



СЕРОШТАНОВ ВЛАДИМИР ВИКТОРОВИЧ

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ
И ТЕПЛООБМЕНА В СИСТЕМЕ РАСПОЛОЖЕННЫХ
В РЯД ЦИЛИНДРОВ**

01.04.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

2021
Санкт-Петербург

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого»

Научный руководитель: **Митяков Андрей Владимирович**
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Бобашев Сергей Васильевич**,
доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, главный научный сотрудник лаборатории физической газодинамики

Шарков Александр Васильевич,
доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», профессор факультета энергетики и экотехнологий

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования **«Брянский государственный технический университет»**, г. Брянск

Защита состоится 17 декабря 2021 в 14.00 на заседании диссертационного совета У.01.04.14 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, механический корпус, аудитория 14.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбПУ и на сайте <https://elib.spbstu.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
У.01.04.14, д.т.н.



А. А. Гусаков

Общая характеристика работы

Течение и теплообмен на поверхностях обтекаемых труб определяют все расчетные подходы при создании, совершенствовании и использовании многочисленных энергетических установок с трубами и трубными пучками. Кроме того, такие исследования представляют несомненный фундаментальный интерес. Возрастает и роль эксперимента при верификации кодов численного моделирования.

Течение и теплообмен на поверхностях труб и трубных пучков исследуются давно и успешно, однако возможности экспериментаторов до недавнего времени во многом ограничивались дефицитом первичных преобразователей – в первую очередь, быстродействующих датчиков теплового потока.

Современная и во многом уникальная градиентная теплометрия дала многообещающие результаты, однако ряд задач, связанных с нестационарными процессами течения и теплообмена, еще ждут своего решения. В первую очередь, речь идет об исследовании пульсационных характеристик теплового потока и их связи с особенностями турбулентного течения вблизи теплообменных поверхностей.

Актуальность темы. Диссертация посвящена исследованию течения и теплообмена при поперечном и косом обтекании круглого цилиндра и системы цилиндров, расположенных в ряд – включая нестационарный теплообмен, вихреобразование и другие особенности, важные, но недостаточно исследованные.

В работе использовано сочетание теплометрии и PIV (Particle Image Velocimetry – измерения скорости по изображению частиц), ранее апробированные на задачах теплообмена на одиночных цилиндрах и оребренных трубах. Основной упор сделан на изучение пульсационных характеристик, выявление связей между характеристиками теплообмена и течения, верификацию численных методов исследования и интенсификацию теплообмена.

Решение этих задач представляется интересным и полезным как в фундаментальном, так и в прикладном плане.

Степень разработанности темы. 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, Е. Н. Письменного, Х. Накамура, А. А. Гусакова и многих других.

Прямое измерение нестационарного (пульсирующего) теплового потока и расчет коэффициентов теплоотдачи (КТО) стали возможны благодаря использованию градиентных датчиков теплового потока (ГДТП) как элементной базы градиентной теплотометрии, которая активно развивается в Санкт-Петербургском политехническом университете 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 нестационарных задач.

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

Целью диссертации является применение комплексной методики, объединяющей градиентную теплотометрию и PIV, к исследованию усредненных и пульсационных характеристик течения и теплообмена на поверхности цилиндров, установленных в ряд, при их поперечном и косом обтекании.

К основным **задачам** исследования относятся:

- верификация численного моделирования течения и теплообмена на поверхности одиночного цилиндра и цилиндров, расположенных в ряд;
- определение пульсационных характеристик течения и теплообмена с учетом длины рециркуляционного пузыря, характера вихреобразования и других факторов, роль и значение которых устанавливает PIV;
- изучение спектра мощности пульсаций плотности теплового потока и частот, характеризующих пики на нем, при различных режимах течения и на различных азимутальных углах;
- исследование течения и теплообмена при поперечном и косом обтекании одиночного цилиндра с выявлением и обоснованием пульсационных характеристик;
- исследование системы из двух и трех цилиндров, установленных с различным шагом, при различных режимах течения;

- исследование нестационарного теплообмена при установке продольных стержней-турбулизаторов в системе из трех расположенных в ряд цилиндров.

Научная новизна исследования заключается в следующем.

1. Впервые получены и комплексно исследованы пульсационные параметры течения и теплообмена при поперечном и косом обтекании нагретого цилиндра, а также двух и трех цилиндров, расположенных в ряд.
2. Впервые установлены и обоснованы связи параметров теплообмена с характеристиками течения в следе, формированием рециркуляционного пузыря, характером образования и присоединения вихрей при различных геометрических и режимных характеристиках эксперимента.
3. Получены уравнения подобия для теплообмена на поверхности второго и третьего цилиндра при различном их удалении от первого и для различных режимов течения.
4. Показаны особенности нестационарного теплообмена, связанные с действием стержней-турбулизаторов, установленных на первом и третьем цилиндрах, при их расположении в ряд.

Практическая значимость. Доказана возможность верификации численных методов исследования теплообмена и течения при обтекании одиночных и расположенных в ряд цилиндров с помощью физического эксперимента с использованием градиентной теплометрии и PIV.

Реализация предлагаемого метода позволяет использовать результаты исследования при создании инженерных методик расчета теплообменников с трубчатыми поверхностями и других устройств, использующих такие поверхности.

Методология исследования. В исследовании сочетается использование апробированной элементной базы градиентной теплометрии и аналого-цифровых преобразователей сигналов ГДТП с PIV, позволяющее визуализировать мгновенные и усредненные по времени поля скорости при обтекании моделей.

Сочетание указанных методик позволяет в реальном времени исследовать параметры течения и теплообмена, включая нестационарные. Резуль-

таты тестовых экспериментов результатов сопоставлены с приводимыми в литературе, подтверждена адекватность наших данных и объяснены расхождения отдельных результатов с приводимыми в других источниках.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методика, сочетающая градиентную теплометрию и PIV, как средство исследования течения и теплообмена на поверхности поперечно и косо обтекаемого цилиндра и системы цилиндров, расположенных в ряд.
2. Модели, оснастка и аппаратура для исследования пульсационных составляющих параметров течения и теплообмена.
3. Новые результаты, полученные при поперечном и косом обтекании одиночных цилиндров, цилиндров, расположенных в ряд, и цилиндров со стержнями-турбулизаторами в различных геометрических и режимных условиях эксперимента.
4. Уравнения подобия для расчета КТО при поперечном и косом обтекании второго и третьего цилиндров при различных геометрических и режимных параметрах.
5. Результаты интенсификации теплообмена при размещении стержней-турбулизаторов на поверхностях первого и третьего цилиндров.

Достоверность полученных результатов определяется:

- использованием PIV для визуализации полей скорости, термометрии и градиентной теплометрии 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 неопределенностей экспериментальных измерений и рассчитанных на их основе величин в соответствии с действующими стандартами;
- удовлетворительным согласованием результатов, полученных в тестовых экспериментах, с апробированными работами отечественных и зарубежных исследователей.

Апробация работы проводилась на семинарах и конференциях:

1. Международная научная конференция «Современные проблемы теплофизики и энергетики» (Москва, 2017).
2. 16-ая международная конференция по теплообмену «International Heat Transfer Conference» (Пекин, 2018).
3. VII Российская национальная конференция по теплообмену (Москва, 2018);
4. Международная научная конференция по энергетике, экологии и строительству ЕЕСЕ-2019 (Санкт-Петербург, 2019).
5. XXII школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А. И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках» (Москва, 2019).
6. Всероссийская научная конференция с международным участием «XI Семинар ВУЗов по теплофизике и энергетике» (Санкт-Петербург, 2019).
7. XXIII школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А. И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках» (Екатеринбург, 2021).

Личный вклад. Автор принимал непосредственное участие в разработке экспериментального стенда, создании моделей для исследования течения и теплообмена и проведении опытов. Выполнил анализ и обобщение экспериментальных данных, полученных для системы цилиндров, расположенных в ряд, для различных гидродинамических режимов при разной конфигурации. Диссертант принял непосредственное участие в подготовке статей, а также докладов и выступлений на семинарах и конференциях.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 14 печатных работах, в том числе в 1 издании, входящем в перечень ВАК, и 13 изданиях, имеющих индекс Scopus/Web of Science.

Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность темы, описана степень ее разработанности, сформулированы цели и задачи исследования, его научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методология, положения,

выносимые на защиту; обоснована достоверность результатов; представлены сведения об апробации и публикациях по теме диссертационной работы.

Глава 1 посвящена описанию актуальности задачи, содержит анализ работ, посвященных исследованию течения и теплообмена при обтекании системы цилиндров – одиночного или нескольких. Представлены методики, используемые в экспериментальных исследованиях, отмечены их преимущества и недостатки. Показано наличие большого количества работ, где пульсационный характер течения и теплообмена изучают с помощью численного моделирования; описаны наиболее часто используемые методы моделирования. Показаны наиболее распространенные способы интенсификации теплообмена, применяемые при обтекании цилиндрических поверхностей.

Особое внимание уделено опытам по исследованию конвективного теплообмена методами градиентной теплотметрии, выполненные научной группой СПбПУ за последнюю декаду. Опираясь на опыт применения градиентных датчиков теплового потока и постоянно растущий уровень и возможности измерительной аппаратуры, констатируется возможность исследовать течение и теплообмен в нестационарной постановке с помощью комплексной методики, включающей градиентную теплотметрию и PIV.

Глава завершается постановкой задач экспериментов и определением их объема.

Глава 2 посвящена методике и технике эксперимента, а также оценке метрологического уровня градиентной теплотметрии и PIV.

Комплексное исследование течения и теплообмена 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 теплотметрию, 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.

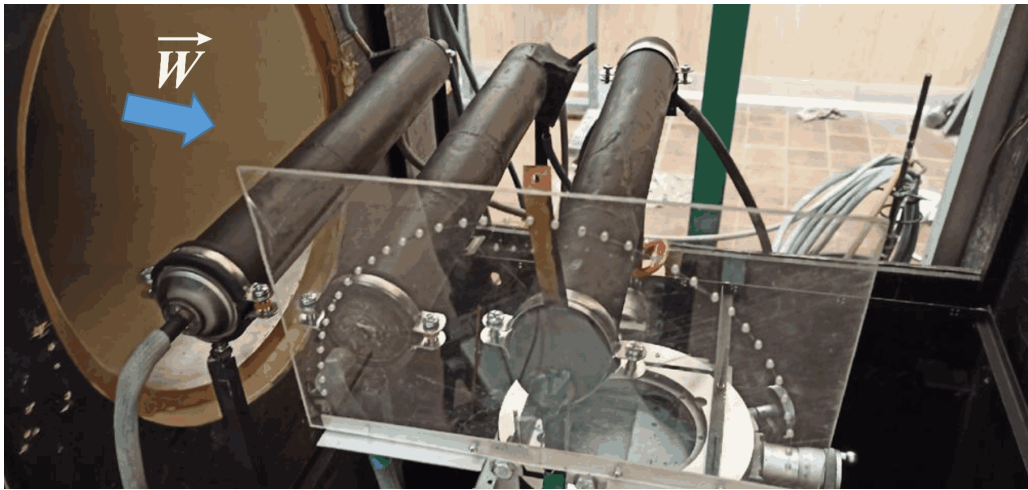
Все местные значения величин определялись вблизи образующих цилиндра диаметром d , отнесённых на азимутальный угол φ , отсчитываемый от лобовой образующей. В качестве независимой безразмерной переменной заявлялось число Рейнольдса $Re = \frac{wd}{\nu}$, где w – скорость набегающего воздушного потока,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

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

- одиночный цилиндр;
- пара цилиндров, установленных один за другим;
- 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. Центробежный вентилятор трубы обеспечивает скорость воздушного потока в диапазоне от 0,1...60 м/с. Конфузор (с поджатием 1:7) обеспечивает степень турбулентности на входе в рабочую зону $Tu \leq 0,5\%$ во всем диапазоне скоростей. На рисунке 1 представлена фотография рабочей зоны трубы с установленной моделью.

Визуализация течения и измерения скорости в следе за моделью проводились с использованием PIV установки компании «ПОЛИС», разработанной и изготовленной в Институте теплофизики СО РАН (г. Новосибирск). Она включает двойной импульсный лазер Quantel BSL, цифровую фотокамеру с разрешением 2048×2048 (4 Мп), устройство синхронизации, дымогенератор и программное обеспечение для обработки изображений.



а)



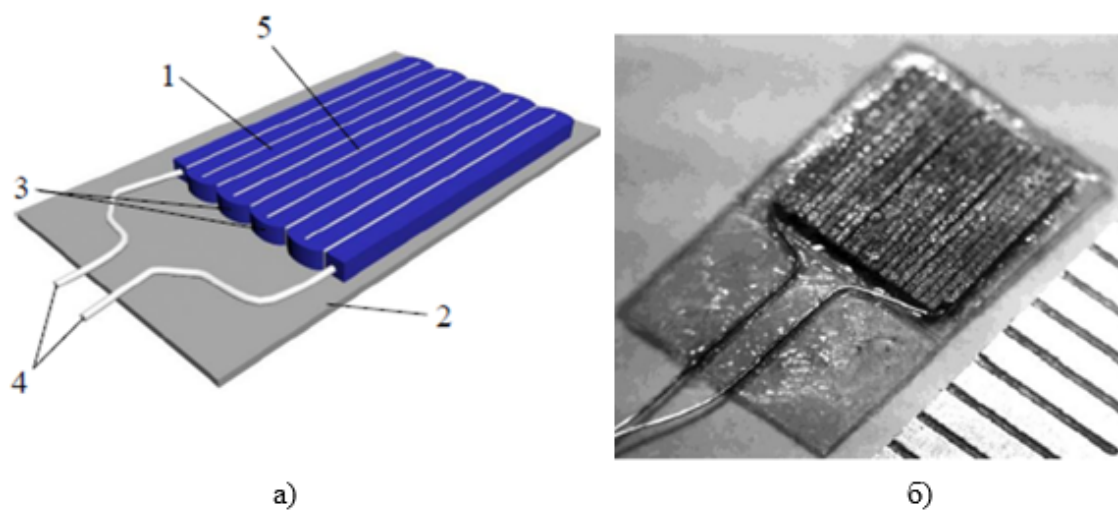
б)

Рисунок 1 — Модели для исследования теплообмена (а) и PIV (б) трех цилиндров, установленных один за другим в рабочей камере аэродинамической трубы

Длина волны лазера 532 нм, энергия импульса составила 2×220 МДж, время импульса 7 нс. Минимальное временное разрешение установки достигает 10 мкс, что позволило изучить весь диапазон чисел Рейнольдса, используемый в исследовании.

С помощью PIV получены мгновенные и осреднённые по времени поля скорости вблизи модели, а также распределения составляющих (компонент) скорости в следе за моделью. Все опыты проводились при фиксированной скорости (и числе Рейнольдса), причем в сочетании с теплотерией такой

подход позволил обоснованно связать поля скорости и распределения теплового потока (или КТО).



1 — анизотропный термоэлемент; 2 — подложка из слюды; 3 — спаи из чистого висмута;
4 — сигнальные провода; 5 — лавсановые прокладки

Рисунок 2 — ГДТП на основе анизотропного висмута:

а — схема, б — общий вид

Для измерения плотности теплового потока в работе использовались батарейные ГДТП на основе анизотропных термоэлементов из висмута чистоты 0,9999. Внешний вид и схема ГДТП показаны на рисунке 2.

Выбор таких ГДТП обусловлен тем, что:

- рабочая температура поверхности близка к 100 °С;
- рабочая среда не агрессивна;
- 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 PIV-лазера и других источников;
- сопротивление ГДТП из висмута не превышает 1...2 Ом, что облегчает обработку их 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 данные измерений.

В различных опытах экспериментальный стенд отличался 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.

Экспериментальные стенды для исследования течения и теплообмена в различных опытах отличались только исследуемой моделью (количеством цилиндров, их размещением и углом натекания β). Схема стенда для PIV в упрощенном виде представлена на рисунке 3. Модель – три уставленных в

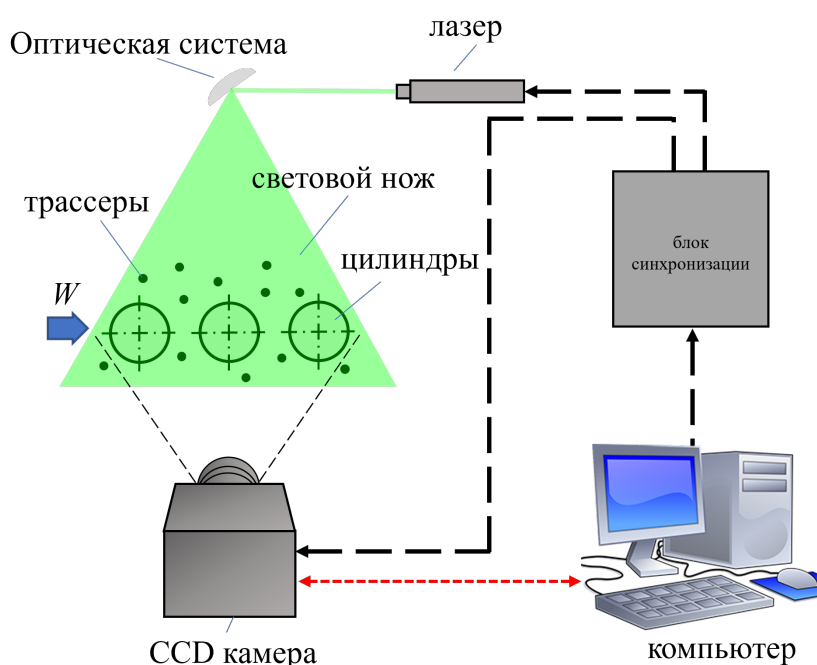


Рисунок 3 — Блок-схема стенда для PIV диагностики

ряд цилиндра – находится в камере Эйфеля аэродинамической трубы. Блок синхронизации системы «ПОЛИС» генерирует парные вспышки лазера; PIV ведут по показаниям кросс-корреляционной камеры (CCD камеры).

В результате получены поля скорости вблизи модели и значения составляющих скорости u и v в различных сечениях, перпендикулярных плоскости лазерного ножа.

Экспериментальный стенд по исследованию теплообмена схематично изображен на рисунке 4. На исследуемом цилиндре (на схеме – третьем), оснащем ГДТП, монтировался лимб для задания угла φ . Обычно, в ходе экспе-



Рисунок 4 — Блок-схема стенда для исследований теплообмена

римента менялась скорость набегающего воздушного потока от наименьшей до наибольшей при фиксированном расстоянии S между цилиндрами. После чего расстояние S менялось, и опыты повторялись.

По полученным данным удалось определить интенсивность пульсаций теплового потока (или КТО). 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». Расчет показал, что в ходе измерений достигнуты следующие результаты:

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

Метрологический уровень предлагаемой комплексной методики можно считать удовлетворительным.

Глава 3 посвящена сравнению результатов, полученных в данной работе с данными литературы. Сравнение выполнено для поперечного обтека-

ния одиночного кругового обогреваемого цилиндра для режима $Re = 3900$, как для наиболее подробно изученной модели.

Для описания течения вблизи модели целевыми функциями выступили профили скорости W и/или ее проекции на оси x и y в следе за цилиндром (в работе они обозначены u и v , соответственно), длина зоны рециркуляции L и распределение пульсационных составляющих скорости u' и v' в следе за цилиндром.

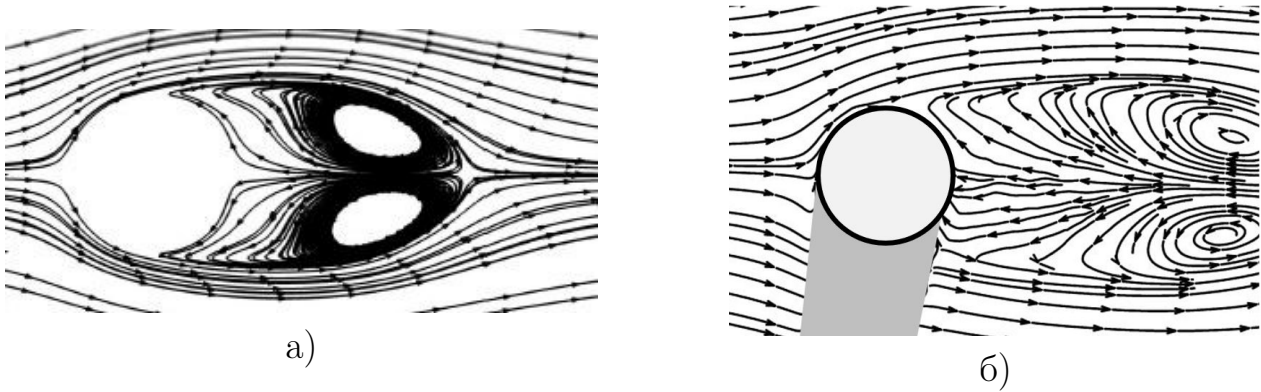


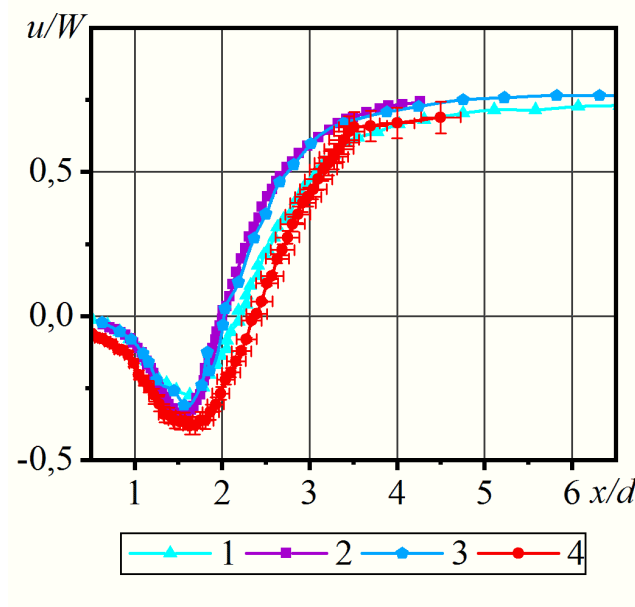
Рисунок 5 — Линии тока вблизи кругового цилиндра: а — Арпан Сиркар и др. (2020); б — наши данные (серым отмечена нерасчетная область)

На рисунке 5 представлены линии тока при обтекании одиночного круглого цилиндра для числа Рейнольдса $Re = 3900$. Линии тока на рисунке 5, а получены Арпан Сиркаром и др. (2020) с помощью численного моделирования, а линии на рисунке 5, б — по нашим данным, полученным с помощью PIV.

Видно, что результаты исследований совпадают. На обоих рисунках наблюдается симметрия течения относительно горизонтальной оси x .

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

На рисунке 6 представлены результаты наших PIV-исследований, а также некоторые данные экспериментов и численного моделирования полученные другими авторами, для режима $Re = 3900$. Можно отметить хорошее согласование как с расчетом, так и с экспериментом, особенно на удалении, большем $(3 \dots 4)d$ от кормовой образующей.

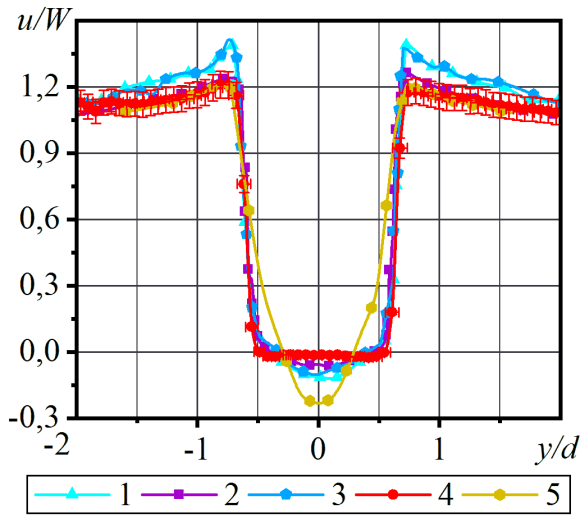


1 – результаты LES-моделирования (Джоги и др. (2020));

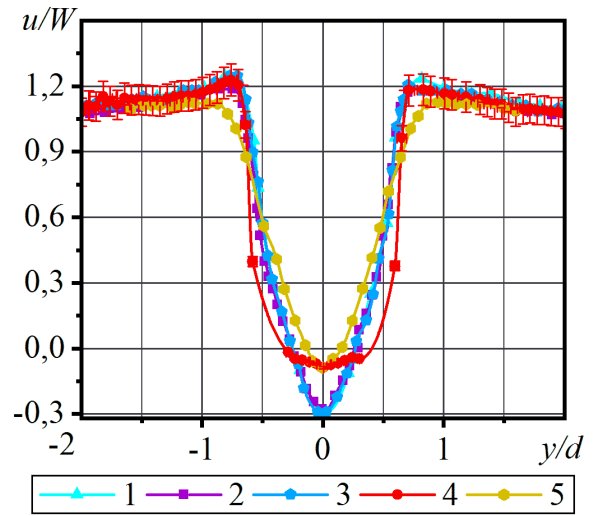
2 – результаты SIV (Михеев и др. (2019));

3 – результаты LES-моделирования (Лысенко и др. (2012)); 4 – наши данные

Рисунок 6 — Продольная составляющая скорости u в следе за цилиндром



а)



б)

1, 2, 3, 4 соответствуют обозначениям на рисунке 6;

5 – результаты DNS (Виссинк и др.);

Рисунок 7 — Профили продольной компоненты скорости u за цилиндром:

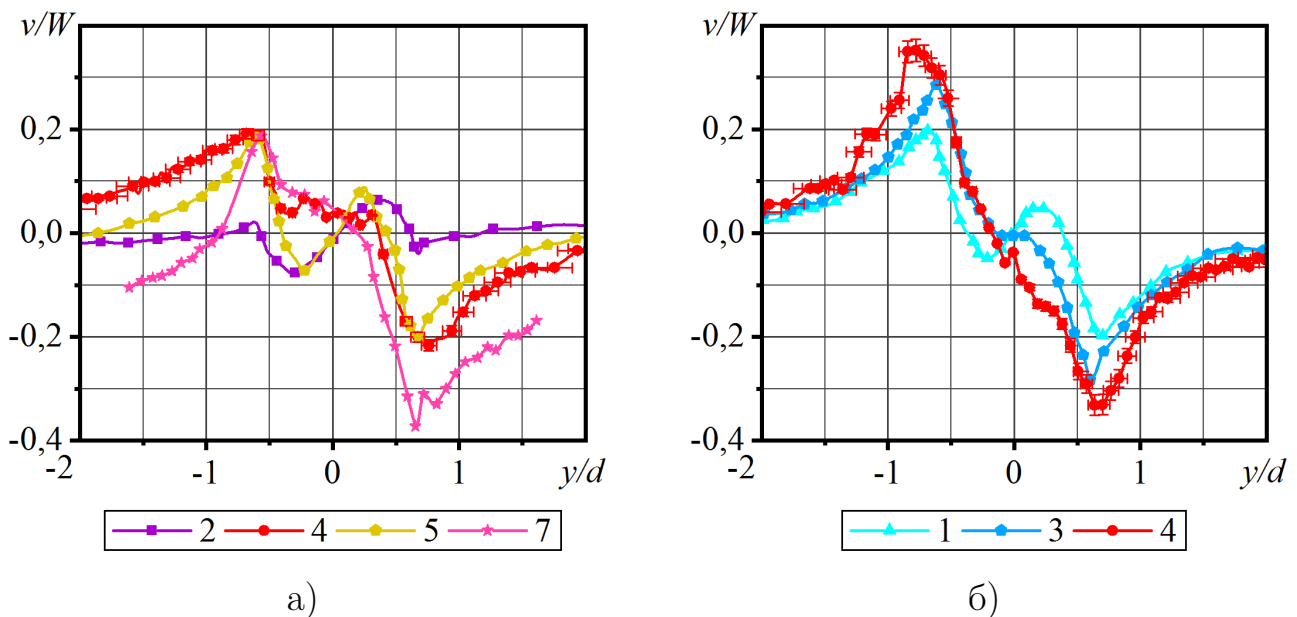
а – $x/d = 1,06$; б – $x/d = 1,54$

Поскольку в литературе нет единого мнения о том, на каком удалении от кормовой образующей цилиндра необходимо рассматривать распределения скоростей, на рисунке 7 представлены профили продольной компоненты

скорости из разных работ, полученных разными способами и на различном удалении от кормовой образующей.

Наши результаты лучше согласуются с экспериментальными работами, а отличия на большом удалении можно объяснить нагревом воздушного потока при обтекании цилиндра: это совпадает с показанным 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.



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

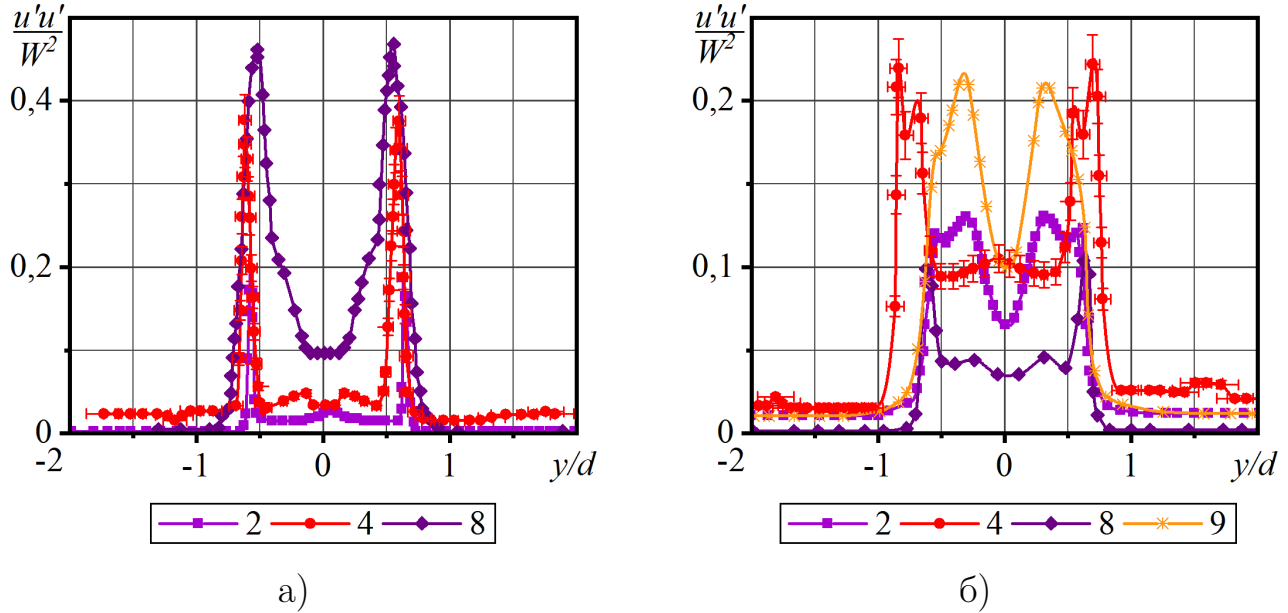
Рисунок 8 — Профили поперечной компоненты скорости v за цилиндром:

а – $x/d = 1,06$; б – $x/d = 1,54$

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 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 действием 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 физическими экспериментами других авторов. Отме-

тим, что влияние теплообмена на продольную составляющую скорости выражается в увеличении длины зоны вихреобразования. Для поперечной составляющей скорости v наши данные, как и данные различных исследователей разнятся сильнее: экстремальные значения отличаются почти вдвое.



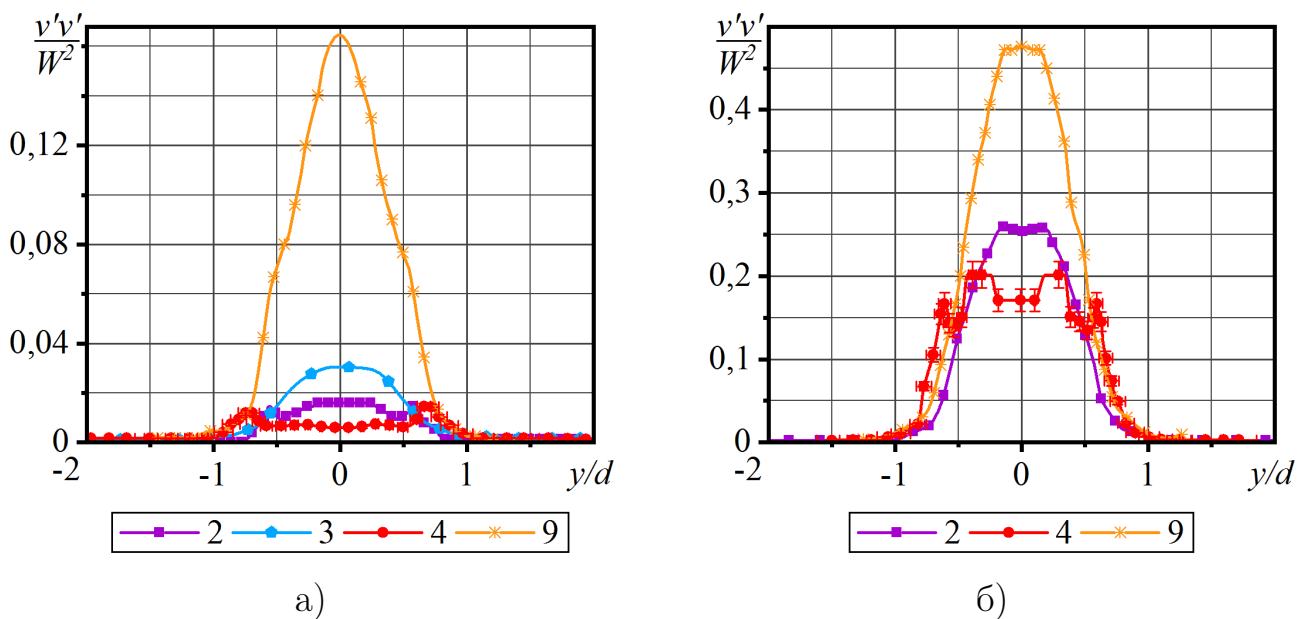
2 и 4 совпадают с обозначениями на рисунке 7;
8 – Лоренцо и др. (1994); 9 – Кравченко и др. (2014)

Рисунок 9 — Профили СКО пульсационной составляющей продольной компоненты скорости $u'u'$ за цилиндром:

а – $x/d = 1,06$; б – $x/d = 1,54$

Более точным параметром для сопоставления данных является распределение пульсационных составляющих скоростей u и v в следе за цилиндром. Изменения профиля среднеквадратичных отклонений (СКО) 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 воздушного потока, тогда как осредненные во времени значения практически не меняются. К сходным выводам приходит Джоги и



Обозначения совпадают с обозначениями на рисунке 9

Рисунок 10 — Профили СКО пульсационной составляющей поперечной компоненты скорости $v'v'$ за цилиндром:

а – $x/d = 1,06$; б – $x/d = 1,54$

др., моделирующие обтекание цилиндра при различных температурных напорах.

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

На рисунке 11 совмещены наши результаты, полученные с помощью градиентной теплометрии, и результаты LES-моделирования Джогги и др. Интенсивность пульсаций КТО на рисунке 11, б рассчитана как среднеквадратичное отклонение местного числа Нуссельта $Nu = \frac{\alpha_\phi d}{\chi}$, отнесенная к квадратному корню из числа Рейнольдса Re .

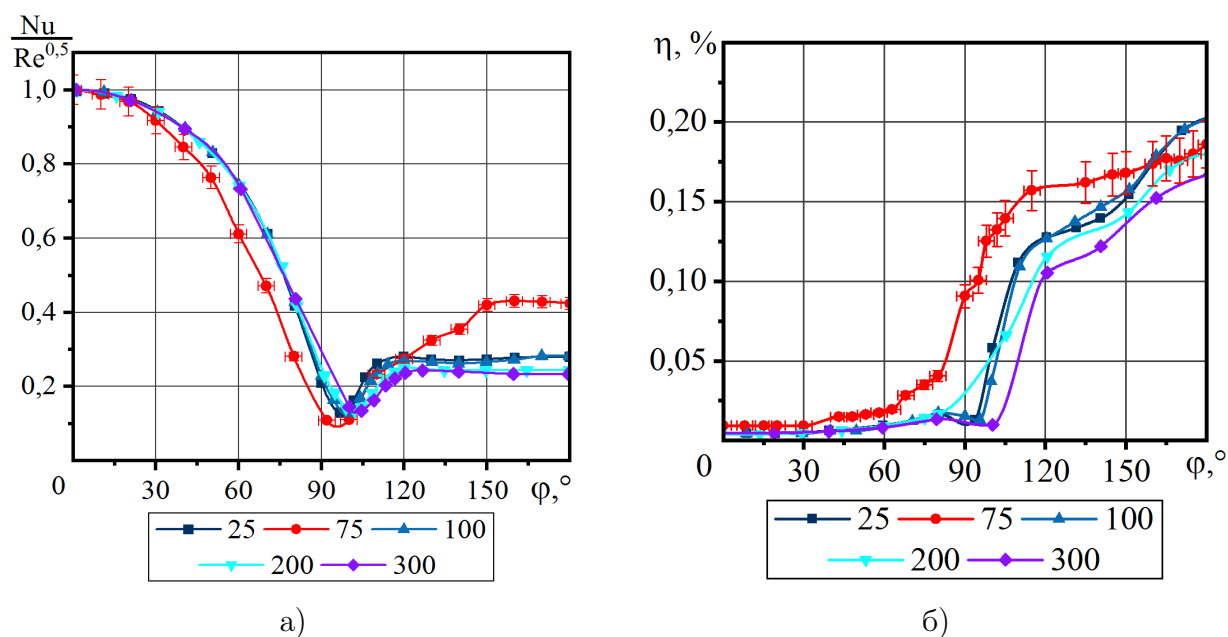


Рисунок 11 — Распределение числа Нуссельта по поверхности цилиндра при различных температурных напорах: а – осредненные по времени; б – интенсивность пульсаций

Кривые показывают, что вблизи лобовой образующей пульсации КТО минимальны. После точки отрыва уровень пульсаций возрастает; в кормовой части цилиндра отклонение мгновенных значений КТО от среднего значения достигает 20...25%.

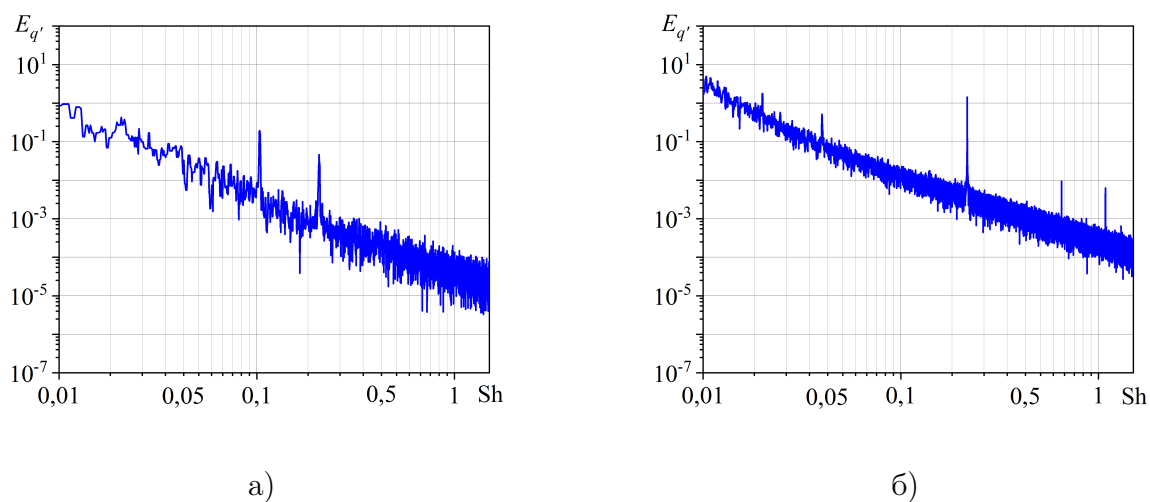


Рисунок 12 — Спектральная плотность мощности, полученная с помощью ГДТП на угле ϕ : а – $\phi = 0^\circ$; б – $\phi = 80^\circ$

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

Главу завершает описание серии опытов, где на азимутальных углах φ от 0° до 180° с шагом $\Delta\varphi = 10^\circ$ в течение 120 с записаны сигналы ГДТП с частотой 2 кГц. По результатам опытов получены спектры плотности мощности (СПМ), показанные на рисунке 12. Видно, что доминирующая частота отрыва близка к 10 Гц для представленных углов φ , что соответствует числу Струхала, рассчитанному по диаметру цилиндра, $Sh = 0,209$.

На спектрах присутствует еще одна пиковая частота, равная 4,8 Гц (вдвое меньшая частоты схода вихрей). Наличие второго пика предположительно связано с вихреобразованием и взаимодействием вихрей с цилиндром. Подобное распределение получил Шольтен и др. для более высоких чисел Рейнольдса ($7,9 \dots 30 \cdot 10^3$).

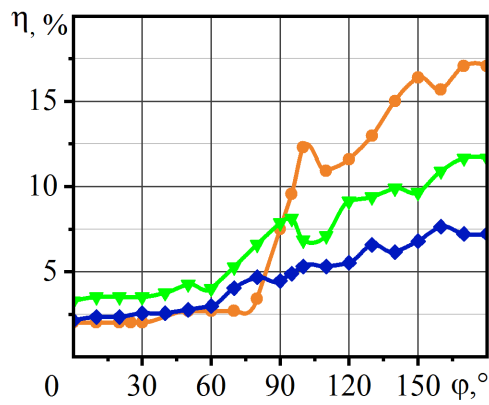
Распределения всех параметров, выбранных для сопоставления, полученные в обзоре работ, совпадают с нашими.

В **главе 4** 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 в исследуемом диапазоне чисел Рейнольдса Re .

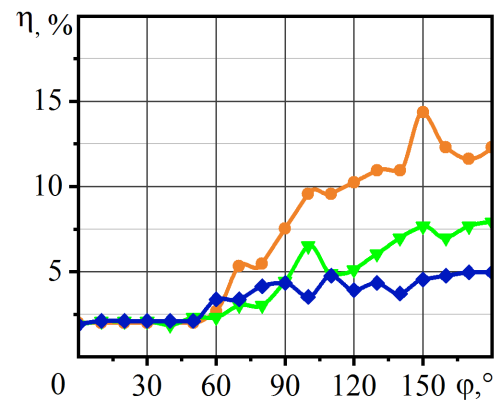
В первой серии опытов мы рассмотрели зависимости уровня КТО и характер его пульсаций для одиночного цилиндра, обтекаемого под углом атаки β . На рисунке 13 представлен уровень пульсаций безразмерного КТО, выраженный в виде интенсивности η . Для нормировки уровня пульсаций здесь использован квадратный корень из числа Рейнольдса Re .

Для выбранного режима течения интенсивность η пульсаций числа Нуссельта от лобовой точки и до угла $\varphi = 65 \dots 70^\circ$ остается практически постоянной. Ярко выраженный экстремум интенсивности пульсаций КТО лежит в области $\varphi = 140 \dots 150^\circ$. Такое поведение можно объяснить тем, что сорвавшийся с поверхности цилиндра вихрь «ударяет» в цилиндр, и указанные углы β обеспечивают наиболее благоприятные условия для такого взаимодействия.

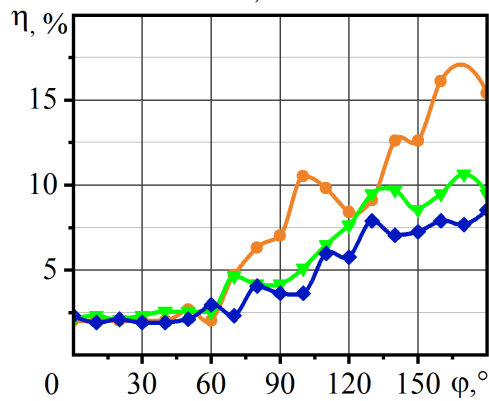
Для всех углов β интенсивность падает с увеличением числа Рейнольдса Re : с увеличением скорости силы инерции, действующие в потоке, прева-



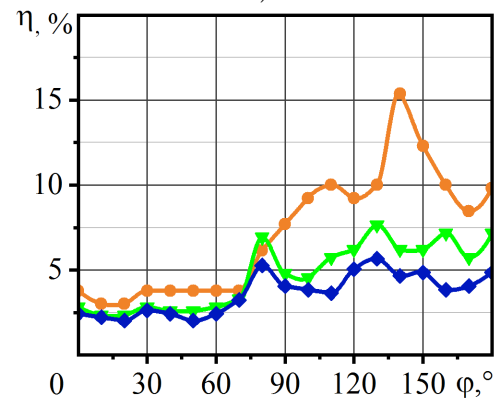
а)



б)



в)



г)

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

Рисунок 13 — Зависимость интенсивности пульсаций местного числа

Нуссельта от угла поворота цилиндра для разных углов атаки:

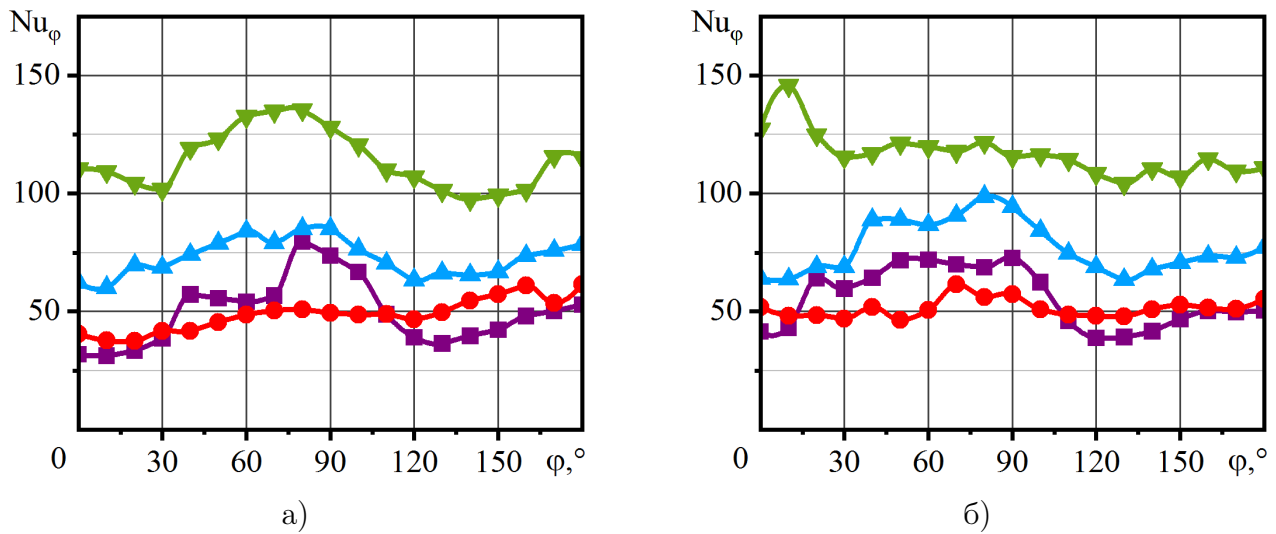
а – $\beta = 90^\circ$; б – $\beta = 75^\circ$; в – $\beta = 60^\circ$; г – $\beta = 45^\circ$

лируют над силами вязкости. Угол атаки β не влияет ни на распределение среднего числа Нуссельта, ни его пульсаций вплоть до угла отрыва. Далее возникают местные экстремумы интенсивности, скорее всего, связанные с изменением структуры течения и взаимодействия оторвавшихся вихрей с поверхностью цилиндра.

При повороте цилиндра на углы $\beta = 80 \dots 50^\circ$ интенсивность снижается в 2 раза; средний уровень пульсаций также снижается. При увеличении скорости до соответствующей числу Рейнольдса $Re = 26 \cdot 10^3$ влияние угла β ослабевает.

Затем рассмотрено обтекание двух цилиндров. На рисунке 14 показаны кривые КТО для различных режимов при фиксированном расстоянии меж-

ду цилиндрами S (расстояние рассчитывается между ближайшими точками цилиндров, а не между их осями) и для различных режимов.



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 14 — Распределение местного числа Нуссельта по второму цилиндру: а – $S = d$; б – $S = 2d$

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 15.

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 $S = d$ наблюдается во всех исследуемых режимах. 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 механизм взаимодействия сошедших с первого цилиндра вихрей и второго цилиндра сохраняется для низких Re (10^3 и ниже). Ход кривой для $Nu=f(\varphi)$ $Re = 20,2 \cdot 10^3$ имеет вид затухающих гармонических колебаний, а линия $Nu=f(\varphi)$ при $Re = 28,8 \cdot 10^3$

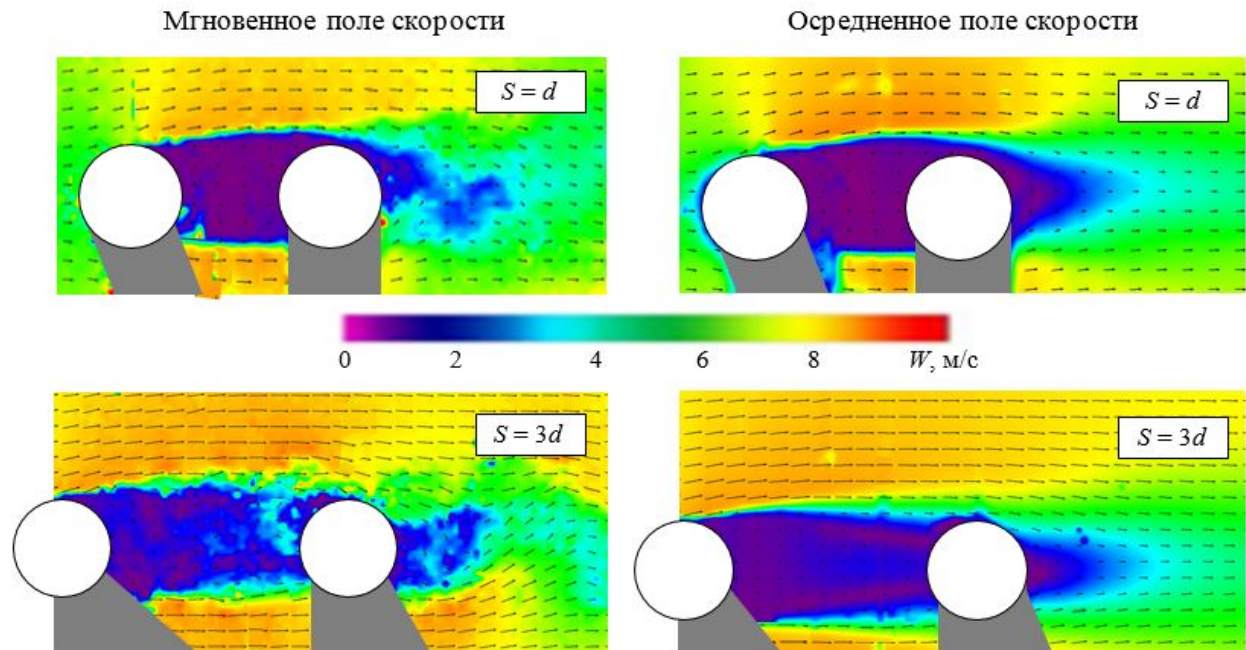
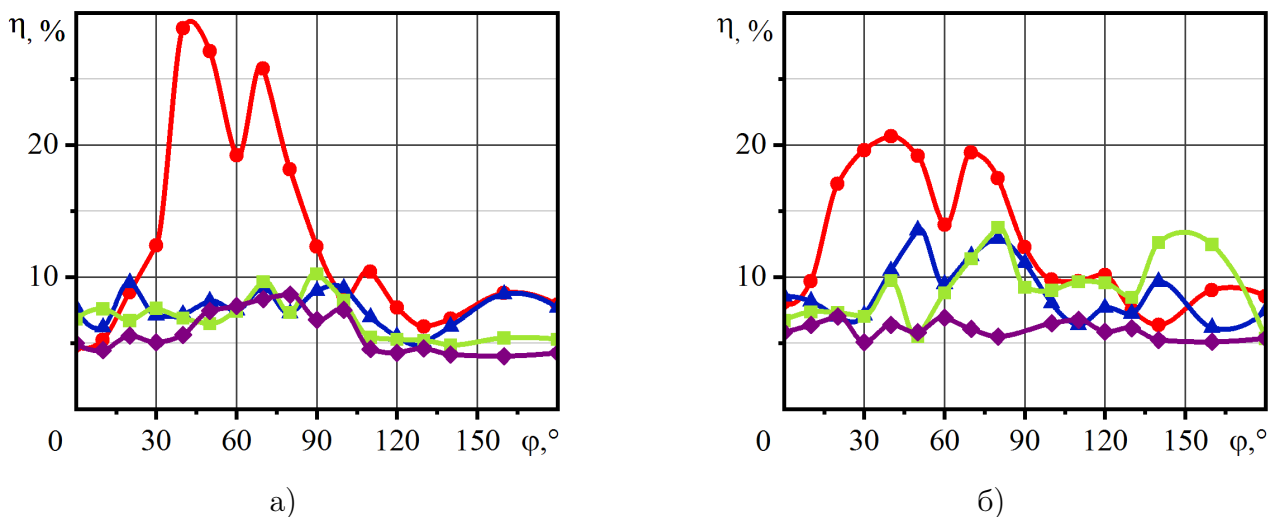


Рисунок 15 — Визуализация течения вблизи пары цилиндров при $Re = 9600$

практически становится прямой, за исключением пика вблизи лобовой образующей. Наиболее чувствительно к режиму оказывается расстояние $S = 2d$.

По аналогии с предыдущим разделом, на рисунке 16 представлены кривые СКО местного числа Нуссельта на поверхности второго цилиндра. Для нормировки здесь также использована величина $\sqrt{Re}$.



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 16 — Распределение СКО числа Нуссельта по второму цилиндру:

а – $S = d$; б – $S = 2d$

Распределение пульсаций КТО по поверхности второго цилиндра отличается от такового для первого (или одиночного) как по форме, так и по уровню. Наибольшие пульсации совпадают с областью повышения КТО, а их уровень может достигать 25...30 % для низких чисел Рейнольдса Re . Визу-

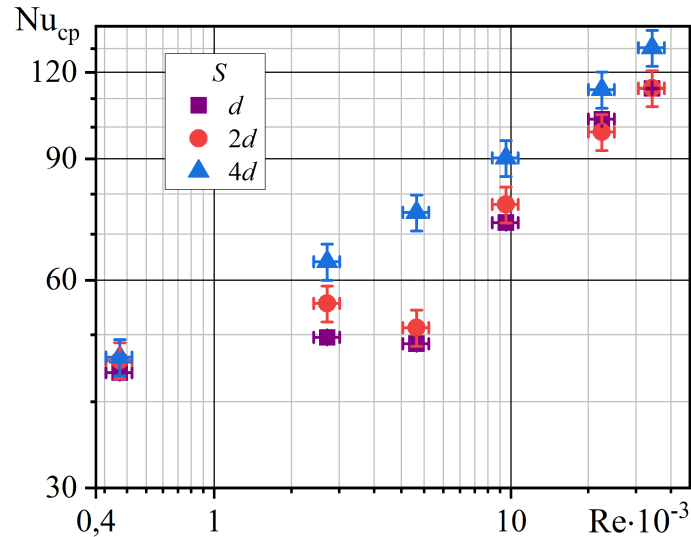
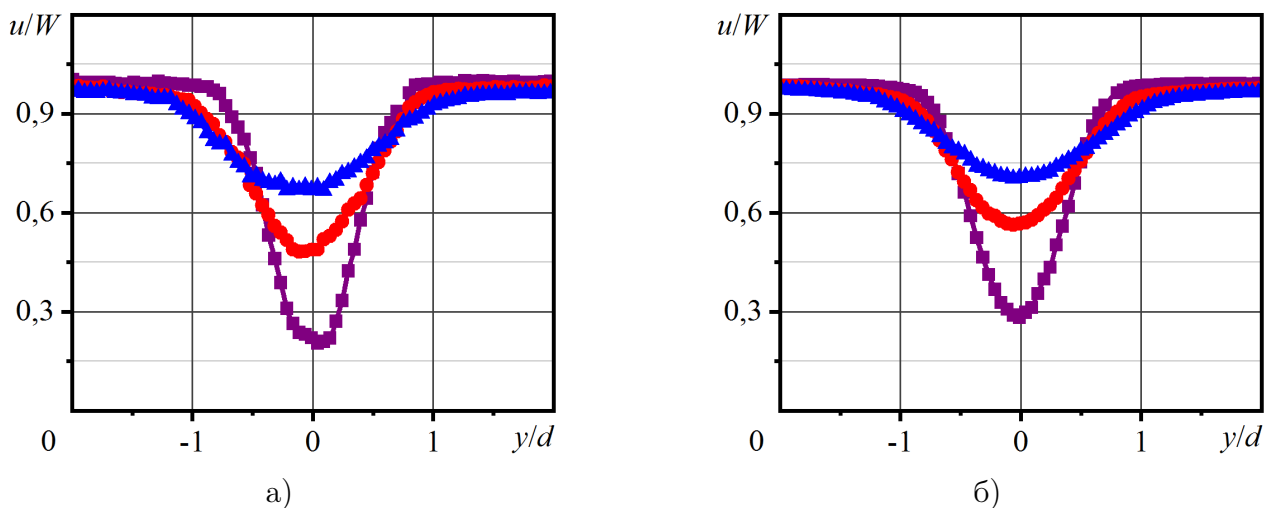


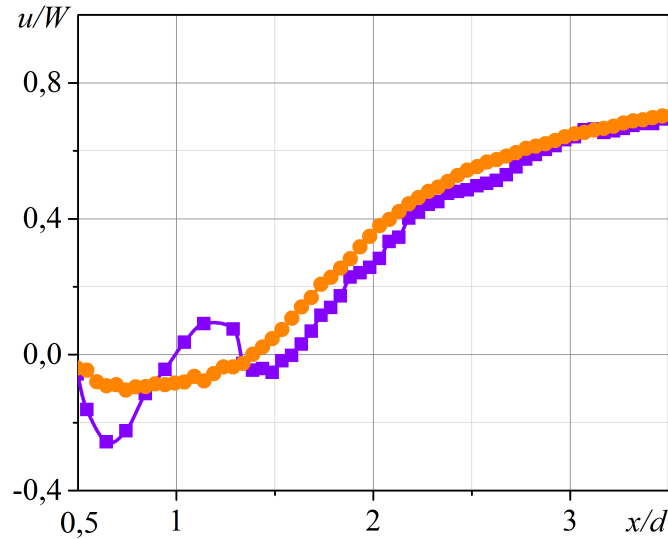
Рисунок 17 — Зависимость осредненного по поверхности числа Нуссельта от режима обтекания

ализация течения (рисунок 15) показывает, что именно в этой области вихрь взаимодействует с поверхностью второго цилиндра. При увеличении скорости воздушного потока профиль интенсивности пульсаций местного КТО по поверхности второго цилиндра выравнивается.



синяя линия — $x/d = 0,5$; красная линия — $x/d = 1$; фиолетовая линия — $x/d = 2$

Рисунок 18 — Распределение продольной скорости u в следе за вторым цилиндром при $S = 2d$: а — $S = d$; б — $S = 2d$; в — $S = 4d$



оранжевая линия – $Re = 4,8 \cdot 10^3$, фиолетовая линия – $Re = 20,2 \cdot 10^3$

Рисунок 19 — Распределение продольной скорости u
в следе за вторым цилиндром

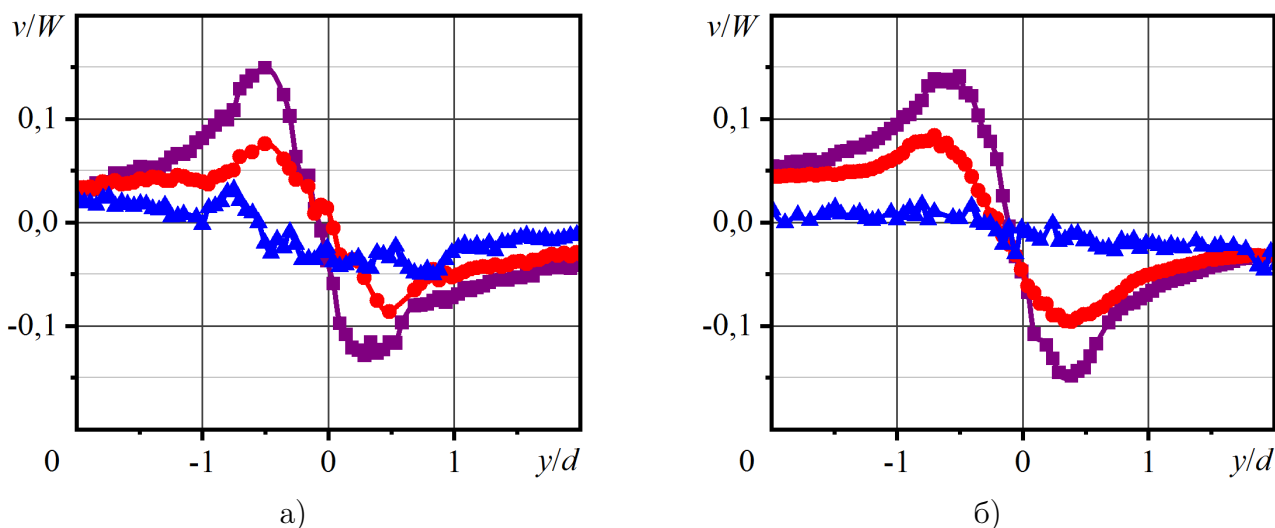
На рисунке 17 представлены экспериментальные точки зависимости $Nu(Re)$ для осредненного по поверхности второго цилиндра КТО.

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

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 18 и 19 показаны изменения продольной скорости u в следе на различном расстоянии от второго цилиндра.

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 19).

Ход кривой для $Re = 4,8 \cdot 10^3$ отличается от полученной для одиночного цилиндра кривой: наблюдается два местных минимума и один максимум. Более того, функция $u = u(x)$ несколько раз меняет знак вблизи второго цилиндра. Кривая для режима $Re = 20,2 \cdot 10^3$ совпадает по форме с кривыми, полученными в главе 3, для одиночного цилиндра. Однако область отрицательных значений u значительно уже; длина рециркуляционного пузыря $L = 0,94d$.



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

Рисунок 20 — Распределение поперечной скорости v в следе за вторым цилиндром при $S = 2d$: а – $S = d$; б – $S = 2d$

На рисунке 20 представлены зависимости поперечной составляющей скорости v в тех же сечениях, что и на рисунке 18.

Зона рециркуляции за вторым цилиндром в 1,5...2 раза короче и несколько шире. Чувствительность течения к режиму в следе за вторым цилиндром выражена сильнее, чем для одиночного цилиндра.

Обработка данных, представленных на рисунке 17 позволила получить уравнения подобия для теплообмена на поверхности второго цилиндра, которые совмещены в виде таблицы 1.

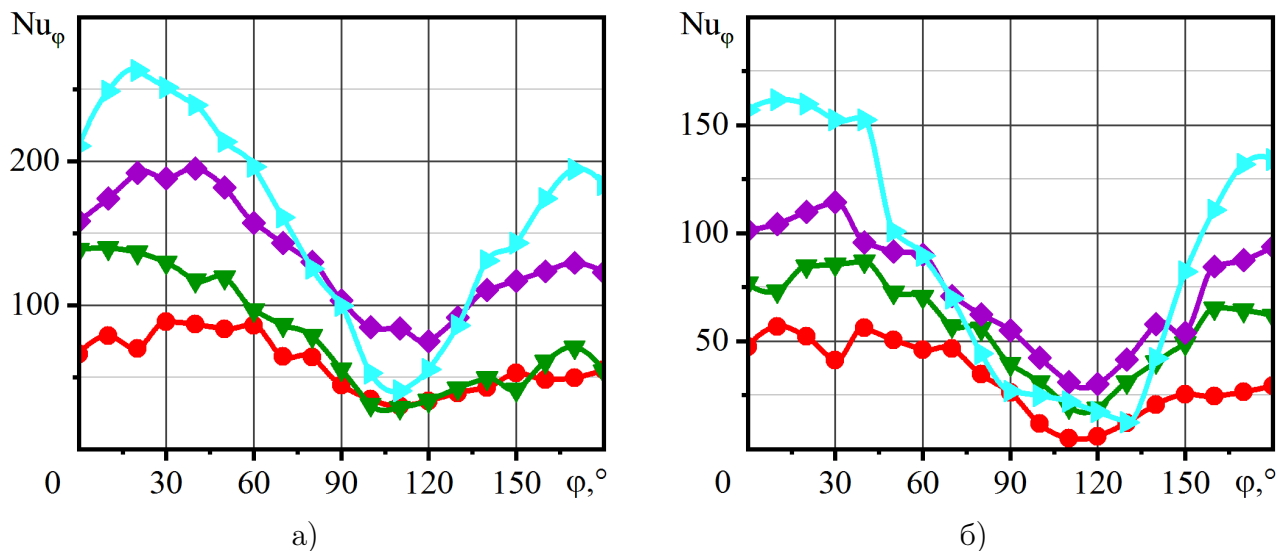
Обобщая результаты, полученные с помощью PIV, можно сказать, что область рециркуляции в за вторым цилиндром 1,5...2 раза меньше в продольном направлении и несколько больше в поперечном по сравнению с одиночным. Чувствительность к режиму формы течения и длины L в следе за вторым цилиндром выражена сильнее, чем за первым.

Таблица 1 — Уравнения подобия для расчета среднего по поверхности второго цилиндра числа Нуссельта

Режим $Re \cdot 10^{-3}$	Расстояние S	Уравнение подобия
0,48...9,6	d	$Nu=32,3 \cdot Re^{0,05}$
10...29,8	d	$Nu=1,1 \cdot Re^{0,5}$
0,48...9,6	$2d$	$Nu=31,7 \cdot Re^{0,06}$
10...29,8	$2d$	$Nu=1,16 \cdot Re^{0,45}$
0,48...29,8	$4d$	$Nu=9,3 \cdot Re^{2,25}$

Рассмотрено в главе 4 и обтекание трех цилиндров. Распределения КТО по поверхности третьего цилиндра для разных режимов и при фиксированном расстоянии S , полученные с помощью градиентной теплометрии, представлены на рисунке 21.

Распределения КТО по поверхности третьего цилиндра для разных режимов и при фиксированном расстоянии S , полученные с помощью градиентной теплометрии, представлены на рисунке 21.



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 21 — Распределение местного числа Нуссельта

по третьему цилиндру: а – $S = d$; б – $S = 2d$

Характер распределения КТО вблизи третьего цилиндра напоминает, с небольшим отличием, те же зависимости, что и для одиночного цилиндра. 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 ($Re < 10^3$) КТО слабо возрастает 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 влияет на КТО и расстояние между цилиндрами S . При $S = d$ КТО наибольший во всем диапазоне режимов, причем, его уровень превосходит КТО для одиночного цилиндра. Однако при $S > 2d$ средней КТО падает ниже показателей для первого цилиндра.

Длина следа за третьим цилиндром слабо зависит от параметра S , но зона в следе, где продольная скорость ниже скорости свободного потока, шире такой же зоны за одиночным или вторым цилиндрами.

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

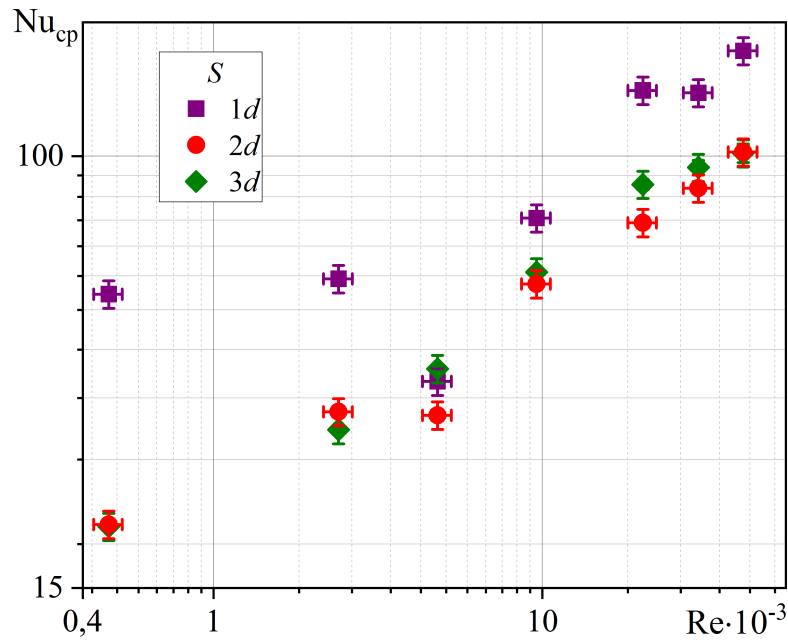


Рисунок 22 — Зависимость осредненного по поверхности числа Нуссельта от режима обтекания

Для расстояний $S = (1..2)d$ наблюдается минимум для числа Рейнольдса $Re = 5000$. Явление требует более детального изучения с меньшим шагом по параметру S и по скорости набегающего воздушного потока.

На рисунке 23 представлены поля скорости вблизи второго и третьего цилиндров при их рядном расположении. Видно, что картина течения за третьим цилиндром практически не зависит от расстояния S .

В заключении можно сказать, что наиболее эффективным для теплообмена на поверхности третьего цилиндра является расстояние $S = d$. Для некоторых режимов среднее по поверхности число Нуссельта может быть больше, чем для одиночного цилиндра. С увеличением расстояния S число Нуссельта снижается и становится меньше среднего значения по поверхности одиночного цилиндра, но для всех режимов и расстояний S среднее число Нуссельта по поверхности третьего цилиндра больше, чем для второго.

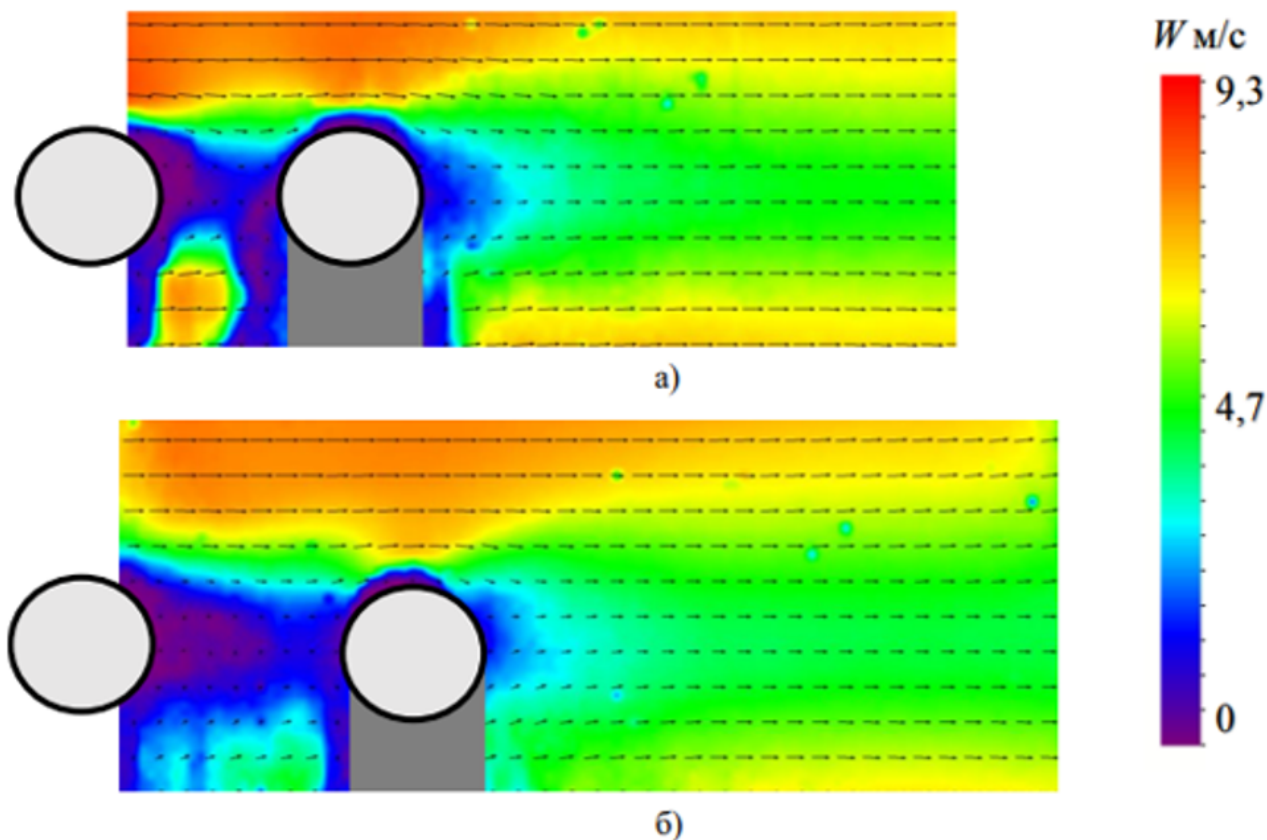


Рисунок 23 — Осредненные поля скоростей вблизи второго и третьего цилиндров при $Re = 9600$: а – $S = d$, б – $S = 2d$

Главу завершает описание серии опытов с использованием стержней-турбулизаторов в качестве интенсификаторов теплообмена.

Применение турбулизаторов в виде тонких стержней на одиночном цилиндре в работах Гусакова и др. (2015 – 2017) обосновывают монотонным снижением местного КТО вплоть до точки отрыва и наличием явного минимума. Авторы предлагают избежать этого минимума путем ускорения ламинарно-турбулентного перехода. В описанных работах показано, что применение стержней-турбулизаторов, уставленных на одиночном круговом цилиндре, позволяет повысить средний по поверхности КТО на 14...20 %.

Получив результаты распределения местного КТО по второму цилиндру, мы сочли установку турбулизаторов на втором цилиндре нецелесообразной. Установлено, что использование турбулизаторов на первом цилиндре слабо влияет на распределение КТО по поверхности второго цилиндра, а для некоторых режимов – турбулизаторы, установленные на первом цилиндре снижают средний КТО по второму цилиндру.

Получив распределения КТО по поверхности третьего цилиндра и увидев сходство с распределением КТО для одиночного цилиндра, мы решили установить турбулизаторы на поверхность третьего цилиндра. Предложено применить используемые в ранних работах стержни толщиной $d_T = 1,2$ мм и разнести их на угол $\psi = 55^\circ$. Стержни-турбулизаторы устанавливались на первом и третьем цилиндрах, установленных в ряд. В качестве примера на рисунке 24 представлены распределения местных КТО по поверхности третьего цилиндра при использовании стержней-турбулизаторов.

При $S = d$ турбулизаторы практически не влияют на течение теплообмен. Для малых чисел Рейнольдса влияние турбулизаторов негативное: средний КТО по сравнению с гладкими цилиндрами снижается. При $Re = 9600$ распределение КТО сходно с распределением по второму гладкому цилиндру: явные экстремумы отсутствуют.

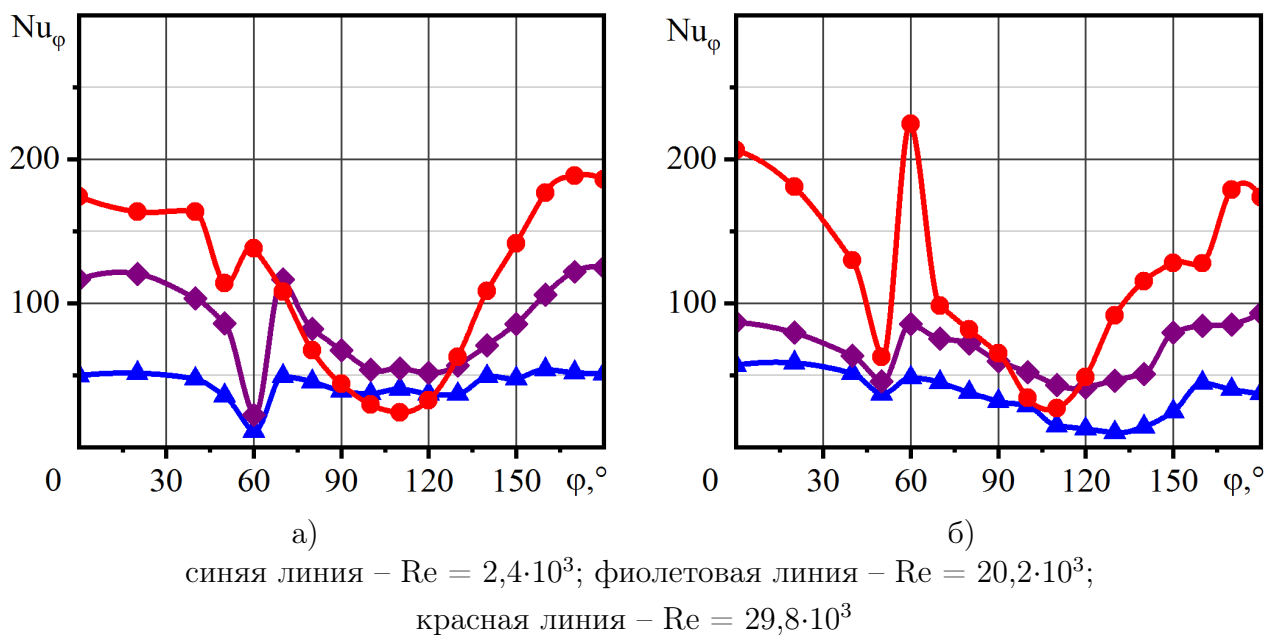


Рисунок 24 — Распределение местного числа Нуссельта по поверхности третьего цилиндра с установленными стержнями-турбулизаторами для:

$$a - S = 2d; \quad б - S = 3d$$

Зависимость местного КТО от расстояния S и режима течения Re сохраняется. При $S = d$ и $Re = 20200$ турбулизаторы практически не влияют на картину течения и, как следствие, на теплообмен. Для малых чисел Рейнольдса влияние турбулизаторов негативное: средний КТО по сравнению с одиночным цилиндром снижается. При $Re = 9600$ распределение КТО сходно

с распределением по второму гладкому цилиндру явные экстремумы отсутствуют.

Обобщая результаты интенсификации теплообмена можно сделать вывод, что использование двух стержней, симметрично разнесенных относительно лобовой образующей, уставленных на первом и третьем цилиндрах, позволило повысить средний по трем цилиндрам, установленным в ряд, на 6...12 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Верифицирована на примере одиночного цилиндра и системы цилиндров, расположенных в ряд, методика, объединяющая градиентную теплометрию и PIV.
2. Экспериментально подтверждена картина обтекания одиночного цилиндра при числе Рейнольдса, равном 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. Выявлены пики мощности на спектре пульсаций числа Нуссельта при различных азимутальных углах на поверхности цилиндра. Характеристики спектра связаны с особенностями вихреобразования, установленными PIV.
5. Исследованы и объяснены картина течения и теплообмена при поперечном и косом обтекании нагретого цилиндра. Выявлено влияние угла атаки на пульсационные характеристики.
6. 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.

7. Получены уравнения подобия для теплообмена на поверхности второго и третьего цилиндра при различном шаге установки и для различных режимов течения.
8. 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.
9. Показаны особенности нестационарного теплообмена, связанные с действием стержней-турбулизаторов на первом и третьем цилиндрах, расположенных в ряд.

Основные научные публикации по теме диссертации

В рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК:

1. А. А. Гусаков, М. А. Греков. **В. В. Сероштанов**. Исследование обтекания и теплообмена на поверхности одиночного кольцевого ребра. 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. Mityakov A., Mityakov V., Sapozhnikov S., Gusakov A., Bashkatov A., **Seroshtanov V.**, Zainullina E., Babich A. Hydrodynamics and heat transfer of yawed circular cylinder. International Journal of Heat and Mass Transfer Том, V. 115, pp. 333 - 339.
2. Mityakov A., Babich A., Bashkatov A., Gusakov A., Dymkin A., Zainullina E., Sapozhnikov S., Mityakov V., **Seroshtanov V.**.. Investigating heat transfer augmentation using gradient heat flux measurement and PIV method. MATEC Web of Conferences, V. 11510, July 2017.
3. 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. Comprehensive study of flow and heat transfer at the surface of circular cooling fin. Journal of Physics: Conference Series, V. 891, No. 110, November 2017.

4. Sapozhnikov S. Z., Mityakov V. Y., Mityakov A. V., Gusakov A. A., Grekov M. A., **Seroshtanov V. V.** Investigation of flow and heat transfer at the surface of a single circular cooling fin. International Journal of Engineering and Technology (UAE), V. 7, No. 4, pp. 33 - 36
5. 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. Heat flux measurements in heat transfer study. International Heat Transfer Conference, 2018-August, pp. 8678 - 8685 (16th International Heat Transfer Conference, IHTC 2018, Beijing, 10 August 2018 - 15 August 2018).
6. Mityakov V., Gusakov A., **Seroshtanov V.**, Grekov M.. Investigation of flow and heat transfer at the circular fins. MATEC Web of Conferences, V. 2455, 2018.
7. Sapozhnikov S. Z., Mityakov V. Y., Gusakov A. A., **Seroshtanov V. V.**, Subbotina V. V.. Experimental determination of circular fin effectiveness. Journal of Physics: Conference Series, V. 1382, No. 128, November 2019.
8. Mityakov V., **Seroshtanov V.**, Vlasov A., Suchok V., Bobylev P., Zhidkov N.. Heat transfer and air flow near a pair of circular cylinders. E3S Web of Conferences, V. 14018, 2019.
9. Sapozhnikov S. Z., Mityakov V. Yu., **Seroshtanov V. V.**, Gusakov A. A.. The combination of PIV and heat flux measurement in study of flow and heat transfer near a circular finned cylinder. Journal of Physics: Conference Series, V. 1421, No. 130, December 2019.
10. **Seroshtanov V. V.**, Gusakov A. A., Grekov M. A.. Multi-method research of flow and heat transfer for the tube with circular fins. Journal of Physics: Conference Series, V. 1565, No. 128, July 2020.
11. 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.. Gradient heatmetry advances. Energies, V. 13, No. 231, December 2020.

12. Guzeev A. S., Sapozhnikov S. Z., Mitiakov V. Yu., **Seroshtanov V. V.**, Suchok V. V., Vlasov A. S., Zhidkov N. A.. Features of vortex formation and heat transfer during cross flow around two cylinders. Journal of Physics: Conference Series, V. 1683, No. 223, December 2020
13. **Seroshtanov V. V.**, Vlasov A. S., Suchok V. V., Zhidkov N. A.. Features of flow and heat transfer near a pair of circular cylinders. Journal of Physics: Conference Series, V. 1867, No. 119, April 2021.