

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»
Институт прикладной математики и механики

На правах рукописи

Сероштанов Владимир Викторович

**ИССЛЕДОВАНИЕ КОНВЕКТИВНОГО
ТЕПЛООБМЕНА НА ИЗОТЕРМИЧЕСКИХ
ПОВЕРХНОСТЯХ ТЕПЛООБМЕНА**

Направление подготовки: 03.06.01 Физика и астрономия

Код и наименование

Направленность: 03.06.01_09 «Теплофизика и теоретическая теплотехника»

Код и наименование

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Автор работы: Сероштанов В. В.

Научный руководитель: д.т.н., доц., Митяков А. В.

Санкт-Петербург — 2021

Научно-квалификационная работа выполнена в Высшей школе атомной и тепловой энергетики Института энергетики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Директор Высшей школы

атомной и тепловой энергетики: Калютик Александр Антонович
к.т.н., доцент

Научный руководитель:

Митяков Андрей Владимирович
д.т.н., доц.

Рецензент:

Попов Павел Аркадьевич,
к.т.н., старший научный сотрудник,
Лаборатория Физической газодинамики ФТИ им.
А. Ф. Иоффе,

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте <http://elib.spbstu.ru>

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертационного исследования

Цилиндр – весьма распространённая модель в исследованиях течения и теплообмена, поскольку трубы весьма часто составляют поверхность теплообмена в теплообменниках различного типа и назначения.

Существует обширная база данных, связанных с течением и теплообменом на поверхности цилиндра, обтекаемого потоком жидкости в различных гидродинамических режимах. Исследованы течение и теплообмен вблизи цилиндров различного профиля. Изучены особенности обтекания и теплообмена на поверхностях рядов или пучка труб.

Цилиндрическая поверхность позволяет применять в эксперименте практически все методы визуализации с помощью технологий PIV (Particle Image Velocimetry), SIV (Steam Image Velocimetry), LDA (Laser Doppler Anemometry). На ней удобно выполнять измерения температуры, давления и скорости. При численном моделировании течения и теплообмена вблизи цилиндров удобно создавать расчетную сетку, повышать ее качество, снижать требуемые вычислительные мощности, и визуализировать результаты моделирования.

До последнего времени средние и местные плотности теплового потока, рассматривались как функции параметров, осредненных по поверхности и полученных в стационарном режиме. С развитием и распространением вычислительной и измерительной техники внимание исследователей привлекли нестационарные параметры течения и теплообмена: скорости, давления, плотности теплового потока, температуры и КТО.

Таким образом, тенденции, наметившиеся как в технике, так и в исследовательской практике, подводят к попытке исследовать нестационарный конвективный теплообмен на цилиндрической поверхности с помощью градиентной теплотометрии.

Степень разработанности научной проблемы.

Количество работ, посвященных теплообмену при обтекании труб, весьма велико, а полученные в них результаты успешно используются в инженерной практике. Достаточно упомянуть исследования М. В. Кирпичева, А. А. Жукаускаса, Э. Ахенбаха, Э. Спэрроу, Я. Морено, Х. Накамуру и многих других.

Прямое измерение нестационарного теплового потока и расчет коэффициентов теплоотдачи (КТО) стали возможны и использованием градиентных

датчиков теплового потока (ГДТП) как основы градиентной теплотметрии, методика и элементная база, которой активно развивается в Санкт-Петербургском политехническом университет Петра Великого с 1996 г. Однако и это перспективное направление до последнего времени не давало глубокого представления о пульсационных характеристиках теплообмена.

Для выявления связи с течением успешно используется PIV, апробированная на широком круге задач гидродинамике.

Сочетание этих методов проводится, прежде всего, для верификации численного моделирования и углубленного представления о связи нестационарных процессов течения и теплообмена.

Цель и задачи диссертационного исследования.

Целью диссертации является применение методики, объединяющей градиентную теплотметрию и PIV, для исследования усредненных и пульсационных параметров течения и теплообмена на поверхности цилиндров, установленных в ряд.

Достижение поставленной цели требует решения следующих :

1. верификация численного моделирования течения и теплообмена на поверхности одиночного цилиндра и цилиндров, расположенных в ряд;
2. оценка пульсационных характеристик течения и теплообмена с учетом длины рециркуляционного пузыря, характеру вихреобразования и других факторов, роль и значение которых устанавливает PIV;
3. исследование течения и теплообмена при поперечном и косом обтекании одиночного цилиндра с выявлением и обоснованием пульсационных характеристик;
4. исследование системы их двух и трех цилиндров, установленных с различным шагом, при различных режимах течения;
5. исследование течения и теплообмена при установке строжней-турбулизаторов в системе трех расположенных в ряд цилиндров.

Предмет исследования.

Объект исследования. Теплообмен на поверхности цилиндров.

Градиентная теплотметрия как метод прямого измерения плотности теплового потока на поверхности цилиндров.

Теоретическая и методологическая основа исследования. В проведённых исследованиях применялся экспериментальный метод. Методологической базой диссертационного исследования являются работы А. А. Жукаускаса, С. З. Сапожникова, В. Ю. Митякова, А. В. Митякова, Р. З. Кавтарадзе, В. Нусельта и др.

В диссертации реализована принципиально новая технология, основанная на прямом измерении местной плотности теплового потока с помощью уникальных первичных преобразователей – ГГДТП. Метод исследования предусматривает одновременное в нескольких точках измерение местной плотности теплового потока и температуры поверхности теплообмена. Это даёт возможность рассчитать местные КТО и выявить распределение КТО по поверхности огневой плиты.

Информационную базу исследования составили монографии, статьи, научные доклады отечественных и зарубежных авторов; материалы научных конференций и семинаров по исследованию теплообмена ... ; результаты собственных расчётов и проведённых соискателем экспериментов.

Обоснованность и достоверность результатов исследования обеспечивается :

- использованием PIV для визуализации поле скорости, термометрии и градиентной теплотметрии как технологий, получивших признание специалистов и успешно применяемых в экспериментах различного уровня и содержания;
- применением современных и аттестованных средств преобразования, обработки и архивирования данных;
- оценкой неопределённостей, с которыми экспериментально определены и рассчитаны основные величины, в соответствии с действующими стандартами;
- удовлетворительным согласованием результатов, полученных в тестовых экспериментах, с апробированными работами отечественных и зарубежных исследователей.

Результаты находятся в соответствии с результатами, полученными другими авторами.

Соответствие диссертации пунктам Паспорта научной специальности. Диссертационное исследование соответствует специальности 01.04.14 –

Теплофизика и теоретическая теплотехника по следующим пунктам, указанным в Паспорте научной специальности:

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

Научная новизна:

- впервые получены и исследованы пульсационные параметры течения и теплообмена при поперечном и косом обтекании нагретого цилиндра, а также двух и трех цилиндров, расположенных в ряд;
- впервые установлены и обоснованы связи параметров теплообмена с характеристиками течения в следе при различных геометрических и режимных характеристиках эксперимента;
- получены уравнения подобия для теплообмена на поверхности второго и третьего цилиндра при их различном удалении один от другого и для различных режимов течения;
- показаны особенности нестационарного теплообмена, связанные с действием стержней-турбулизаторов, на первом и третьем цилиндрах, при их рядном расположении.

Личный вклад. Автор принимал активное участие ... Наиболее существенные результаты исследования, обладающие научной новизной и полученные лично соискателем. Соискатель лично участвовал в разработке экспериментального стенда, изготовлении экспериментальных моделей, отладке и проведении экспериментов. Выполнил анализ и обобщил экспериментальные данные, полученные при исследовании различных скоростных режимов двигателя и составах смеси; показал возможность мониторинга двигателя внутреннего сгорания по тепловому потоку.

Основные положения, выносимые на защиту:

- методика, сочетающая градиентную теплометрию и PIV, как средство исследования течения и теплообмена на поверхности системы обтекаемых цилиндров, расположенных в ряд;
- экспериментальный стенд и аппаратура для исследования течения и теплообмена;

- новые результаты, полученные при обтекании одиночных цилиндров, цилиндров расположенных в ряд и цилиндров со стержнями-турбулизаторами;
- результаты, полученные при поперечном и косом обтекании цилиндров в различных геометрических и режимах;
- уравнения подобия для расчета числа Нуссельта при обтекании второго и третьего цилиндра при различных геометрических и режимных параметрах;
- результаты интенсификации теплообмена с использованием стержней-турбулизаторов на поверхности цилиндров.

Научная и практическая значимость . . .

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на: перечисление основных конференций, симпозиумов и т. п.

1. Международной научной конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетики» (Москва, 2017);
2. 16-й международной конференции по теплообмену «International Heat Transfer Conference» (Пекин, 2018);
3. VII Российской национальной конференции по теплообмену (Москва, 2018);
4. Международной научной конференции по энергетике, экологии и строительству ЕЕСЕ-2019 (Санкт-Петербург, 2019);
5. XXII школе-семинаре молодых ученых и специалистов академика РАН А. И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках» (Москва, 2019);
6. Всероссийской научной конференция с международным участием «XI Семинар ВУЗов по теплофизике и энергетике» (Санкт-Петербург, 2019)
7. XXIII школе-семинаре молодых ученых и специалистов академика РАН А. И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках» (Екатеринбург, 2021);

Публикации. Результаты работ представлены в 14 публикациях, включая 1 статью в журнале перечня ВАК (по специальности) и 13 статьи в журналах, входящих в международную базу данных Scopus.

Основные положения и результаты исследования

Во **введении** обоснована актуальность исследований и применяемые экспериментальные методики проводимых в рамках диссертационной работы; Формулируется цель; ставятся задачи работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость работы; приводится перечень положений, выносимых на защиту, факторы, определяющие достоверность результатов; глава завершается перечнем семинаров и конференций, где обсуждались результаты работы и списком опубликованных по теме диссертации работ

Первая глава посвящена описанию актуальности задачи, приведен анализ работ, посвященных исследованию течения и теплообмена при обтекании цилиндра (как одиночного, так и нескольких). Особое внимание уделено методикам, используемым в экспериментальных исследованиях, отмечены их преимущества и недостатки. Показано наличие большого количества современных работ, где пульсационный характер течения и теплообмена изучают посредством численного моделирования; описаны наиболее часто используемые методы моделирования, приведены примеры результатов, полученных тем или иным способом. Описаны намеченные тенденции в изучении нестационарных процессов при обтекании цилиндров.

Отдельный подраздел посвящен интенсификации теплообмена: перечислены наиболее часто используемые на практике способы интенсификации, в частности, использование дисперсной шероховатости. На примере работ Э. Ахенбаха, А. Жукаускаса, Т. Бэтема, С. А. Исаева и др., показано, что уровень интенсификации зависит, прежде всего, от формы поверхности теплообмена, режима течения и формы и конфигурации шероховатостей.

Глава завершается описанием опытов по исследованию конвективного теплообмена методами градиентной теплометрии. Подробно представлены результаты опытов по исследованию вынужденно-конвективного теплообмена научно-исследовательской группы НОЦ "Теплофизика в энергетике" СПбПУ, полученные за последнюю декаду 2011 г. На рисунке 1 в качестве примера, показаны результаты экспериментов по интенсификации теплообмена на поверхности цилиндра с использованием градиентной теплометрии. В качестве интенсификаторов использованы тонкие стержни-турбулизаторы, уставленные на поверхности цилиндра вдоль образующей симметрично относительно лобовой образующей.

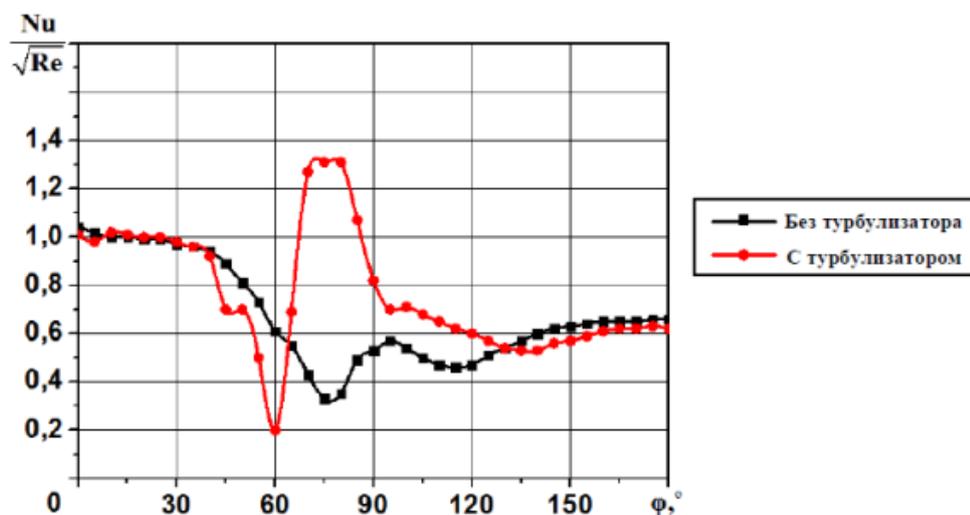


Рисунок 1 — Значения местных КТО для гладкого цилиндра и цилиндра с турбулизатором для $Re = 5,3 \cdot 10^4$

Данные теплотметрии дополнялись визуализацией течения; пример полученных полей скорости вблизи гладкого цилиндра и цилиндра с турбулизаторами показан на рисунке 2.

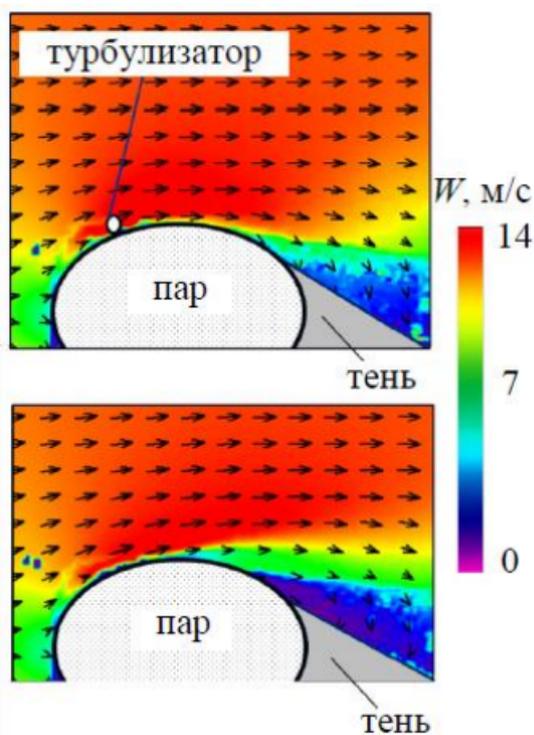


Рисунок 2 — Визуализация обтекания гладкого нагретого цилиндра со стержнями-турбулизаторами и гладкого цилиндра

Все результаты исследований с применением градиентной теплотметрии апеллируют к осреднённым по времени величинам. Однако характеристики

ГДТП, а именно их размеры и быстродействие (составляет 1...10 нс) теоретически позволяют измерять плотность теплового потока и выявлять не только среднюю, но и пульсационную составляющую плотности теплового потока. Опираясь на опыт применения ГДТП и постоянно повышающийся уровень и возможности измерительной аппаратуры становится возможным рассматривать течение и теплообмен в нестационарной постановке.

Глава завершается постановкой задачи и описанием объема экспериментов.

Вторая глава посвящена методике и технике эксперимента, а также оценке метрологического уровня градиентной теплотометрии и PIV.

Комплексное исследование течения и теплообмен при обтекании цилиндров – одного или нескольких – использует следующие экспериментальные методы.

1. Трассерную визуализацию потока (PIV), которая позволяет построить мгновенные и усредненные поля скорости, а также получить значения скорости W и её проекции на оси OX и OY (u и v , соответственно).
2. Градиентную теплотометрию, которая позволяет определить местную плотность теплового потока: как мгновенную (q'_{φ}), так и усредненную по времени (q_{φ}) на поверхности модели.
3. Термометрию на поверхности модели и в невозмущенном потоке воздуха, позволяющую рассчитать местные и средние КТО.

Все местные значения величин определялись вблизи образующих цилиндра, отнесённых на азимутальный угол φ , отсчитываемый от лобовой образующей. В качестве независимой безразмерной переменной заявлялось число Рейнольдса $Re = \frac{wd}{\nu}$, где w – скорость воздушного потока, м/с, а ν – кинематическая вязкость воздуха, м²/с, задаваемая при его температуре T_f .

Далее описаны используемые в работе экспериментальные модели, представляющие собой полые цилиндры, обогреваемые насыщенным водяным паром при атмосферном давлении. Избыточное давление пара измерялось U-образным водяным манометром, в наших опытах оно не превышало 20...25 мм. Температура насыщения определялась по абсолютному давлению; во всех опытах она была близка к 100°. Для теплотометрии использовались цилиндры с наружным диаметром 66 мм, выполненные из стального листа толщиной 0,1 мм; для PIV – цилиндры диаметром 20 мм из дюралюминиевой трубки с толщиной стен-

ки 0,5 мм. Длина всех цилиндров – 600 мм – превышает диаметр выходного конфузора аэродинамической трубы, что позволяло полностью занять рабочую зону экспериментального стенда. В работе исследованы следующие конфигурации модели:

1. Одиночный цилиндр.
2. Пара цилиндров, установленных один за другим.
3. Три цилиндра, установленных один за другим.

Опыты проводились в дозвуковой аэродинамической трубе закрытого типа, созданной и успешно используемой в научно-образовательном центре «Теплофизика в энергетике» СПбПУ. Труба обеспечивает скорость воздушного потока в диапазоне от 0,1...60 м/с развиваемую центробежным вентилятором. Конфузор (с поджатием 1:7) обеспечивает степень турбулентности на входе в рабочую зону $Tu \leq 0,5\%$ во всем диапазоне скоростей. На рисунке 3 представлена фотография рабочей зоны трубы, с установленной моделью.

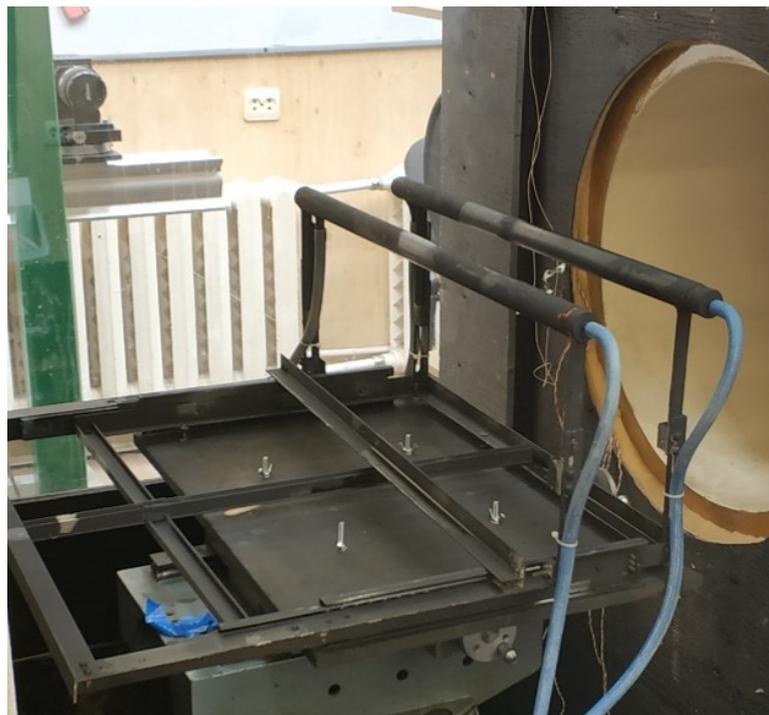


Рисунок 3 – Рабочая зона аэродинамической трубы в камере Эйфеля с установленной моделью

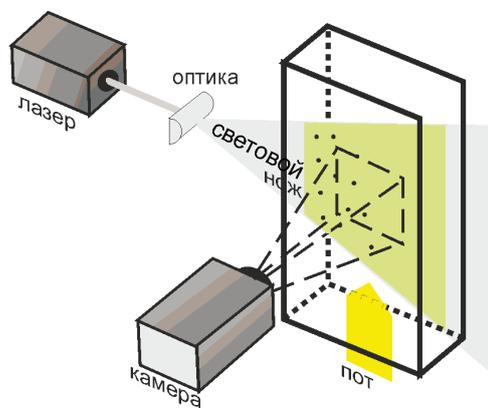
Аэродинамическая труба имеет ряд особенностей:

1. В отличие от большинства труб Геттингенского типа, поток воздуха обеспечивает не осевой, а центробежный вентилятор.
2. За вентилятором в нагнетательном участке установлен охладитель, подключенный к системе холодного водоснабжения, что позволяет прово-

длительные эксперименты с применением обогреваемых моделей при практически постоянной ($\pm 0,1^\circ\text{C}$) температуре набегающего воздушного потока.

3. Рабочая зона трубы оснащена камерой Эйфеля из органического стекла, что позволяет использовать PIV без заметного рассеяния трассеров.

В наших опытах использована PIV установка компании полис «ПОЛИС», разработанная и изготовленная в Институте теплофизики СО РАН (г. Новосибирск). Она включает двойной импульсный лазер Quantel BSL, кросс-корреляционную камеру, устройство синхронизации, дымогенератор и программное обеспечение для обработки изображений (рисунок 4).



Особенности:

- бесконтактный метод измерения;
- различные среды;
- измерение мгновенных полей скорости;
- широкий диапазон измеряемых скоростей.

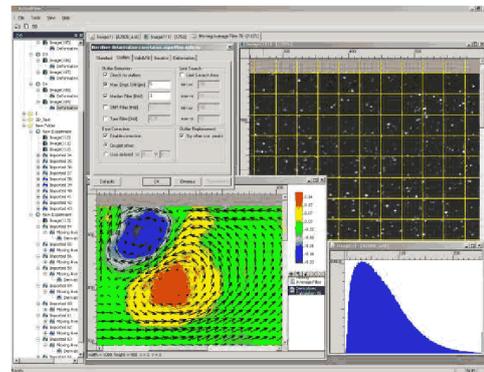
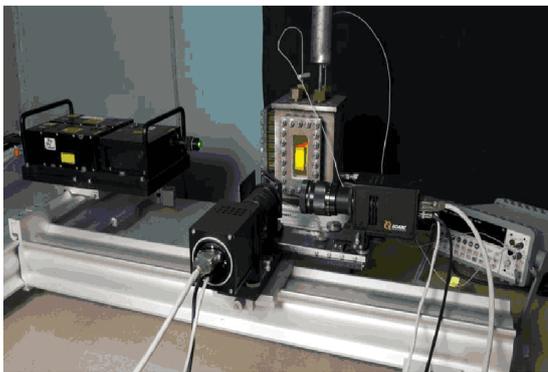


Рисунок 4 — PIV система ПОЛИС (рекламный проспект)

Длина волны лазера 532 нм, энергия импульса отсрочена для задачи и составила 2×220 МДж, время импульса 7 нс. Кросс-корреляционная камера имеет разрешение 2048×2048 (4 Мп). Временное разрешение достигает 10 мкс, что позволило изучить весь диапазон чисел Рейнольдса, используемых в исследовании.

PIV позволил получить мгновенные и осреднённые по времени поля скорости, а также графики составляющих скорости в следе за моделью. Все опыты проводились при фиксированной скорости (и числе Рейнольдса), причем

в сочетании с теплотометрией такой подход позволил обоснованно связать поля скорости и теплового потока (или КТО).

Для измерения плотности теплового потока в работе использовались батарейные ГДТП на основе анизотропных термоэлементов из висмута чистоты 0,9999. Выбор таких ГДТП обусловлен тем, что:

- рабочая температура поверхности близка к 100°C;
- рабочая среда не агрессивная;
- вольт-ваттная чувствительность ГДТП из висмута достаточно высока и практически постоянна для указанной температуры;
- бифилярная укладка полосок висмута в ГДТП сводит к минимуму вклад помех от работающего РIV лазера и других возможных наводок;
- сопротивление ГДТП из висмута не превышает 1...2 Ом, что облегчает преобразование и архивирование сигналов.

Сигналы ГДТП регистрировались и архивировались с помощью аналого-цифрового преобразователя АЦП NI 9216 фирмы National Instruments. Платформа CompactDAQ совместима со средой LabVIEW, что позволяет обрабатывать и визуализировать данными измерений.

В различных опытах блок-схема стенда отличалась только исследуемой моделью, то есть количеством цилиндров. В результате исследований удалось получить:

- временную теплограмму, построенную по показаниям ГДТП;
- распределение плотности теплового потока по поверхности цилиндров;
- распределение местного КТО по поверхности цилиндров.

По полученным данным удавалось определить интенсивность пульсаций и дисперсию плотности теплового потока. Это позволило оценить не только осреднённые по времени, но и мгновенные значения параметров.

Расчет неопределенности проводился согласно ГОСТу 34100.1-2017/ISO/IEC Guide 98-1:2009 «Неопределённость измерения». Относительная неопределённость измерения плотности теплового потока составила:

$$\Delta U_{\Sigma_{\text{расшир}}} = \frac{U_{\Sigma_{\text{расшир}}}}{q} = \frac{67,1}{5827} \cdot 100\% = 1,15\%, \quad (1)$$

а относительная неопределённость КТО

$$\Delta U_{\Sigma_{\text{расшир}}} = \frac{U_{\Sigma_{\text{расшир}}}}{\alpha} = \frac{3,424}{144,5} \cdot 100\% = 2,37\%. \quad (2)$$

Расчет неопределенности измерений, выполненных с использованием комплексной методики показал, что в ходе измерений достижим следующий метр логический уровень:

- неопределенность измерений плотности теплового потока–1,24%;
- неопределенность измерений КТО–2,5%;
- неопределенность измерений скорости–8,4%.

В целом, результаты, полученные с помощью предлагаемых методик, можно считать удовлетворительными.

Третья глава посвящена исследованию сравнению результатов, полученных в данной работе с данными литературы. Сравнения ведут по различным параметрам, которые, в свою очередь выбирают исходя из цели исследования. Целевыми функциями выступили профили скорости W и/или ее проекции на оси x и y в следе за цилиндром (обычно их обозначают u и v , соответственно), длина зоны рециркуляции L , распределение пульсационных составляющих скорости u' и v' в следе за цилиндром. Для сравнения наших результатов с наиболее детально изученным режимом обтекания одиночного кругового цилиндра ($Re=3900$) проведена специальная серия опытов для одиночного кругового нагретого цилиндра.

На рисунке 5 представлены линии тока при обтекании одиночного круглого цилиндра для числа Рейнольдса $Re = 3900$ по нашим данным, полученным с помощью PIV и из работ . Картины обтекания на рисунках 5 а, б и г получены для неизотермического обтекания. Линии тока из работ получены с помощью численного моделирования

Другим параметром для сравнения является длина области рециркуляции. Длину так называемого рециркуляционного пузыря (L) определяют как расстояние от кормовой образующей (или точки, при двумерной постановке задачи) до точки на оси x , где продольная составляющая скорости u меняет знак с отрицательного на положительный.

На рисунке 6 совмещены результаты наших PIV-исследований, а также некоторые экспериментальные данные и данные численного моделирования для

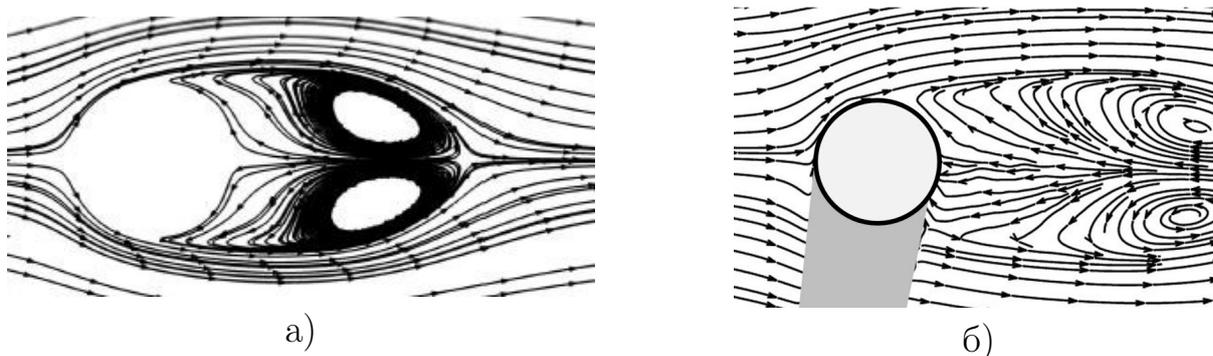
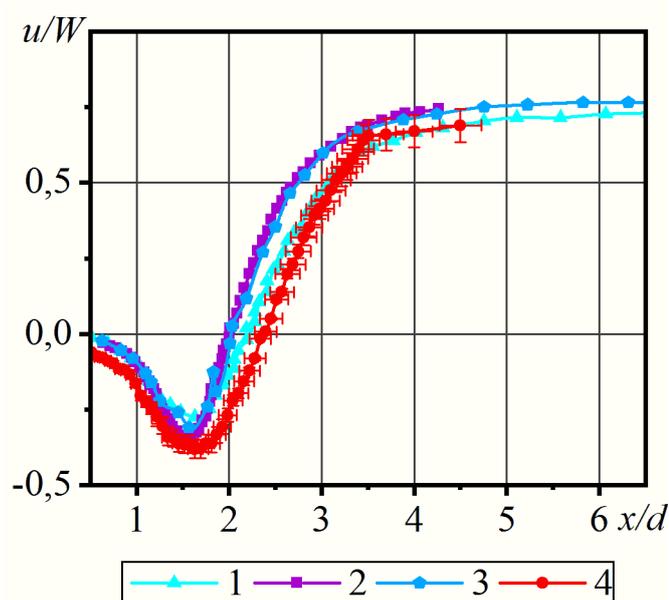


Рисунок 5 — Линии тока вблизи кругового цилиндра:
 (а) — Jogee и др.; (б) — наши данные (серым отмечена нерасчетная область)



1 — результаты LES-моделирования (Jogee и др.);

2 — результаты SIV (Михеев и др.);

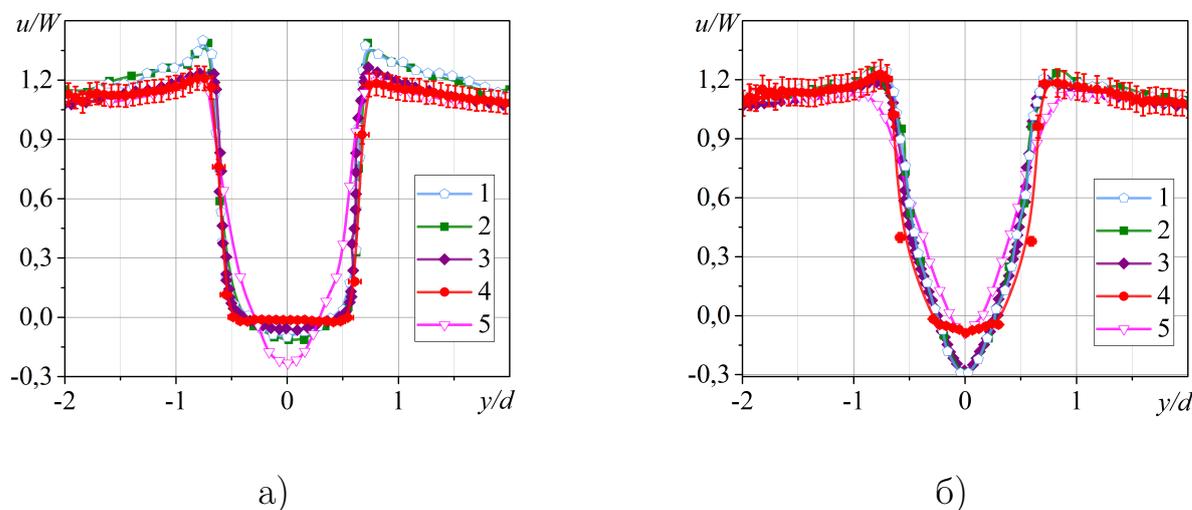
3 — результаты LES-моделирования (Лысенко и др.); 4 — наши данные

Рисунок 6 — Продольная составляющая скорости u в следе за цилиндром

все режима $Re = 3900$. Можно отметить хорошее согласование как с расчетом, так и с экспериментом, особенно на отдалении $(3 \dots 4)d$ от кормовой образующей.

Именно в таком виде мы и будем сравнивать данные нашего эксперимента с результатами других авторов. Считается, что именно эти результаты представляют собой наиболее точные параметры, которые необходимо сравнивать. Нет единого мнения о том, на каком отдалении от кормовой образующей цилиндра необходимо рассматривать распределения скоростей и напряжений Рейнольдса. Поэтому на рисунке 7 представлены профили продольной компоненты скорости

из разных работ, полученных разными способами и на различном отдалении от кормовой образующей цилиндра.



1, 2, 3, 4 соответствуют обозначениям на рисунке 6;
5 – результаты DNS (Wissink и др.); 6 – результаты термоанемометрии (Лысенко и др.)

Рисунок 7 – Профили продольной компоненты скорости u за цилиндром:

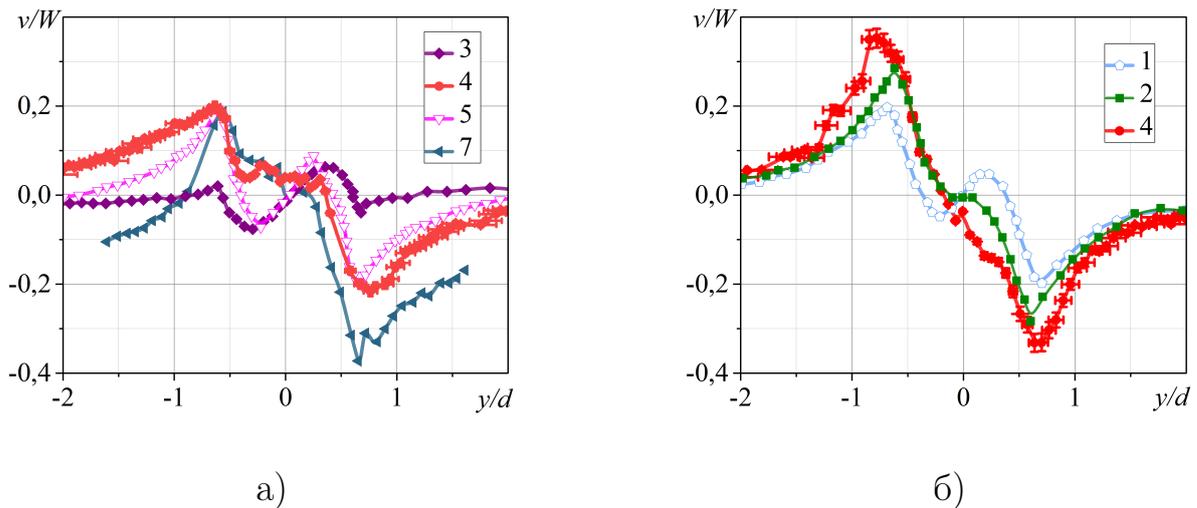
(а) – $x/d = 1,06$; (б) – $x/d = 1,54$

Наши результаты лучше согласуются с экспериментальными работами, а отличия на большом удалении ($4d$) можно объяснить нагревом воздушного потока при обтекании цилиндра: это совпадает с показанными на рисунке 6.

В отличие от профилей продольной скорости u , распределение поперечной составляющей скорости v имеет сходный вид на различном удалении от цилиндра. В пределах $y/d = \pm 1$ наблюдается N-образное изменение поперечной скорости потока (см. рисунок 8). При $y/d = 0$ поперечная составляющая равна нулю на всем протяжении следа.

На расстоянии $x/d = 1,06$ и $x/d = 1,54$ от кормовой образующей цилиндра экстремальные значения скорости удалены от горизонтальной оси, однако для сечения $x/d = 1,54$ их уровень значения почти в 1,5 раза выше, чем для сечения $x/d = 1,06$. Более высокий, в сравнении с другими исследованиями, уровень экстремальных значений можно объяснить наличием теплообмена.

Анализ распределений компонентов скорости u и v на различном удалении от модели показывает, что наши результаты хорошо согласуются как с численными, так и с натурными экспериментами других авторов. Следует отметить, что влияние теплообмена на продольную составляющую скорости выражается



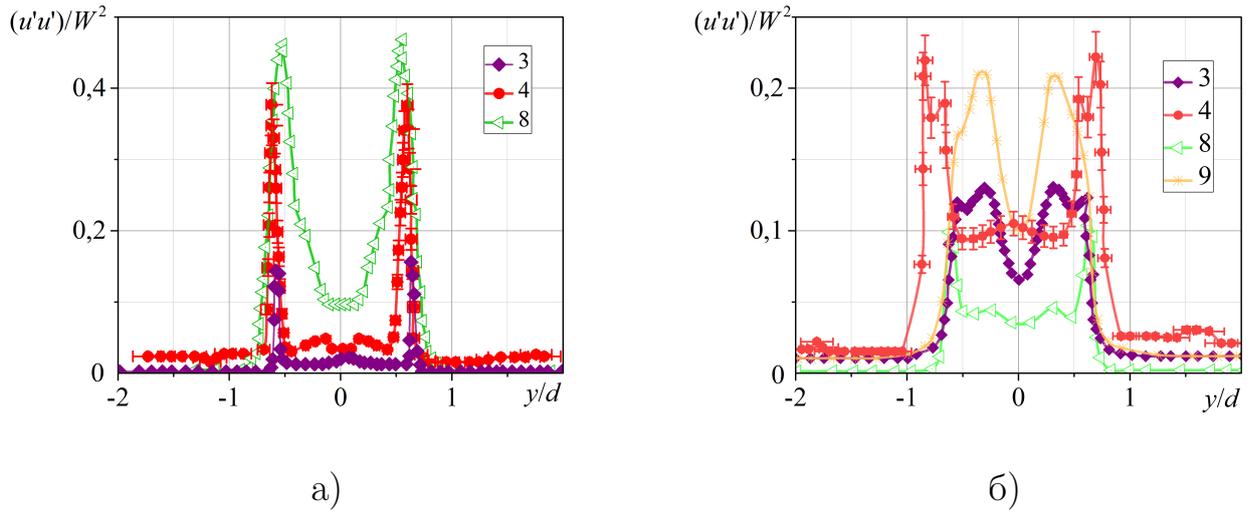
1..5 совпадают с обозначениями на рисунке 7;
7 – данные термоанемометрии (Lougenco и др.)

Рисунок 8 – Профили поперечной компоненты скорости v за цилиндром:
(а) – $x/d = 1,06$; (б) – $x/d = 1,54$

в увеличении длины зоны вихреобразования. Для поперечной составляющей скорости v наши данные, как и данные различных исследований разнятся сильнее: уровни экстремальных значений отличаются почти в два раза. Мы связываем такие различия с наличием теплообмена в наших опытах.

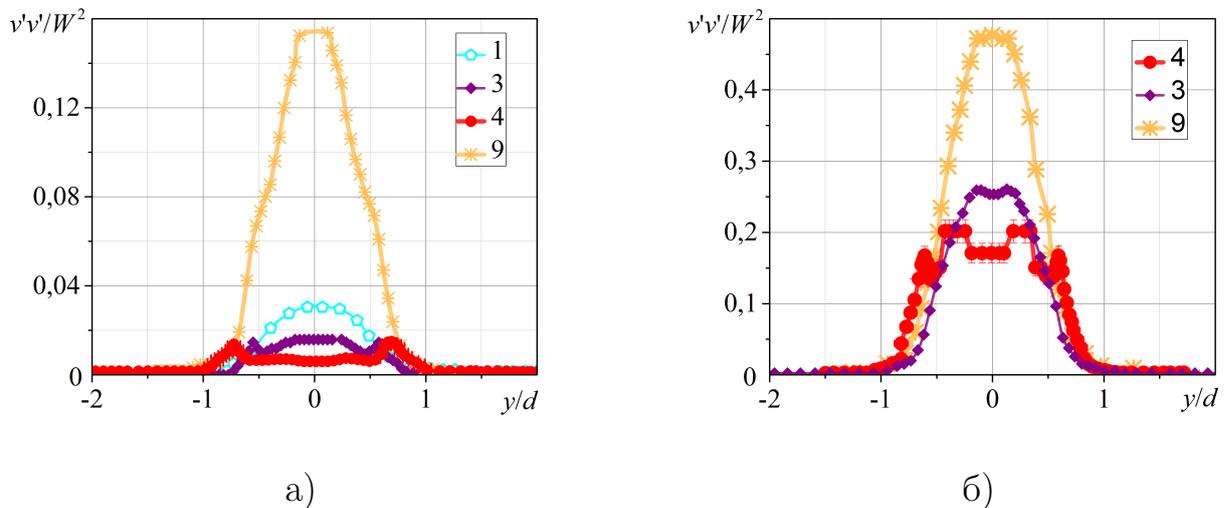
Как сказано выше, более точным параметром для сравнения данных является распределение пульсационных составляющих скоростей u и v в следе за цилиндром. Изменения профиля среднеквадратичных колебаний продольной компоненты скорости $u'u'$ на различном удалении от цилиндра представлены на рисунке 9. В зависимости от параметров численного моделирования результаты разных авторов могут отличаться в два и более раза. Различия наиболее ярко выражены в области рециркуляции и уменьшаются по мере удаления от цилиндра.

Наши измерения скорости несколько отличаются от численных и экспериментальных данных других авторов: экстремальные значения выше, а область изменений шире. Более широкую зону пульсаций компоненты u' можно объяснить нагревом обтекающего потока воздуха, тогда как осредненные во времени значения практически не меняются. Сходные выводы делают и Sourabh Jogee и др., моделирующие обтекание цилиндра при различных температурных напорах.



1...5 совпадают с обозначениями на рисунке 7;
8 – Лоуэнсо и др.; 9 – Кравченко и др.

Рисунок 9 – Профили пульсационной составляющей продольной компоненты скорости $u'u'$ за цилиндром:
(а) – $x/d = 1,06$; (б) – $x/d = 1,54$



1, 3, 4, 9 совпадают с обозначениями на рисунке 9;
10 – данные термоанемометрии из работы Лоуэнсо и др.

Рисунок 10 – Профили пульсационной составляющей поперечной компоненты скорости $v'v'$ за цилиндром:
(а) – $x/d = 1,06$; (б) – $x/d = 1,54$; (в) – $x/d = 2$; (г) – $x/d = 4$

По аналогии с колебаниями компоненты u рассмотрен и профиль пульсаций поперечной составляющей (рисунок 10). В целом, пульсации скорости в

наших работах несколько интенсивнее – за счет наиболее высокой поперечной составляющей.

Для сравнения интенсивности пульсаций в качестве базовой выбрана работа Джоги и др., где помимо среднего числа Нуссельта для разных напоров авторы оценивают и пульсации КТО. Сдвиг точки отрыва ближе к лобовой части для более высокого ΔT объясняется тем, что процесс идет аналогично обтеканию цилиндра при меньшем числе Рейнольдса. Это связано с повышением вязкости среды при повышении температуры».

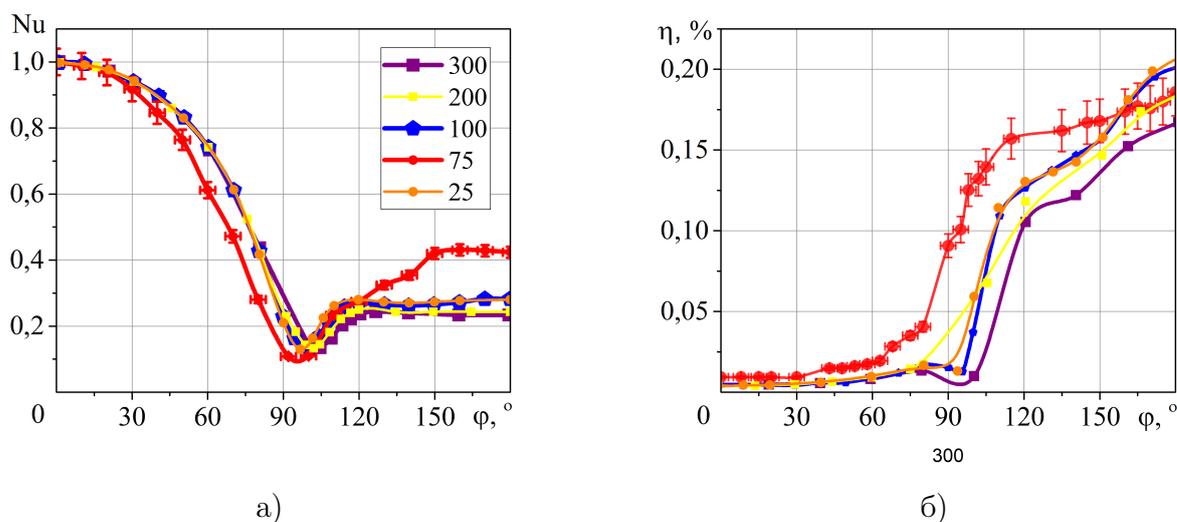


Рисунок 11 — Распределение числа Нуссельта по поверхности цилиндра при различных температурных напорах: (а) – осредненные по времени; (б) – интенсивность пульсаций

Кривые показывают, что вблизи лобовой образующей пульсации КТО минимальны: по результатам численного моделирования можно сказать, что они и вовсе равны нулю. После точки отрыва уровень пульсаций возрастает; в кормовой части цилиндра отклонение мгновенных значений КТО от среднего значения достигает 20...25%.

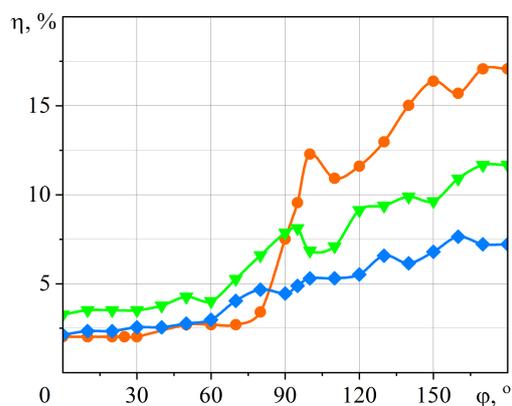
В целом, результаты градиентной теплотметрии хорошо согласуются с данными других исследователей как для осредненных КТО, так и для интенсивности пульсаций местного КТО.

В **четвертой главе** приведено описание исследовательской части работы. Представлены результаты измерений плотности теплового потока и КТО на поверхности одиночного цилиндра и совокупности двух и трех цилиндров.

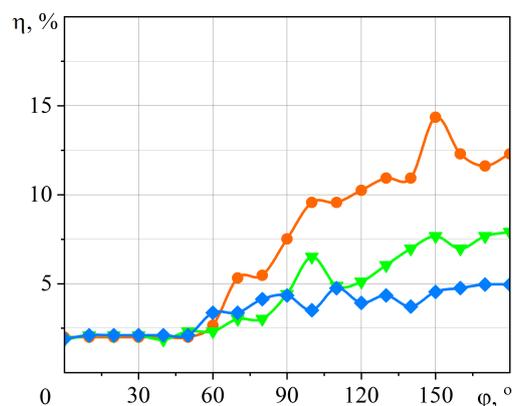
Полученные данные требовалось связать с картиной обтекания моделей. Трбовалось, более того, выполнить опыты в диапазоне числе Рейнольдса.

В первой серии опытов мы рассмотрели зависимости не осредненных по времени КТО, а характер пульсаций для одиночного цилиндра, обтекаемого под углом атаки β . На рисунке 12 представлен уровень пульсаций безразмерного КТО, выраженный в виде интенсивности.

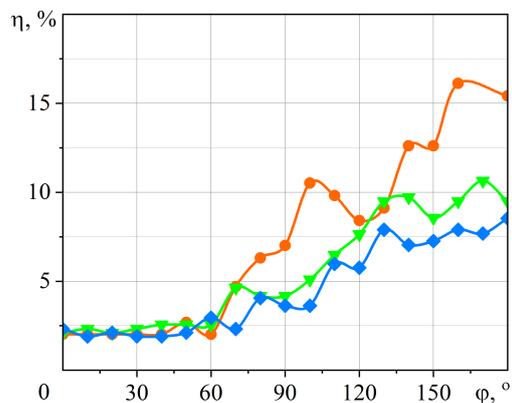
Для выбранного режима течения интенсивность пульсаций числа Нуссельта от лобовой точки и до угла $\varphi = 65 \dots 70^\circ$ остается практически постоянной.



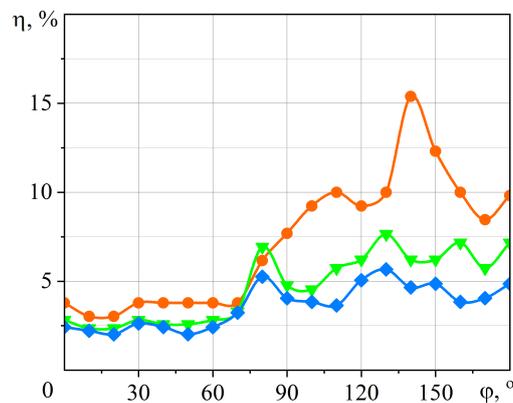
а)



б)



в)



г)

оранжевая линия советует $Re = 13 \cdot 10^3$, зеленая линия – $Re = 47 \cdot 10^3$,
синяя линия – $Re = 78 \cdot 10^3$

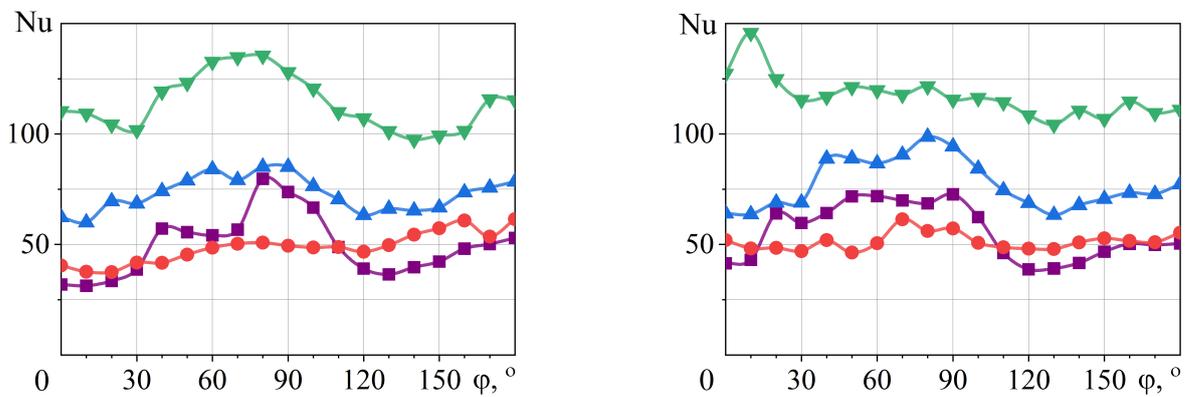
Рисунок 12 — Зависимость интенсивности пульсаций местного числа

Нуссельта от угла поворота цилиндра для разных углов атаки:

а – $\beta = 0$; б – $\beta = 15$; в – $\beta = 30$; г – $\beta = 45$

Для всех углов β интенсивность падает с увеличением числа Рейнольдса Re , что ожидаемо: с увеличением скорости силы инерции, действующие в потоке, превалируют над силами вязкости. Угол атаки β не влияет на распределение ни среднего числа Нуссельта, ни его пульсаций вплоть до угла $\varphi = \varphi$. Далее, возникают местные экстремумы интенсивности, скорее всего, связанные с изменением структуры течения и взаимодействия оторвавшихся вихрей с поверхностью цилиндра.

Далее рассмотрено обтекание двух цилиндров. На рисунке ?? показаны кривые КТО для различных режимов и при фиксированном расстоянии между цилиндрами S (напомним, что расстояние рассчитывается между ближайшими точками цилиндров, а не между их осями) и для различных режимов.



а)

б)

фиолетовая линия – $Re = 2,4 \cdot 10^3$; красная линия – $Re = 4,8 \cdot 10^3$;синяя линия – $Re = 9,6 \cdot 10^3$; зеленая линия – $Re = 29,8 \cdot 10^3$

Рисунок 13 — Распределение местного числа Нуссельта по второму цилиндру:

а – $S = 1d$; б – $S = 2d$; в – $S = 4d$

Видны заметные отличия кривой КТО по сравнению с полученной для одиночного цилиндра: максимум КТО не находится вблизи лобовой образующей, а его положение зависит как от режима (числа Рейнольдса), так и от параметра S . Отсутствует и явный минимум, свойственный распределению КТО для одиночного цилиндра.

Ход кривых становится понятным благодаря полям скорости вблизи второго цилиндра, представленным на рисунке 14.

Местное число Нуссельта на поверхности второго цилиндра зависит от того, в какой части следа он расположен. Повышение КТО в диапазоне углов $\varphi = 40 \dots 100^\circ$ для случая $S = 1d$, наблюдается во всех исследуемых режи-

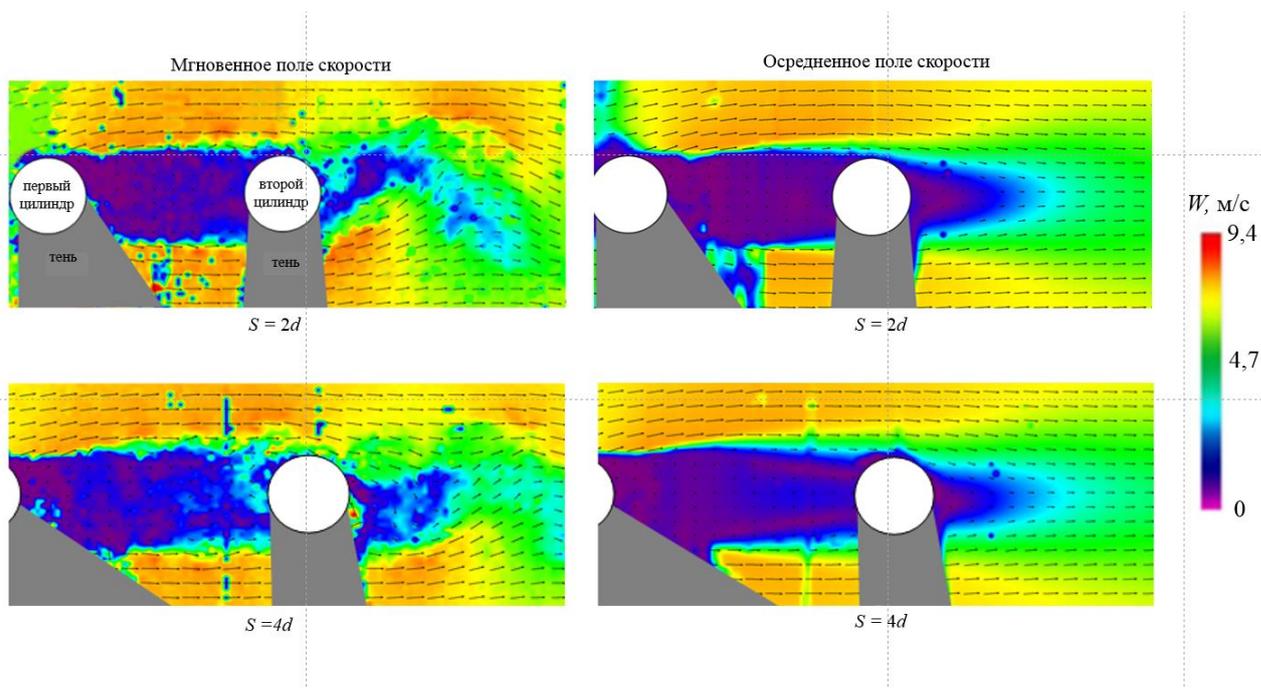


Рисунок 14 — Визуализация течения вблизи пары цилиндров при $Re = 9600$

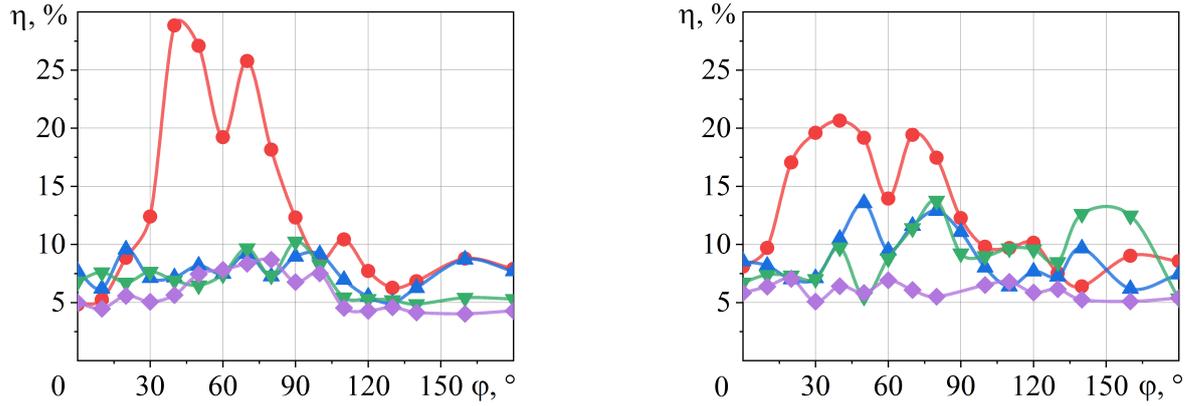
мах. Эта часть второго цилиндра взаимодействует с вихрем, сошедшим с первого. В исследуемой области именно при таком S наблюдаются максимальные отклонения поперечной составляющей скорости v и пульсаций обеих составляющих (u' и v').

С увеличением расстояния S до $2d$, описанный выше механизм взаимодействия сошедших с первого цилиндра вихрей и второго цилиндра сохраняется для низких Re (10^3 и ниже). Ход кривой для $Nu = f_\phi Re = 20,2 \cdot 10^3$ имеет вид затухающих гармонических колебаний, а кривая $Re = 28,8 \cdot 10^3$ практически становится прямой, за исключением пика вблизи лобовой образующей. Наиболее чувствительно к режиму оказывается расстояние $S = 2d$.

По аналогии с предыдущим разделом, на рисунке 15 представлены кривые СКО местного числа Нуссельта на поверхности второго цилиндра. Для нормировки здесь также использована величина \sqrt{Re} .

Распределение пульсаций КТО по поверхности второго цилиндра отличается от такового для одиночного как по форме, так и по уровню. Наибольшие пульсации совпадают с областью повышения КТО. Визуализация течения показывает, что именно в этой области вихрь взаимодействует с поверхностью второго цилиндра.

На рисунке 16 представлены экспериментальные точки зависимости $Nu(Re)$ для осредненного по поверхности второго цилиндра КТО. Видно, что



а)

б)

красная линия – $Re = 2,4 \cdot 10^3$; синяя линия – $Re = 4,8 \cdot 10^3$;зеленая линия – $Re = 9,6 \cdot 10^3$; фиолетовая линия – $Re = 29,8 \cdot 10^3$

Рисунок 15 — Распределение СКО числа Нуссельта по второму цилиндру:

а – $S = 1d$; б – $S = 2d$; в – $S = 4d$

значение КТО в этом случае ниже, чем для первого (или одиночного) цилиндра. Наиболее близко к прямой лежат точки, получены для максимального расстояния S .

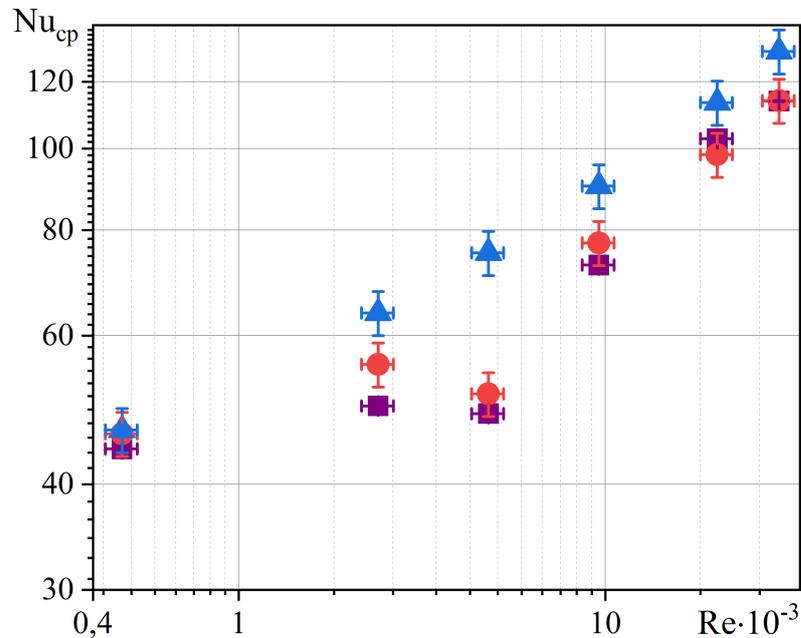
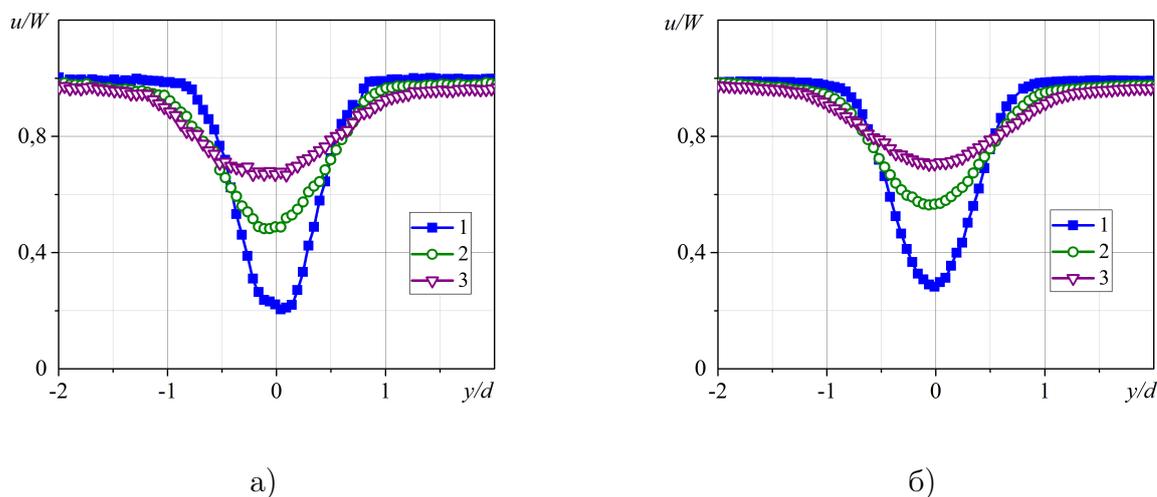


Рисунок 16 — Зависимость осредненного по поверхности числа Нуссельта от режима обтекания

Кроме того, видно отличие следа за вторым цилиндром, по сравнению с таковым за одиночным: длина и ширина зоны рециркуляции меньше и более чувствительна к режиму течения. Для удобства сопоставления на рисунках 17 и ?? показаны изменения продольной скорости u в следе на различном расстоянии от второго цилиндра.



а) синяя линия – $x/d = 0,5$; зеленая линия – $x/d = 1$; фиолетовая линия – $x/d = 2$

Рисунок 17 — Распределение продольной скорости u в следе за вторым цилиндром при $S = 2d$: а – $S = 1d$; б – $S = 2d$; в – $S = 4d$

В отличие от следа за первым цилиндром, за вторым цилиндром профиль имеет V-образную форму. Для оценки длины рециркуляционного пузыря L , мы рассматривали распределение u вдоль оси Ox (рисунок 18).

Кривая для режима $Re = 20,2 \cdot 10^3$ совпадает по форме с кривыми, представленными в главе ??, полученными для одиночного цилиндра. Однако область отрицательных значений u значительно уже; длина рециркуляционного пузыря $L = 0,94L$.

На рисунке 19 представлены зависимости поперечной составляющей скорости в тех же сечениях, что и на рисунке 17

Зона рециркуляции за вторым цилиндром в 1,5... 2 раза меньше в продольном направлении и несколько больше в поперечном. Чувствительность течения к режиму в следе за вторым цилиндром выражена больше в сравнении с одиночным цилиндром.

Глава завершается исследованием обтекания трех цилиндров. Распределения КТО по поверхности третьего цилиндра для разных режимов и при фикс-

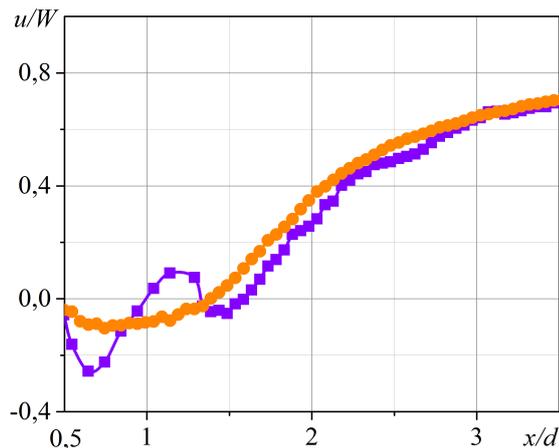
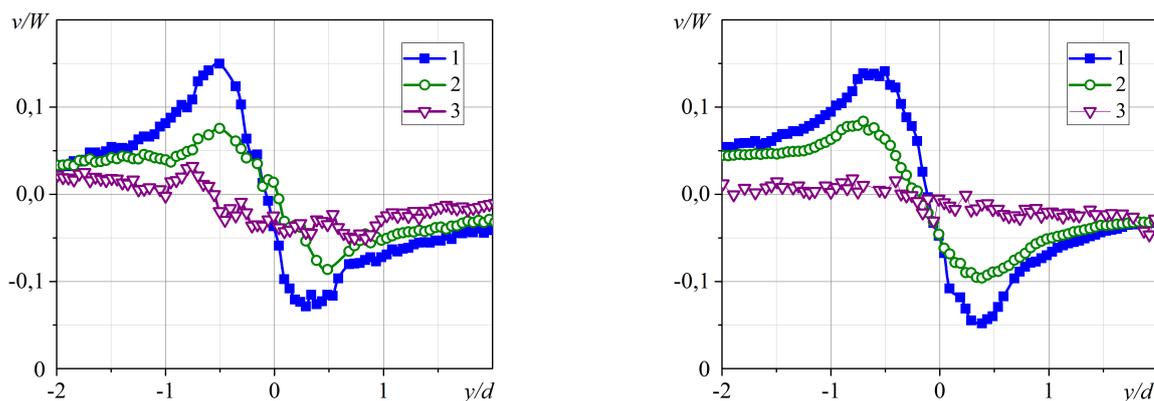


Рисунок 18 — Распределение продольной скорости u в следе за вторым цилиндром: оранжевая линия – $Re = 4,8 \cdot 10^3$, фиолетовая линия – $Re = 20,2 \cdot 10^3$



а)

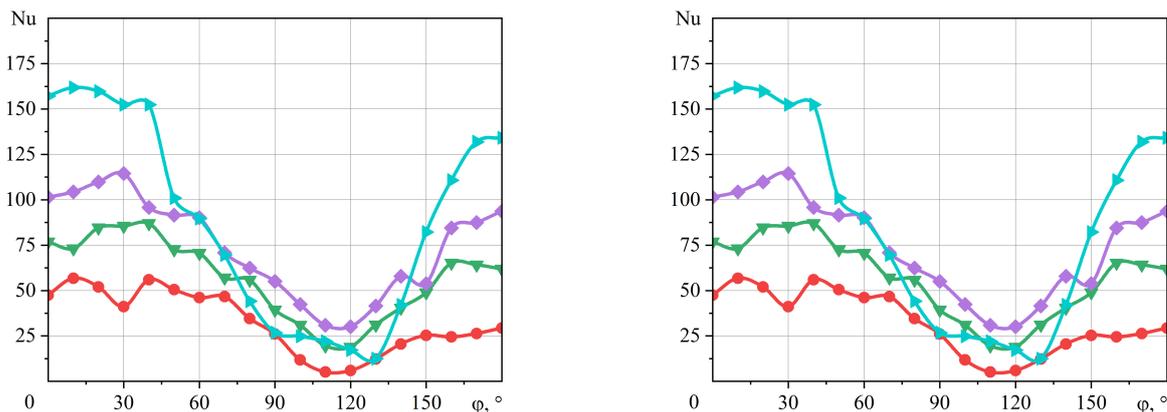
б)

синяя линия – $x/d = 0,5$; зеленая линия – $x/d = 1$; фиолетовая линия – $x/d = 2$

Рисунок 19 — Распределение поперечной скорости v в следе за вторым цилиндром при $S = 2d$: (а) – $S = 1d$; (б) – $S = 2d$; (в) – $S = 4d$

сированном расстоянии S , полученные с помощью градиентной теплотметрии, представлены на рисунке 20.

Характер распределения КТО вблизи третьего цилиндра напоминает те же зависимости, что и для одиночного цилиндра, но с небольшими отличиями. Максимум КТО находится не на лобовой образующей, а вблизи нее, а сама кривая идет более полого. Минимум КТО находится в области $\varphi = 100 \dots 110^\circ$, после чего ход кривых зависит от режима. При низких скоростях потока ($Re < 10^3$) ви-



а)

б)

красная линия – $Re = 2,4 \cdot 10^3$; зеленая линия – $Re = 2,4 \cdot 10^3$;

фиолетовая линия – $Re = 20,2 \cdot 10^3$; бирюзовая линия – $Re = 29,8 \cdot 10^3$

Рисунок 20 — Распределение местного числа Нуссельта по третьему цилиндру для фиксированного расстояния S при постоянной скорости набегающего потока: (а) – $S = 1d$; (б) – $S = 2d$; (в) – $S = 3d$

ден слабый рост КТО вплоть до кормовой образующей. Для высоких скоростей после минимума наблюдается интенсивный рост КТО до значений, близких к максимуму; минимум КТО при этом выражен «острее». Заметно влияние расстояния между цилиндрами S . При $S = d$ КТО наибольший во всем диапазоне режимов, причем, его уровень превосходит КТО для одиночного цилиндра. С другой стороны, при $S > 2d$ средней КТО падает ниже показателей для первого цилиндра.

Длина следа за третьим цилиндром слабо зависит от параметра S . С другой стороны, ширина зоны в следе, где продольная скорость ниже скорости свободного потока, шире по сравнению с такой же зоной за одиночным или вторым цилиндром.

Местные распределения КТО на третьем цилиндре и поля скорости вблизи него напоминают те же параметры, полученные для одиночного (или первого) цилиндра. Обобщение результатов, полученных для третьего цилиндра, показаны на рисунке 22.

Обобщая результаты, можно сказать, что наиболее эффективным с точки зрения теплообмена на поверхности третьего цилиндра является расстояние $S=1d$. Для некоторых режимов среднее по поверхности число Нуссельта может превосходить таковой для одиночного цилиндра. С увеличением расстояния S

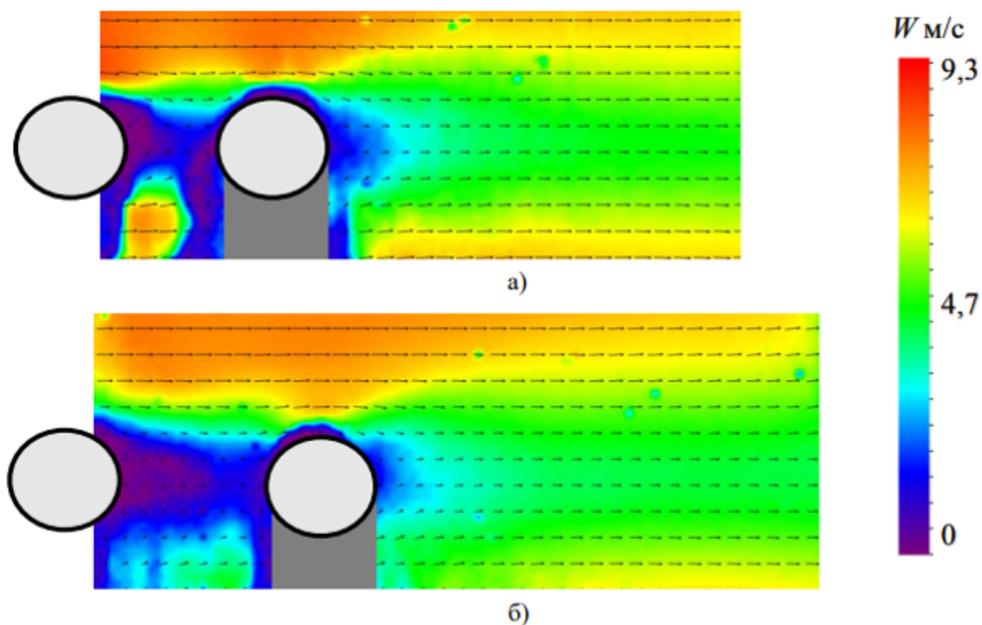


Рисунок 21 — Осредненные поля скоростей при $Re = 9600$: (а)– $S=1-d$,
(б)– $S=2d$

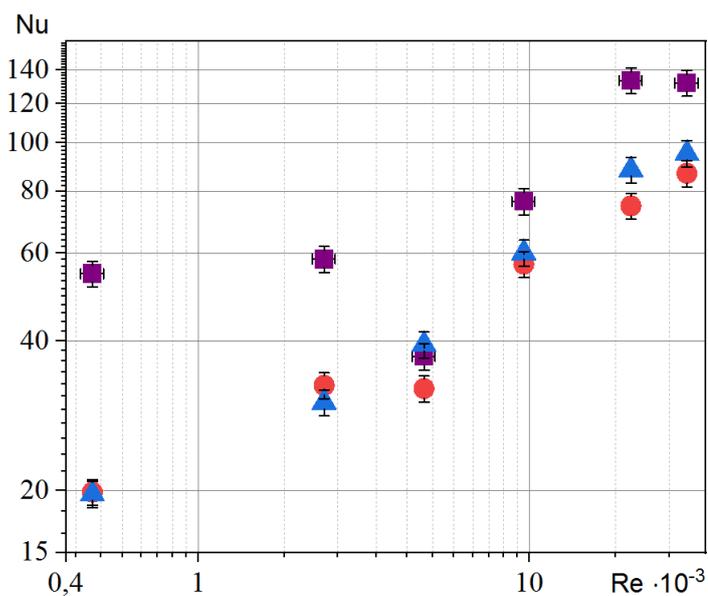


Рисунок 22 — Зависимость осредненного по поверхности числа Нуссельта от режима обтекания: фиолетовые точки – $S=1d$,
красные точки – $S=2d$, синие точки – $S=3d$,

число Нуссельта снижается и становится меньше среднего числа Нуссельта по поверхности одиночного цилиндра, но для всех режимов и расстояний S среднее число Нуссельта по поверхности третьего цилиндра больше, чем для второго.

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Верифицирована на примере одиночного цилиндра и цилиндров, расположенных в ряд, методика, объединяющая градиентную теплометрию и PIV.
2. Экспериментально подтверждена картина обтекания одиночного цилиндра при числе Рейнольдса, равным 3900, полученная другими авторами путем численного моделирования и физического эксперимента. Исследована область рециркуляции в следе за цилиндром. Полученные распределения продольной и поперечной компонент скорости частично соответствуют данным литературы; отличия объяснены вкладом теплообмена на поверхности нагретой модели.
3. Исследование нестационарных характеристик течения и теплообмена при обтекании цилиндра показало хорошее соответствие данным литературы.
4. Исследованы и объяснены картина течения и теплообмена при поперечном и косом обтекании нагретого цилиндра. Выявлено влияние угла атаки на пульсационные характеристики.
5. Исследованы течение и теплообмен на паре цилиндров, установленных один за другим с различным шагом. Показано влияние длины рециркуляционного пузыря и особенностей вихреобразования на картину течения и пульсационные характеристики.
6. Исследованы течение и теплообмен на поверхностях трех расположенных в ряд цилиндров. Распределения числа Нуссельта на поверхности третьего цилиндра связаны с особенностями течения, выявленными с помощью PIV.
7. Предложена методика и полученные на ее основе результаты показали адекватность и информативность. Они пригодны как для изучения и обоснования процессов течения и теплообмена, так и для верификации численных методов, широко применяемых при исследовании этих процессов.

**Основные научные публикации по теме диссертационного
исследования**

В рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Сероштанов В.В. Исследование обтекания и теплообмена на поверхности одиночного кольцевого ребра / А.А. Гусаков, М.А. Греков. В.В. Сероштанов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2018. Т. 11. № 2. С. 151 - 164. DOI: 10.18721/JPM.11214.

В рецензируемых научных изданиях, входящих в международную базу данных Scopus:

1. Seroshtanov V. Hydrodynamics and heat transfer of yawed circular cylinder / Mityakov A., Mityakov V., Sapozhnikov S., Gusakov A., Bashkatov A., Seroshtanov V., Zainullina E., Babich A. // International Journal of Heat and Mass Transfer Том, V. 115, pp. 333 - 339
2. Seroshtanov V. Investigating heat transfer augmentation using gradient heat flux measurement and PIV method / Mityakov A., Babich A., Bashkatov A., Gusakov A., Dymkin A., Zainullina E., Sapozhnikov S., Mityakov V., Seroshtanov V. // MATEC Web of Conferences, V. 11510, July 2017
3. Seroshtanov V. Comprehensive study of flow and heat transfer at the surface of circular cooling fin / Mityakov V.Yu., Grekov M.A., Gusakov A.A., Sapozhnikov S.Z., Seroshtanov V.V., Bashkatov A.V., Dymkin A.N., Pavlov A.V., Milto O.A., Kalmykov K.S. // Journal of Physics: Conference Series, V. 891, No. 110, November 2017
4. Seroshtanov V. Investigation of flow and heat transfer at the surface of a single circular cooling fin / Sapozhnikov S.Z., Mityakov V.Y., Mityakov A.V., Gusakov A.A., Grekov M.A., Seroshtanov V.V. // International Journal of Engineering and Technology (UAE), V. 7, No. 4, pp. 33 - 36
5. Seroshtanov V. Heat flux measurements in heat transfer study / Sapozhnikov S.Z., Mityakov V.Yu., Mityakov A.V., Gusakov A.A., Grekov M.A., Vintsarevich A.V., Seroshtanov V.V., Babich A.Yu., Zaynullina E.R. // International Heat Transfer Conference, 2018-August, pp. 8678 - 8685 (16th International Heat Transfer Conference, IHTC 2018, Beijing, 10 August 2018 - 15 August 2018)
6. Seroshtanov V. Investigation of flow and heat transfer at the circular fins / Mityakov V., Gusakov A., Seroshtanov V., Grekov M. // MATEC Web of Conferences, V. 2455, 2018

7. Seroshtanov V. Experimental determination of circular fin effectiveness / Sapozhnikov S.Z., Mityakov V.Y., Gusakov A.A., Seroshtanov V.V., Subbotina V.V. // Journal of Physics: Conference Series, V. 1382, No. 128, November 2019
8. Seroshtanov V. Heat transfer and air flow near a pair of circular cylinders / Mityakov V., Seroshtanov V., Vlasov A., Suchok V., Bobylev P., Zhidkov N. // E3S Web of Conferences, V. 14018, 2019
9. Seroshtanov V. The combination of PIV and heat flux measurement in study of flow and heat transfer near a circular finned cylinder / Sapozhnikov S.Z., Mityakov V.Yu., Seroshtanov V.V., Gusakov A.A. // Journal of Physics: Conference Series, V. 1421, No. 130, December 2019
10. Seroshtanov V. Multi-method research of flow and heat transfer for the tube with circular fins / Seroshtanov V.V., Gusakov A.A., Grekov M.A. // Journal of Physics: Conference Series, V. 1565, No. 128, July 2020
11. Seroshtanov V. Gradient heatmetry advances / Sapozhnikov S.Z., Mityakov V.Y., Mityakov A.V., Gusakov A.A., Zainullina E.R., Grekov M.A., Seroshtanov V.V., Bashkatov A., Babich A.Y., Pavlov A.V. // Energies, V. 13, No. 231, December 2020
12. Seroshtanov V. Features of vortex formation and heat transfer during cross flow around two cylinders / Guzeev A.S., Sapozhnikov S.Z., Mitiakov V.Yu., Seroshtanov V.V., Suchok V.V., Vlasov A.S., Zhidkov N.A. // Journal of Physics: Conference Series, V. 1683, No. 223, December 2020
13. Seroshtanov V. Features of flow and heat transfer near a pair of circular cylinders / Seroshtanov V.V., Vlasov A.S., Suchok V.V., Zhidkov N.A. // Journal of Physics: Conference Series, V. 1867, No. 119, April 2021

В других изданиях:

1. Сероштанов В.В. Комплексное исследование теплообмена и течения около изотермического кольцевого ребра на цилиндре / Гусаков А.А., Греков М.А., Сероштанов В.В., Павлов А.В. // Седьмая российская национальная конференция по теплообмену (РНКТ-7) (Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» 22-26.10.2018) – г. Москва, 2018.