. 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 (Рисунок 6). 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 $(1 - 7) \times 10^4$. На рисунке 6 даны направления координатных осей, связанных как с основным каналом (Z-X), так и с подканалами (r-s). Профили скорости измерялись в двенадцати точках по горизонтали с шагом 1 мм. Расположение измерительных точек показано на рисунке 6б. Число измерительных точек по высоте канала было не менее 70. Профили относительной продольной U_z и трансверсальной U_x скоростей по высоте канала в центре ячейки вихревой матрицы ($x = 0$) представлены на рисунке 7. В качестве масштаба использовалась среднерасходная скорости в канале U_m . Как видно из представленных данных на рисунке 7а, продольная компонента скорости U_z в центре ячейки с углом $2\beta = 90^\circ$ является симметричной относительно середины

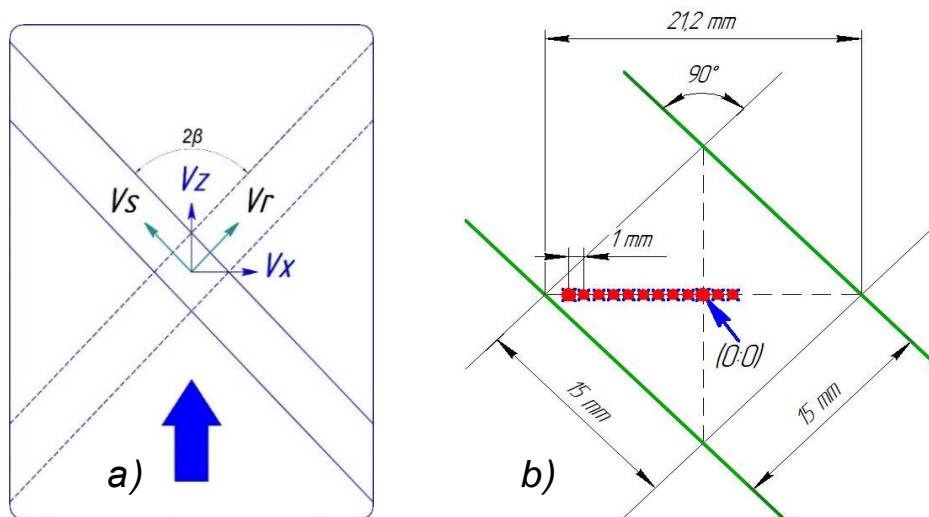


Рисунок 6 – Схема расположения ребер и системы координат (a); точки измерений (b) в вихревой матрице

высоты канала. В центре канала имеется протяженное плато со скоростью, примерно равной среднерасходному значению. В пристенных областях на обеих стенках профили имеют меньшую заполненность по сравнению со стабилизированным течением в плоском канале. Поперечная компонента скорости антисимметрична относительно центра канала, а газовый поток в верхнем и нижнем подканалах движется в противоположных направлениях.

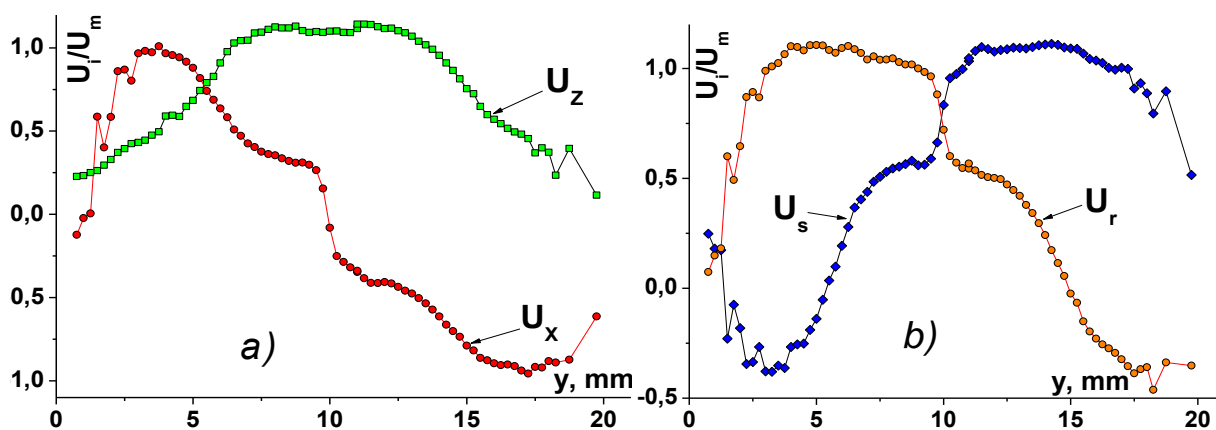


Рисунок 7 – Профили безразмерных скоростей. а) Средняя скорость в координатах Z-X, б) в координатах подканалов r-s, $Re_D = 9.6 \times 10^3$

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

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

Как следует из рисунка 7b, 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.

На рисунке 7 видно, что 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 8.

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

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

Изменение модуля полной скорости и ее направления относительно продольной оси представлено на рисунке 8а и 8б, соответственно.

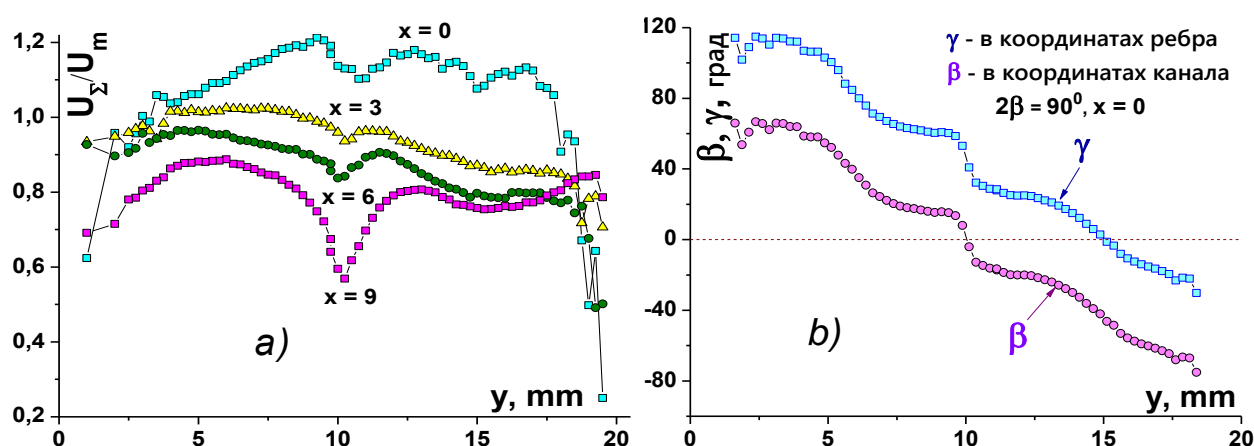


Рисунок 8 – Изменение модуля полной скорости (а) и его направления (б) по высоте канала

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 8а). Профили полной скорости для различных удалений от центра оказались сходными между собой: вблизи стенок канала течение имеет типичный погранслоный 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 8б, непрерывно меняется по высоте канала. Угол наклона β 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 γ , характеризующего угол скоса потока в системе координат r - s , связанной с направлением ребер.

Направление вектора скорости внутри решетчатой ячейки, как это видно на рисунке 8b, непрерывно меняется по высоте канала. Угол наклона β 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 γ , характеризующего угол скоса потока в системе координат r - s , связанной с направлением ребер.

Измерение пульсационных характеристик показало неустойчивый характер течения в окрестности стенок, что является причиной значительной турбулизации близи обеих стенок канала. В этом можно убедиться, обратившись к рисунку 9,

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 имеет высокие значения $u'_x/U_m > 0.4$.

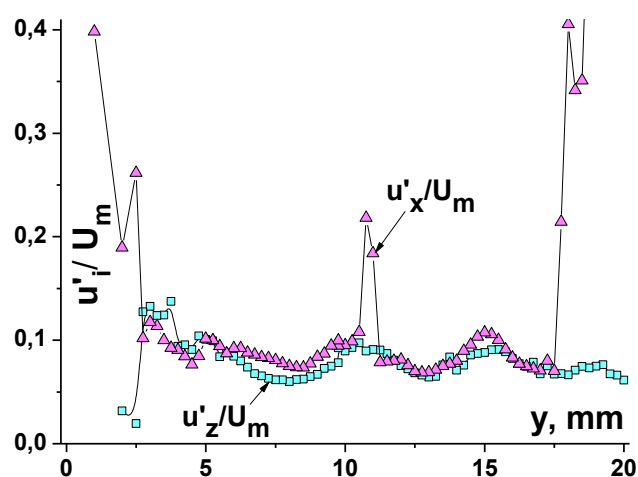


Рисунок 9 – Профили турбулентных пульсаций в ячейке вихревой матрицы

Вероятно, эта особенность поля турбулентности является одной из причин интенсификации теплообмена в решетчатых матрицах. Заметно вырастает интенсивность пульсаций и в центре канала, где происходит смешение потоков из верхнего и нижнего подканалов.

Поведение вертикальной компоненты скорости сильно изменяется в зависимости от местоположения измеряемого профиля. Этот вывод следует из анализа данных рисунка 10а, где показаны профили вертикальной компоненты скорости при различных расстояниях от оси ячейки. Хотя качественно распределения скорости подобны между собой, количественно они значительно отличаются. Причем по мере удаления от оси ячейки величина скорости постепенно возрастает. Из представленных данных следует важный вывод о том, что течение в вихревой матрице имеет ярко выраженный трехмерный характер с с

близкими значениями всех тех компонент скорости. 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 10b, где представлены результаты распределения U_{Σ} в промежутке между стенками вихревой матрицы.

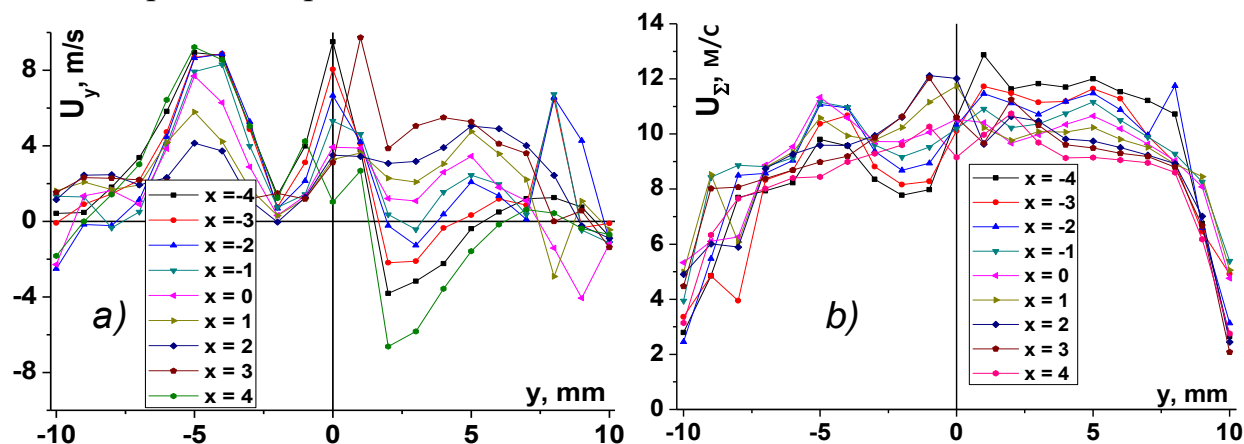


Рисунок 10 – Профили вертикальной компоненты U_y (a) и полной скорости U_{Σ} (b) в ячейке вихревой матрицы на различных удалениях от оси ячейки

Важным параметром для оценки эффективности используемых приемов интенсификации теплообмена является рост гидравлических потерь за счет установки вихрегенераторов. Коэффициент гидравлического сопротивления рассчитывался как

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

где Δp – перепад статического давления между точками отбора.

Все опытные данные по гидравлическим потерям представлены на рисунке 11 в относительном виде, где ξ_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 $\xi/\xi_0 \sim 20$. В то же время, для оценки пригодности матриц в технических приложениях полученные результаты необходимо рассматривать совместно с данными по интенсификации теплообмена в форме параметра ТГЭ, что будет сделано в следующей главе.

В пятой главе представлены результаты исследования теплообмена на поверхности тепловых участков с расположенными внутри решетчатыми матрицами с тремя углами скрещивания $2\beta = 60^\circ, 90^\circ$ и 120° , 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.

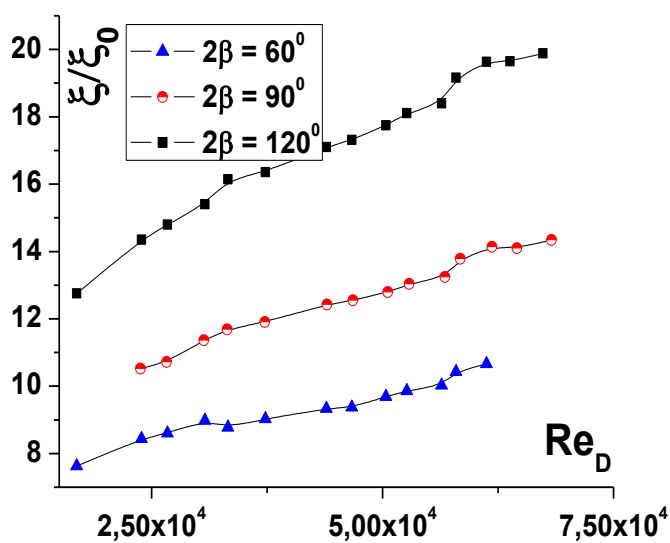


Рисунок 11 – Зависимость относительного коэффициента гидравлического сопротивления вихревых матриц от числа Рейнольдса

Во второй серии ребра, образующие вихревую матрицу, располагались только на одной стенке. Тем самым, предоставлялась возможность сопоставление уровня интенсификации теплообмена от широко используемого 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.

Тепловизионная техника позволяла получать двумерные картины температур в инфракрасном спектре через специальное окно на открытой поверхности теплового элемента, охлаждаемого с помощью вихревых матриц. В ходе проведения экспериментов были получены поля распределения температур на четырех опытных тепловых участках. Примеры получаемых температурных полей представлены на рисунке 12, где наглядно показано, 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 7×10^4 . 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.

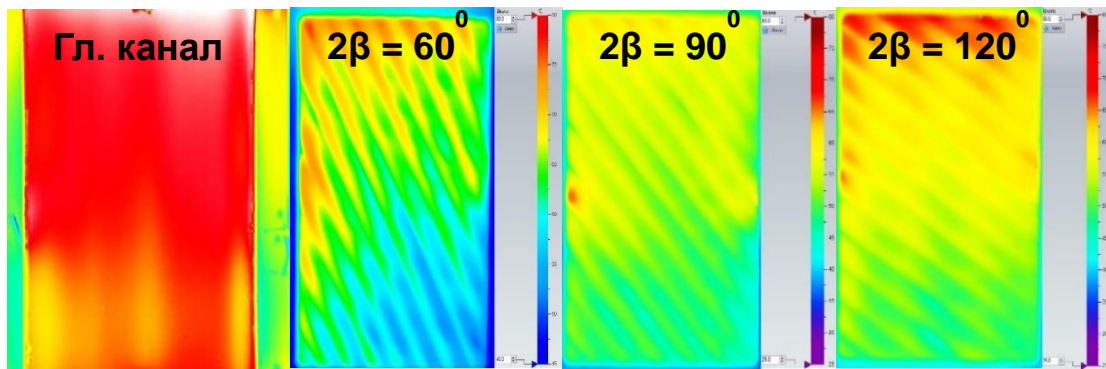


Рисунок 12 – Поля температур на поверхности нагреваемых тепловых участков

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 этом же сечении. Последняя величина определялась из баланса энергии газа в канале при условии постоянства потока тепла на стенке

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

Здесь T_{ex} – температура газа на входе в канал, а Cp , ρ_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.

Результаты измерений интенсивности теплообмена на поверхности с решетчатыми матрицами с различными углами наклона ребер демонстрируются на рисунке 13. Графики представляют собой распределение числа Nu вдоль продольной оси матрицы. Видно, что распределение числа Nu имеет периодический характер, и с повышением числа Рейнольдса разница между максимальным и минимальным значением Nu увеличивается, и она может быть двукратной и более.

Особенно ярко это наблюдается 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. 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 2β , равному 120° , обеспечивает более эффективный теплообмен при всех числах Рейнольдса, но только на начальном участке – по мере удаления от начала канала эффективность теплосъема значительно падает. В то же время матрицы с 2β равному 60° и 90° имеют более равномерное распределение числа Nu по всей длине исследуемой области, однако 90° более эффективны во всем диапазоне чисел Re .

Интегральные значения числа Нуссельта для исследуемых матриц представлены на рисунке 14, где приведены три группы данных, среди

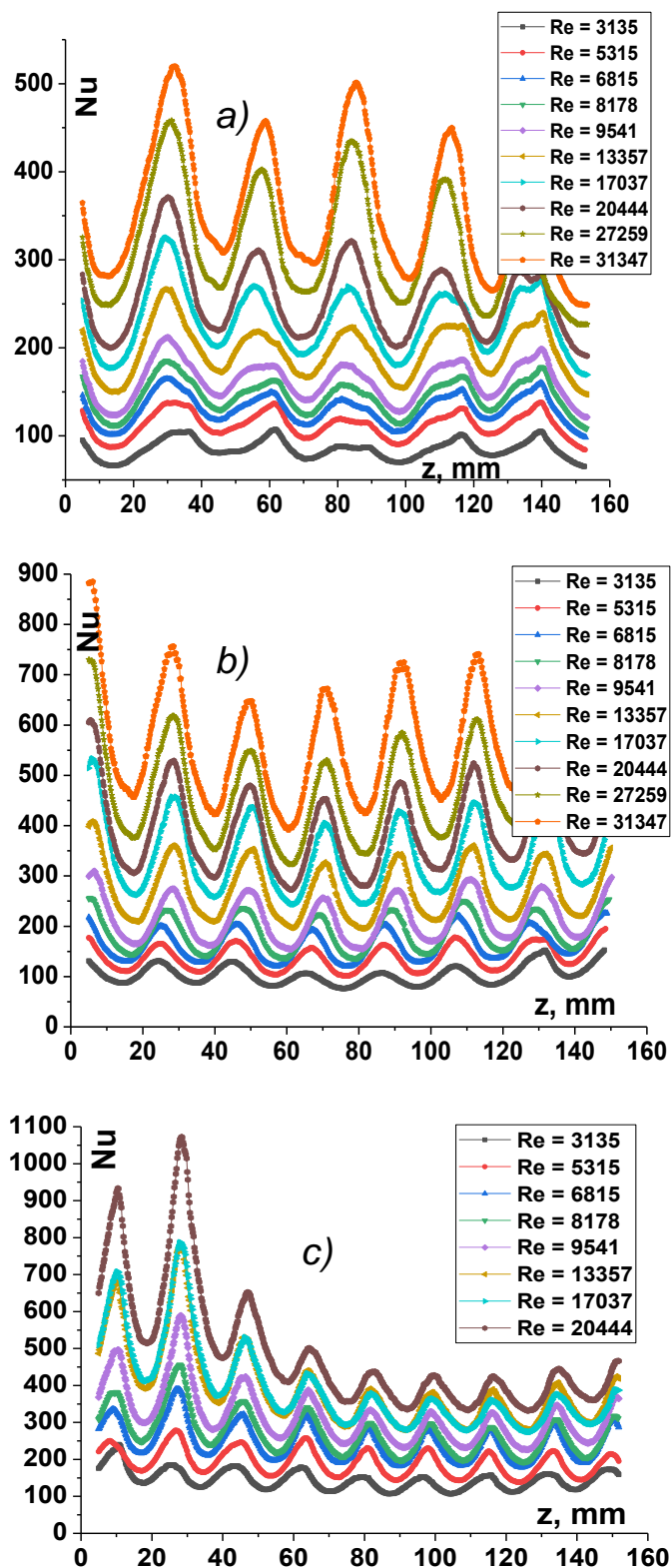


Рисунок 13 – Распределение локального числа Нуссельта при различных числах Рейнольдса вдоль теплового участка с 2β равному: а) 60° , б) 90° , в) 120°

которых находятся результаты измерений в гладком канале, при наличии оребрения одной из стенок и, собственно, вихревых матриц. В случае оребрения одной стенки теплообмен изучался на обеих стенках. Здесь же для сравнения представлены данные, имеющиеся в литературе. Данные, полученные в гладком канале, хорошо совпадают с формулой Михеева для теплообмена на развитом участке в трубе. Несколько более интенсивный теплообмен наблюдается на противоположной гладкой стенке оребренных каналов. При этом влияние угла наклона ребер практически не сказывается на значении интегрального числа Nu . Эффективность теплообмена примерно в 2.5 раза выше на стенке, где расположены ребра. Увеличение угла скрещивания ребер вихревой матрицы приводит к росту теплоотдачи. Эффект интенсификации теплообмена достаточно высок и для угла $2\beta = 120^\circ$ он достигает ~ 7 раз. Для угла $2\beta = 90^\circ$ теплообмен выше в ~ 5 раз, а для $2\beta = 60^\circ$ может доходить до 3.7 раза. Из этого следует, что для условий данной работы, вихревая матрица с $2\beta = 120^\circ$ дает наиболее высокий эффект интенсификации теплоотдачи. Причем такой уровень интенсификации имеет место во всем исследованном диапазоне чисел Рейнольдса.

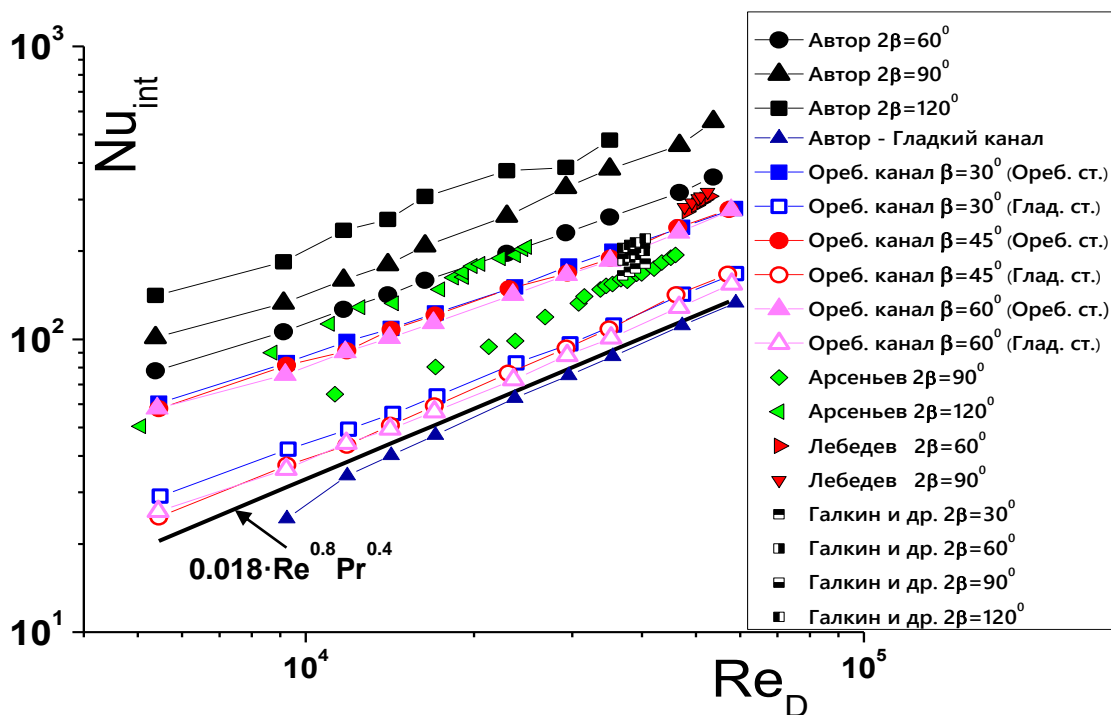


Рисунок 14 – Зависимость интегрального числа Нуссельта от числа Рейнольдса

Как видно из сопоставлений на рисунке 14, подобную тенденцию имеют и данные других исследователей. Однако результаты настоящей работы дают более сильную интенсификацию теплоотдачи, что, вероятно, связано с особенностями геометрических параметров вихревых матриц.

Параметр ТГЭ, 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 ТГЭ от числа Рейнольдса для вихревых матриц с тремя углами пересечения 2β (60° , 90° и 120°) представлены на рисунке 15. Отмечается, что все из представленных вихревых матриц имеют параметр $\eta > 1$, что говорит об их высокой эффективности.

Особенно сильно здесь выделяется матрица с углом $2\beta = 120^\circ$, у которой в области низких чисел Рейнольдса, значение коэффициента η достигает ~ 2.7 , в то время как у матриц с углом 2β равным 60° и 90° этот показатель значительно ниже. Этот результат говорит о том, что данные теплообменные устройства обладают чрезвычайно высокими характеристиками, что являясь основанием их успешного использования в различных энерготехнологиях.

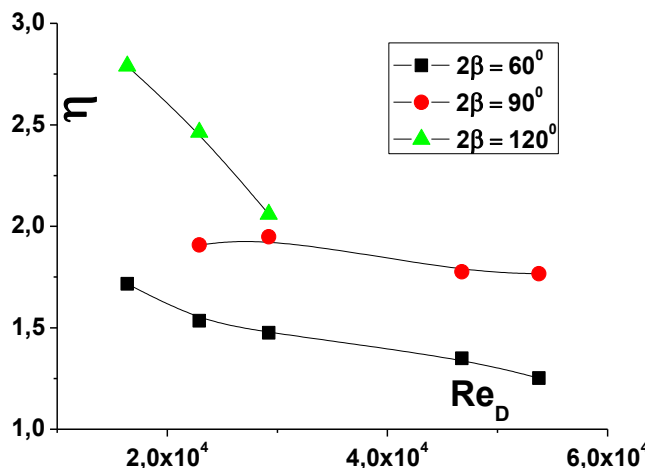


Рисунок 15 – Коэффициент ТГЭ вихревых матриц при вариации числа Рейнольдса

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы:

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. Скорость скольжения потока достигает $\sim 30\%$ от скорости в ядре потока. Наличие сот приводит увеличению турбулентных пульсаций и росту коэффициента сопротивления до 4.5 раз.

3. Впервые лазер-доплеровским анемометром экспериментально 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, также, как и турбулентные пульсации.

4. Получены результаты тепловизионных измерений на поверхности тепловых участков с компланарными каналами. Определены области повышенного теплообмена, а также степень интенсификации теплопереноса в зависимости от угла наклона ребер и числа Рейнольдса. Рост теплоотдачи выше в 4-7 раз по сравнению с гладким каналом.

5. Параметр теплогидравлической эффективности η 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.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, входящих в перечень российских рецензируемых научных журналов (перечень ВАК):

1. **Золотухин, А.В.** Структура пограничного слоя при обтекании сотовой поверхности в плоском канале / В.И. Терехов, Я.И. Смульский, К.А. Шаров, А.В. Золотухин // Теплофизика и аэромеханика – 2014. – Т. 21 (6). – С. 719–724.
2. **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.

Статьи в журналах и материалах конференций, входящих в международные базы Scopus и/или Web of Science

1. **Zolotukhin, A.V.** 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 // J. Phys.: Conf. Ser.– 2018. – Vol. 980 (1). – P. 012027.
2. **Zolotukhin, A.V.** Experimental study of a turbulent structure in coplanar channels / V. I. Terekhov, A. V. Zolotukhin, I. A. Chohar // J. Physics: Conf. Series. – 2020. – Vol. 1677 (1). – 012029.
3. **Zolotukhin, A.V.** Experimental study of a flow structure in coplanar channels / V.I. Terekhov, A. V. Zolotukhin, I. A. Chohar // J. Physics: Conf. Ser.– 2020. – 1683 (3). – 022088.
4. **Zolotukhin, A.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 // J. Physics: Conf. Ser. – 2021. – Vol. 2127 (1). – P. 012006.
5. **Zolotukhin, A.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 // J. Physics: Conf. Series. – 2021. – Vol. 2057 (1). – P. 012027.

Подписано к печати 29 декабря 2022 г. Заказ № 60, Формат 60×84/16.
Объем 1,39 усл. печ. л., Тираж 100 экз.

Отпечатано в Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН 630090,
Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1