

На правах рукописи



**ГУСАКОВ АНДРЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ**

**ТЕЧЕНИЕ И ТЕПЛООБМЕН ПРИ ОБТЕКАНИИ ЦИЛИНДРА:  
СОВМЕЩЕНИЕ PIV-МЕТОДА И ГРАДИЕНТНОЙ ТЕПЛОМЕТРИИ**

Специальность 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2015

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» на кафедре «Теоретические основы теплотехники».

Научный руководитель **Митяков Владимир Юрьевич**,  
доктор технических наук, доцент,  
ФГАОУ «СПбПУ», профессор кафедры  
«Теоретические основы теплотехники».

Официальные оппоненты **Свиридов Валентин Георгиевич**,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГАОУ «МЭИ (ТУ)», профессор кафедры  
инженерной теплофизики.

**Митропов Владимир Викторович**,  
кандидат технических наук, ФГАОУ  
«ИТМО», тьютор кафедры теоретических  
основ тепло- и хладотехники.

Ведущее предприятие ФГБОУ ВПО «Казанский национальный  
исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева – КАИ».

Защита диссертации состоится 22 декабря 2015 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.06 в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, Главное здание, ауд. 118. С диссертацией можно ознакомиться на сайте [www.spbstu.ru](http://www.spbstu.ru) и в библиотеке СПбПУ.

Ваши отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д.29, СПбПУ, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.229.06.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 г.

Ученый секретарь  
Диссертационного совета, к.т.н. доцент



В.А. Талалов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Создание, применение и совершенствование теплообменников требует исследовать течение и теплообмен вблизи теплопередающих поверхностей. Неразрывная связь обоих процессов делает актуальными любые попытки наблюдать их и характеризовать количественно в реальном времени. Этому, однако, мешает малочисленность либо отсутствие современных измерительных средств – в первую очередь, быстродействующих малогабаритных датчиков. При бурном развитии цифровых технологий для обработки сигнала отставание парка датчиков становится ключевой проблемой теплофизического эксперимента.

Направление настоящего исследования, в первую очередь, методическое: создать и апробировать схему совместного и независимого исследования течения и теплообмена. Такой подход требуется для реализации комплексной и достаточно узкой области, где имеются надежные и общедоступные данные, а также можно получить новые полезные результаты.

В этом качестве выбрана задача обтекания кругового цилиндра – как элемента, присутствующего в большинстве теплообменников. Гладкий круговой цилиндр является исходной моделью во многих попытках интенсифицировать теплообмен путем нанесения лунок, рельефа, применения турбулизаторов и т.п. – в первую очередь, при создании компактных энергоэффективных и надежных теплообменников различного назначения.

В работе развивается мысль о совмещении преимуществ современной и хорошо развитой PIV - диагностики течений с возможностями – новыми и во многом уникальными – градиентной теплотометрии, каковая активно развивается в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого с 1996 года по настоящее время.

**Цель работы.** Целью диссертации является совместное

использование PIV - метода и градиентной теплотметрии для исследования течения и теплообмена при обтекании кругового цилиндра (гладкого и с турбулизаторами) в различных геометрических условиях и при различных гидродинамических режимах.

**Основные задачи диссертационной работы.** Достижение поставленной цели требует:

- 1) Реализовать, усовершенствовать и апробировать методику совместного применения PIV - технологий и градиентной теплотметрии.
- 2) Получить результаты в традиционной постановке опытов и сопоставить их с общепризнанными данными литературных источников.
- 3) Дать трактовку, полную или предварительную, наблюдаемым эффектам.
- 4) Исследовать обтекание цилиндра со стержнями - турбулизаторами и показать возможности экспериментального подхода к оптимизации исследуемого объекта.
- 5) Оценить метрологические характеристики и достоверность предлагаемого подхода.

**Научная новизна** работы заключается в том, что:

- впервые в трехмерной постановке и реальном времени совместно исследуется обтекание кругового цилиндра (под различными углами атаки, в разных гидродинамических режимах) и теплообмен на его поверхности;
- получены новые данные об интенсификации теплообмена на поверхности цилиндра с помощью стержней - турбулизаторов, даны рекомендации по выбору геометрических параметров такой системы;
- получены частотные характеристики для местной плотности теплового потока, позволяющие верифицировать результаты численного моделирования.

**Достоверность и обоснованность** научных положений определяется:

- использованием PIV - методики и градиентной теплотметрии – двух технологий, получивших признание у широкого круга специалистов и

многократно апробированных при решении (раздельном и независимом) сходных задач теплофизического эксперимента;

- применением современных и аттестованных средств обработки и регистрации сигналов, оценкой метрологических показателей эксперимента в соответствии с российским и международным стандартами;

- сопоставлением и удовлетворительным соответствием полученных результатов данным, содержащимся в надежных и получивших признание источниках;

- получением уравнений подобия, близких по структуре и значениям эмпирических констант к тем, которые приняты в современной расчетной практике.

**Практическая значимость** работы состоит в том, что предложен новый подход и инструментарий для исследования процессов течения и теплообмена в лабораторном и промышленном эксперименте. Кроме того, усовершенствован способ интенсификации теплообмена с помощью проволок - турбулизаторов.

**Автор защищает:**

- методический подход, позволяющий совместное изучение обтекания и теплообмена в режиме реального времени;

- методику и аппаратуру для исследования течения и теплообмена при обтекании цилиндра, полученные при совместном применении PIV - технологии и градиентной теплометрии;

- новые результаты, полученные при экспериментах на гладком круговом цилиндре и цилиндре со стержнями - турбулизаторами.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих семинарах и конференциях:

- 1) VIII школе-семинаре молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова «Проблемы теплообмена и гидродинамики в энергомашиностроении» (Казань, 2014);

- 2) IV Международной интерактивной научно-практической

конференции «Инновации в материаловедении и металлургии» Уральский федеральный университет (Екатеринбург, 2015);

3) XXXI Всероссийской конференции «Сибирский теплофизический семинар» (Новосибирск, 2014);

4) VI Российской национальной конференции по теплообмену (Москва, 2014);

5) заседаниях кафедры «Теоретические основы теплотехники» СПбПУ (Санкт-Петербург, 2012 – 2015);

6) международной конференции «AEROTECH-5» (Куала Лумпур, Малайзия, 2014).

**Личный вклад.** Соискатель участвовал в формировании темы исследования, предложил схему экспериментального стенда, реализовал свои предложения и получил надежные результаты; участвовал в обсуждении и предложил трактовку наблюдаемых закономерностей; оптимизировал систему интенсификации со стержнями - турбулизаторами; обобщил и систематизировал результаты исследований.

**Публикации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 11 печатных работах объемом 4 п.л.

**Объем работы:** 137 страниц основного текста, 87 рисунков, 6 таблиц, 2 приложения. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, приложений и списка литературы, включающего 89 наименований.

Значительная часть работы выполнялась при поддержке и в рамках грантов РФФИ 13-08-00887А и 15-08-03945А.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** обоснован выбор темы диссертации; указано, что именно совместное исследование течения и теплообмена даёт достаточно полные и достоверные сведения о физической природе обоих процессов.

Указано общее направление диссертационной работы, сформулированы её актуальность, научная новизна и практическая ценность.

**В главе 1** представлен выбор исследуемой модели, геометрических и режимных параметров эксперимента. Выполнен обзор литературных источников, посвящённых обтеканию кругового цилиндра и теплообмену на его поверхности; особое внимание уделено работам М.В. Кирпичёва, А.С. Синельникова и А.С. Чащихина, А.А. Гухмана, Л.М. Моложен, А.А. Жукаускаса, С.З. Сапожникова, В.Ю. Митякова, А.В. Митякова, Э. Ахенбаха, Э. Спэрроу и А.А. Янес Морено, Д.А. Камински и др., Х. Накамура и Т. Игараши, Р. Джордано и др., Р.У. Влезие и Дж.Л. Уэя, А.Р. Хэнсона, М. Хора и др., А. Гатто и др., А. Фейджа и К. Уорсэпа. Кратко описаны основные технологии диссертации: PIV - метод и градиентная теплометрия, а также методы и результаты исследования частотных характеристик. Даны краткие сведения об интенсификации теплообмена с помощью проволок - турбулизаторов.

**Глава 2** посвящена методике и технике эксперимента. Автор использует принципы и технологические средства градиентной теплометрии – нового направления, основанного на применении градиентных датчиков теплового потока (ГДТП). Их действие основано на поперечном эффекте Зеебека; сигнал ГДТП определяется как произведение его вольт-ваттной чувствительности  $S_0$  на площадь  $F$  и на плотность теплового потока  $q$ :

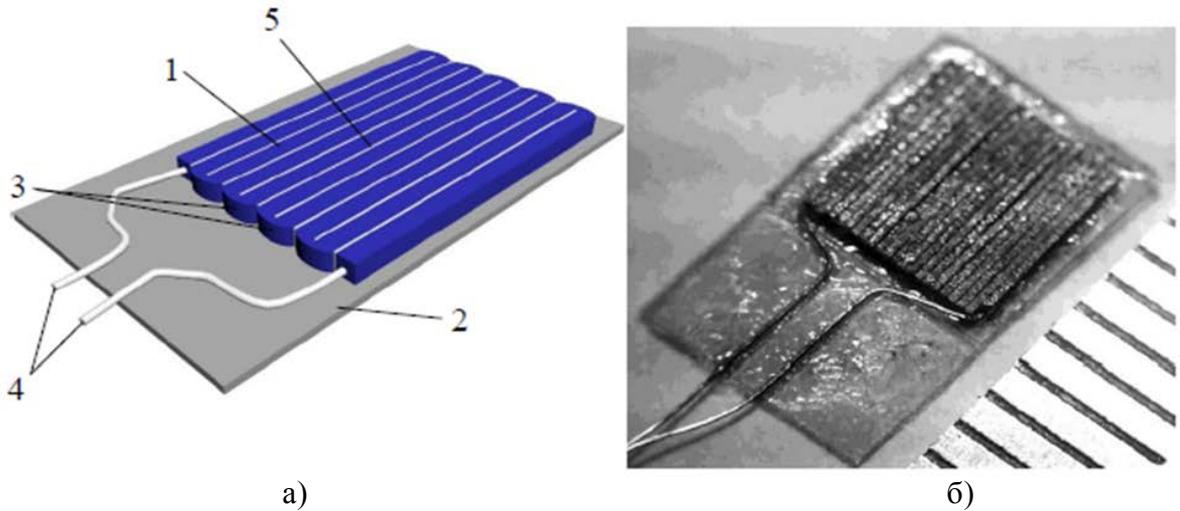
$$E_{\perp} = S_0 \cdot F \cdot q.$$

ГДТП обладают уникальным быстродействием: их постоянная времени имеет порядок  $10^{-8} \dots 10^{-9}$  с. В работе использованы ГДТП на основе монокристаллов висмута (рисунок 1).

Кратко описаны PIV-методика исследования, комплекс ПОЛИС производства ИТФ СО РАН (г. Новосибирск) и аэродинамическая труба кафедры «Теоретические основы теплотехники» ФГАОУ ВО СПбПУ.

Представлена разработанная соискателем модель цилиндра (рисунок 2). Цилиндр выполнен из стального листа толщиной 0,1 мм.

Электрический привод позволяет проворачивать его вокруг оси на угол  $\pm 180^\circ$ ; угол обтекания воздушным потоком  $\beta$  можно изменять в пределах  $90 \dots 45^\circ$ . Цилиндр обогревается насыщенным водяным паром; температура его поверхности близка к  $100^\circ\text{C}$ . ГДТП, заделанный заподлицо с поверхностью, фиксирует местную плотность теплового потока при различных углах поворота.



Числами обозначены: 1 – анизотропный термоэлемент; 2 – подложка из слюды;  
3 – спаи из чистого висмута; 4 – токовыводы; 5 – лавсановые прокладки  
Рисунок 1 – ГДТП на основе анизотропного висмута: а – схема, б – общий вид

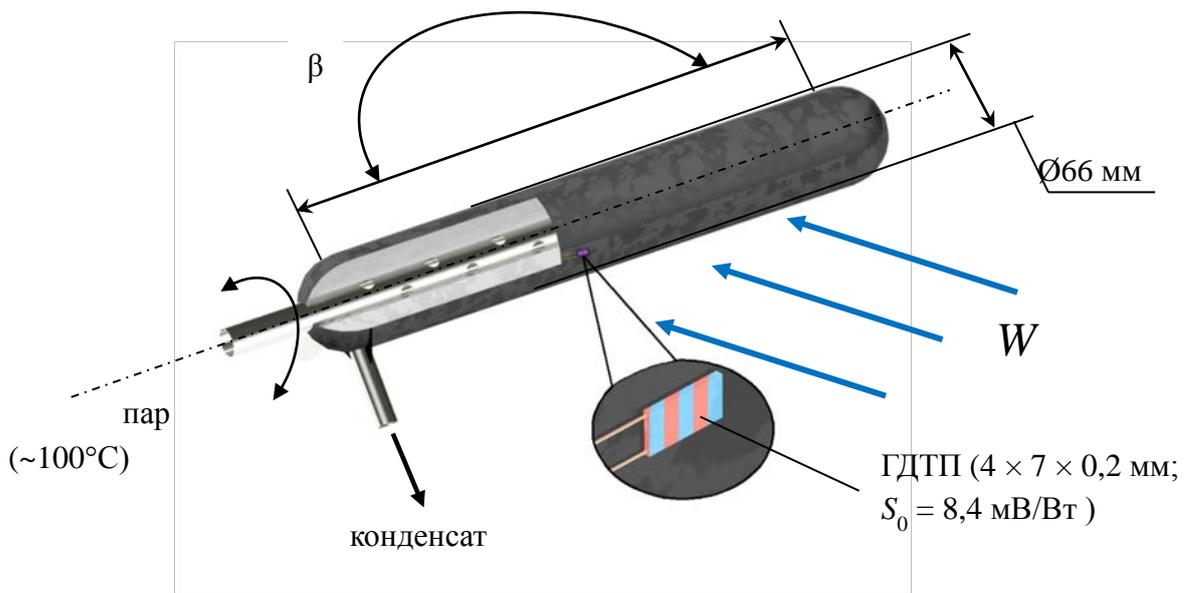


Рисунок 2 – Модель кругового цилиндра (схема)

Для визуализации трехмерного обтекания цилиндра в работе использовался метод стерео - PIV, схема которого представлена на рисунке 3.

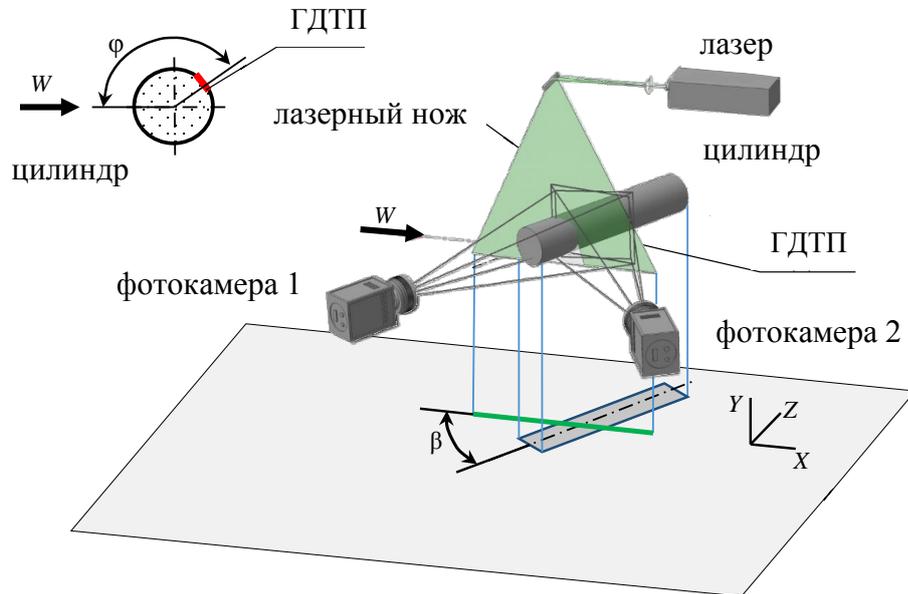


Рисунок 3 – Схема стере-PIV диагностики при обтекании цилиндра

Исследования проводились для области чисел Рейнольдса от  $10^4$  до  $8 \cdot 10^5$ . При этом цилиндр проворачивался, и положение закрепленного на его поверхности ГДТП менялось от  $\varphi = 0^\circ$  в лобовой точке до  $\varphi = 180^\circ$  в кормовой. За время каждого такого поворота синхронно произведено и зафиксировано 485 пар фотографий и значений сигналов ГДТП. На основании этих данных получены поля скорости и соответствующие им значения местной плотности теплового потока.

Блок-схема экспериментальной установки представлена на рисунке 4.

По команде блока синхронизации лазер производит двойную вспышку, фотокамеры 1 и 2 фиксируют трассеры, а фотокамера 3 записывает измеряемый светолучевым осциллографом сигнал ГДТП. Для измерения сигнала ГДТП используется модернизированный светолучевой осциллограф Н-145. Данные с камер передаются для обработки в компьютер.

Опыт производился в аэродинамической трубе при поперечном

обтекании нагретого цилиндра потоком воздуха в диапазоне скоростей 1...20 м/с. Степень турбулентности не превышала 0,5%. Модель помещалась в камеру Эйфеля из прозрачного материала, что позволяло использовать PIV - технологию без заметного рассеяния дыма. Визуализация течения и теплотметрия проводились одновременно и непрерывно.

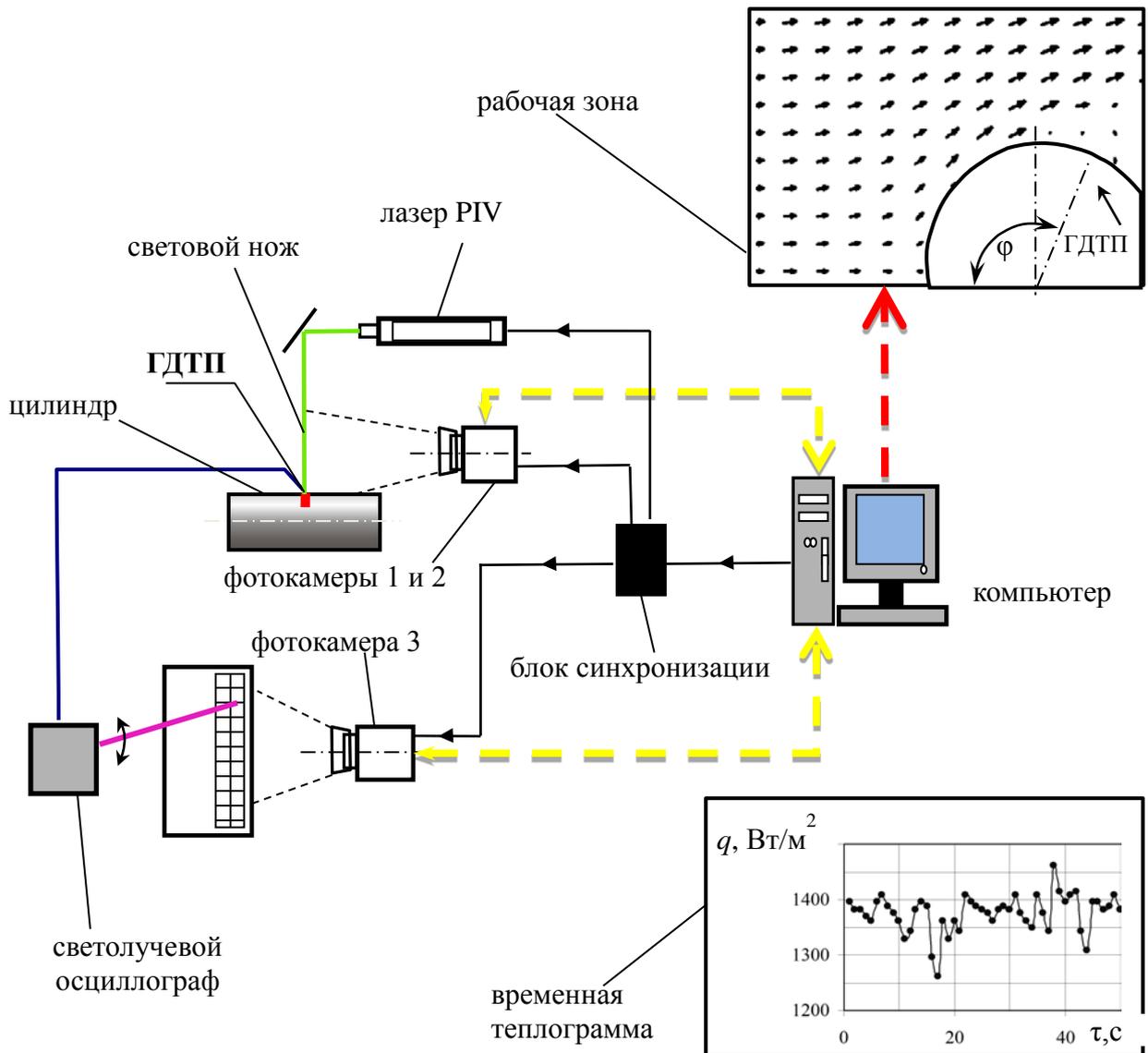


Рисунок 4 – Блок-схема экспериментальной установки

При PIV - диагностике, связанной с обтеканием нагретой модели, выявился ряд сложностей.

Дым, генерируемый штатным устройством комплекса ПОЛИС, не позволял получить картину течения вблизи поверхности, поскольку

взвешенные масляные трассеры диаметром 1..5 мкм над нагретой поверхностью успевали испаряться.

В качестве трассеров мы использовали частицы древесного дыма из дымара пасечника; чтобы дым не рассеивался за пределы воздушного тракта, аэродинамическую трубу снабдили камерой Эйфеля.

Кроме того, лазерный луч, отражаясь от поверхности цилиндра, засвечивал матрицу фотокамеры. Это не позволяло увидеть течение вблизи пограничного слоя.

Для борьбы с бликами от лазерного луча цилиндр был обработан смесью индустриального масла, спирта и флюорисцида «родамин Ж», который при отражении менял длину волны падающего луча. Отраженный свет фильтровался узкополосным зеленым фильтром.

Штатный лазер комплекса ПОЛИС оказался источником электромагнитных помех, не позволяющих преобразовать малые сигналы ГДТП даже вполне современному АЦП-преобразователю фирмы National Instruments (США). Для измерения сигнала ГДТП был использован светолучевой осциллограф Н-145, в котором ртутная лампа была заменена на лазер. Его луч после отражения от зеркала гальванометра фиксировался цифровой фотокамерой, а далее сигнал поступал для обработки в компьютер. Магнитное поле, в котором находился гальванометр осциллографа, избавило от всех электромагнитных помех, присутствовавших в помещении.

В дальнейшем планируется перейти на ГГДТП (гетерогенные градиентные датчики теплового потока) из композиции кремний – алюминий. Их сигнал гораздо мощнее, поэтому, предположительно, удастся использовать многоканальный цифровой измерительный тракт, и, как результат, записать одновременно сигналы нескольких датчиков.

PIV - диагностика выполнялась по существующим методикам, и её результаты представлены в работе вполне стандартно: третья координата скорости изображена цветом.

При градиентной теплотметрии определялась:

1) Местная плотность теплового потока в точке с угловой координатой  $\varphi$

$$q_{\varphi} = \frac{E}{S_0 F},$$

где  $E$  – сигнал ГДТП, мкВ;  $S_0$  – вольт - ваттная чувствительность датчика, мВ/Вт;  $F$  – площадь датчика в плане, мм<sup>2</sup>.

2) Местный коэффициент теплоотдачи

$$\alpha_{\varphi} = \frac{q_{\varphi}}{(T_f - T_w)},$$

где  $T_w$  – температура поверхности цилиндра, °С;  $T_f$  – температура потока воздуха, °С.

3) Местное число Нуссельта

$$\text{Nu}_{\varphi} = \frac{\alpha_{\varphi} d}{\lambda_f},$$

где  $d$  – диаметр цилиндра, м;  $\lambda_f$  – теплопроводность воздуха, Вт/(м·К).

4) Среднее число Нуссельта

$$\text{Nu} = \frac{\alpha d}{\lambda_f},$$

где  $\alpha$  – значение  $\alpha_{\varphi}$ , усредненное по  $\varphi$  в пределах от 0°...180°.

5) Число Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{W \cdot D}{\nu},$$

где  $D$  – диаметр цилиндра, м;  $W$  – скорость набегающего потока, м/с;  $\nu$  – кинематическая вязкость воздуха, м<sup>2</sup>/с.

**В главе 3** представлены результаты, полученные при обтекании гладкого кругового цилиндра, а также цилиндра с проволоками - турбулизаторами. Здесь же приведены результаты термоанемометрии.

Исследования охватывают обтекание цилиндра потоком, нормальным к его оси ( $\beta = 90^\circ$ ), и обтекание под острым углом к оси ( $90^\circ > \beta > 45^\circ$ ). Раздельно выполнены опыты по обтеканию цилиндра, нагретого до 100 °С, и

цилиндра без нагрева, температура которого практически равнялась температуре воздуха в набегающем потоке. Для выявления концевых эффектов исследовались модели цилиндров диаметром 66 мм и длиной 600 мм ( $L/d = 9,1$ ) и диаметром 18 мм и длиной 900 мм ( $L/d = 50$ ). В ходе опытов анализировались параметры течения (PIV - диагностика) и теплообмена (градиентная теплометрия); дополнительно исследовалось течение в следе за цилиндром. Число Рейнольдса в различных сериях опытов менялось в пределах 10150...78800.

В каждом опыте модель проворачивалась вокруг оси с постоянной скоростью, делая за время наблюдения половину оборота: от  $\varphi = 0^\circ$  до  $\varphi = 180^\circ$ . При этом непрерывно и синхронно записывались параметры обтекания и (в случае нагретого цилиндра) теплообмена. За время эксперимента удавалось получить 485 мгновенных полей скорости и значений местного теплового потока. Таким образом, каждой картине мгновенного поля скорости соответствовало показание ГДТП при известном его положении. Зависимость плотности теплового потока от времени («временная теплограмма») при повороте модели с малой скоростью заменяется на термин «угловая теплограмма» (рисунок 5).

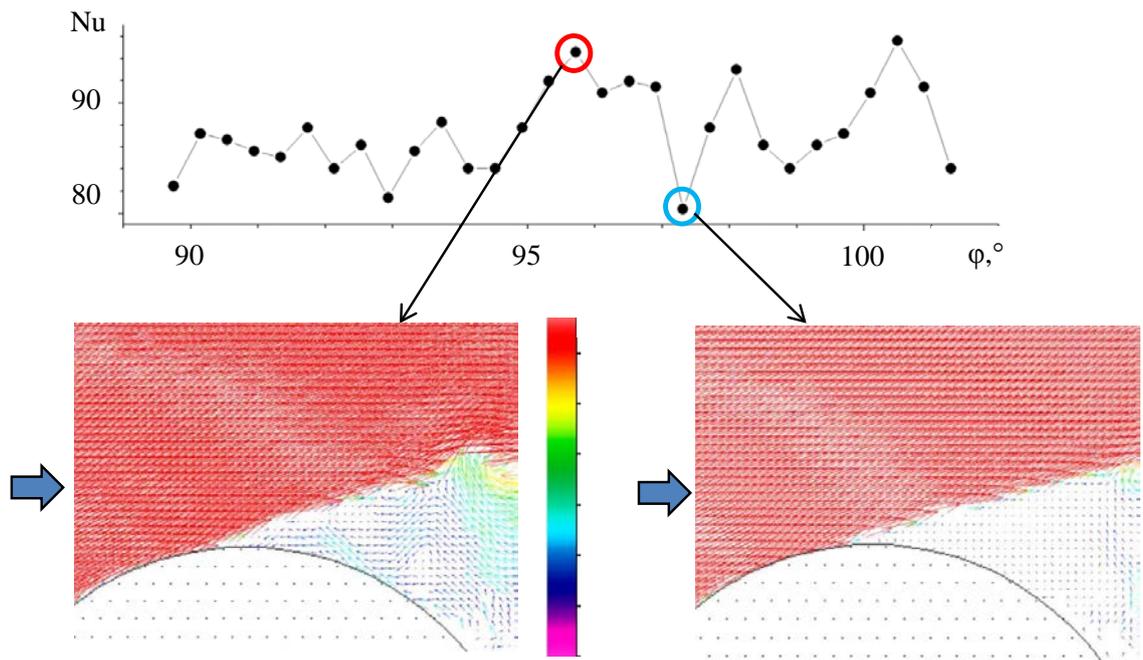


Рисунок 5 – Угловая теплограмма и соответствующие ей поля скорости

Разброс значений числа Нуссельта  $Nu_\phi$  на теплограмме не связан с неопределённостью градиентной теплотметрии, а лишь показывает значение плотности теплового потока в момент измерения поля скорости.

Исследование теплообмена при различных значениях угла  $\beta$  показало, что изменение угла атаки может как увеличить, так и уменьшить тепловой поток. В работе Sparrow E. M. и Yanez Moreno A.A. показано, что минимум соответствует области  $\beta = 65^\circ \dots 70^\circ$ . Для  $\beta = 45^\circ \dots 50^\circ$  наблюдается значительное увеличение числа Нуссельта, достигающего более высоких значений, чем в случае поперечного обтекания ( $\beta = 90^\circ$ ). Сопоставление этих результатов с нашими данными приведено на рисунке 6.

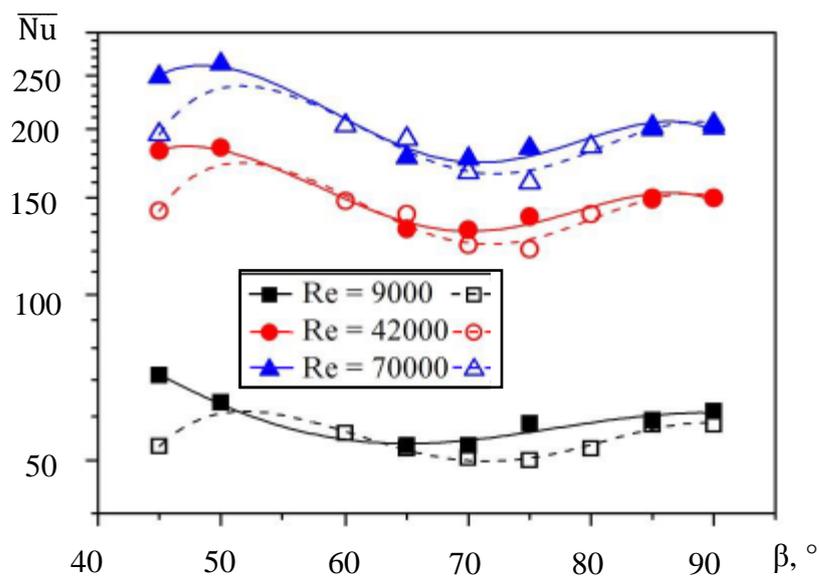


Рисунок 6 – Сравнение наших данных (штриховая линия) с результатами Sparrow и Yanez Moreno

Возможно, минимум  $\overline{Nu}$  вызван сменой направления  $W_z$ . Если рассматривать только третью компоненту скорости, то положительное направление будет заставлять поток двигаться от поверхности цилиндра. Цилиндр работает как диффузор, снижая  $W_z$  вблизи своей поверхности и

наоборот: когда  $W_z$  отрицательна, поверхность цилиндра работает как конфузор.

На рисунке 7 показано полученное в работе распределение числа Нуссельта по поверхности цилиндра для разных углов атаки при  $Re = 26000$ . Наибольшие различия наблюдаются в кормовой части, что объясняется сложным характером течения и отрывом вихрей в этой зоне. Наблюдается также сдвиг точки отрыва вниз по течению с уменьшением угла  $\beta$ .

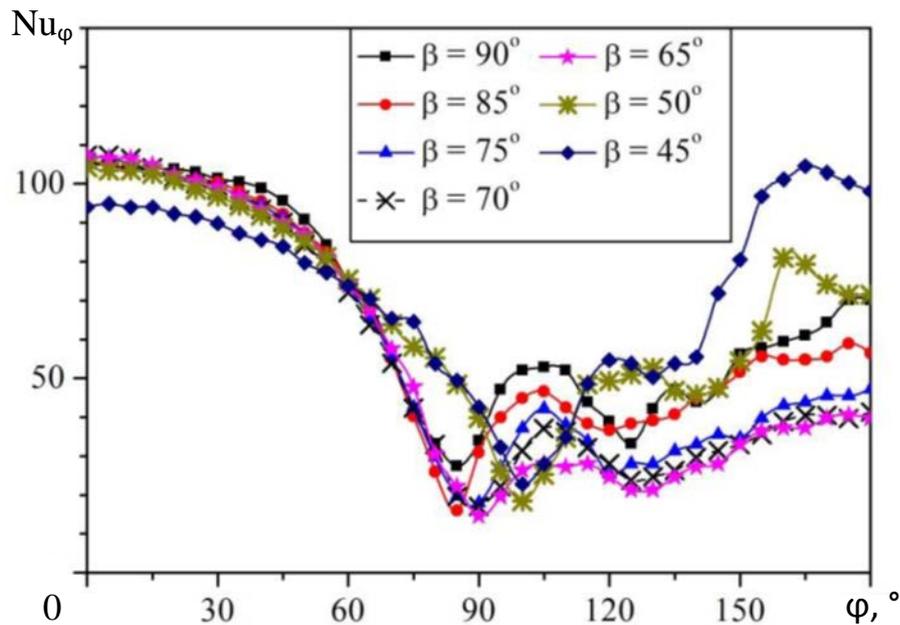


Рисунок 7 – Зависимость местного числа Нуссельта от угла поворота  $\phi$  для разных углов атаки  $\beta$

На рисунке 8 показаны усредненные поля скорости в следе за цилиндром. Векторами показано направление потока в сечении светового ножа. Цвет показывает величину третьей компоненты скорости  $W_z$ ; она меняет направление после угла атаки  $\beta=65^\circ$ , что коррелирует с минимумом в среднем числе Нуссельта (рисунок 6). Предполагая, что именно эта смена направления ответственна за увеличение числа Нуссельта, мы использовали для проверки две дополнительные модели: цилиндр диаметром 41 мм и длиной 3 м (для исключения концевых эффектов) и основную модель диаметром 66 мм, установленную вертикально.

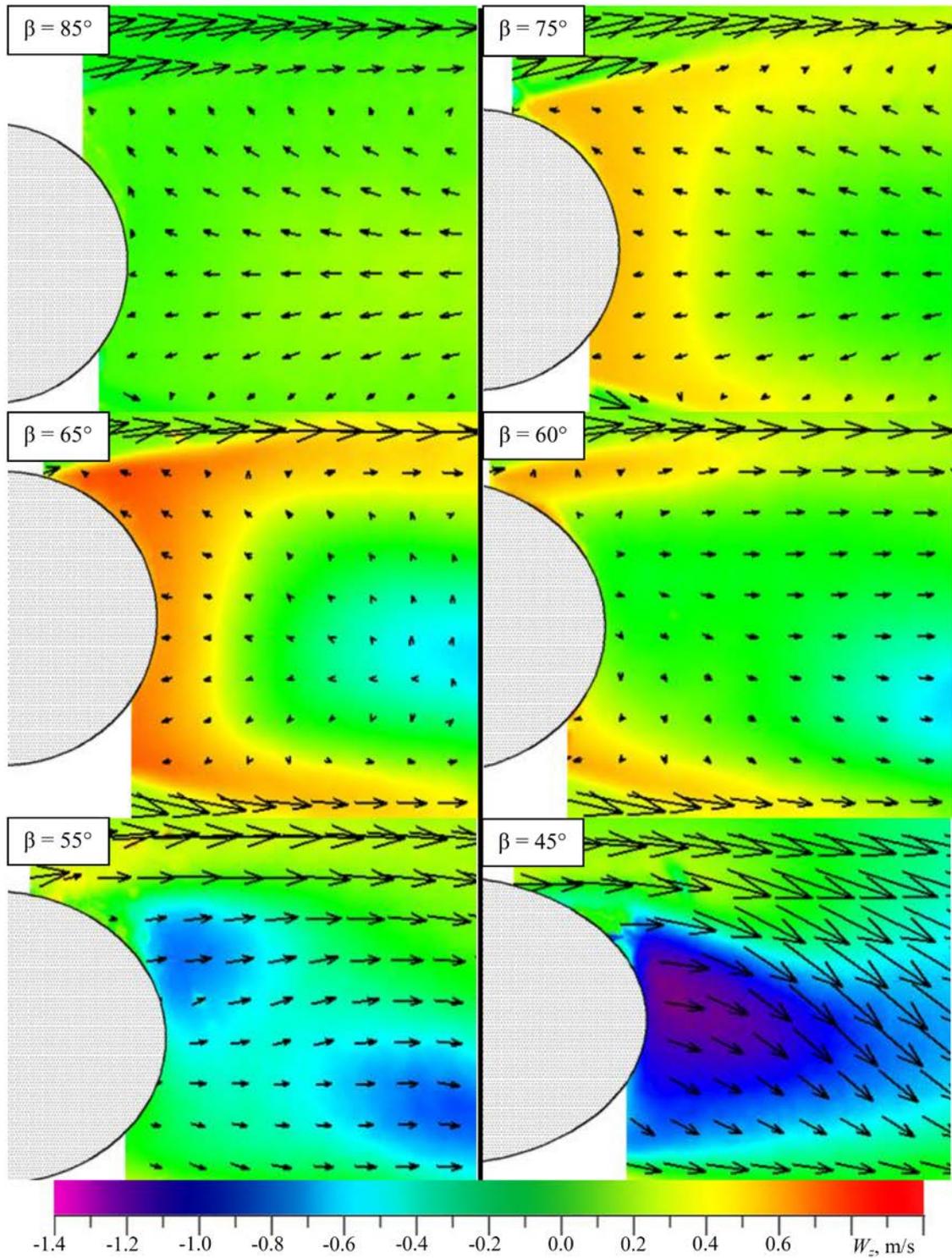


Рисунок 8 – Усредненные поля скорости в следе за цилиндром

Мы также использовали трубку Пито и визуализацию потока путем присоединения тонких шелковинок к задней образующей цилиндра. Опыты показали, что  $W_z$  позади цилиндра отрицательна.

Считаем, что наличие отрицательной компоненты  $W_z$  обусловлено поворотом пограничного слоя до появления отрыва. Пограничный слой имеет тенденцию следовать повороту цилиндра и отрываться перпендикулярно его поверхности. Это заставляет всю зону вихреобразования двигаться с положительной скоростью  $W_z$ . В центральном сечении следа за цилиндром, при  $\beta = 90^\circ$  возникает зона обратного течения, вызванная закручиванием пограничного слоя после его отделения. Это заставляет положительную компоненту  $W_z$  меняться на противоположную, приводя, при усреднении по времени, к отрицательной  $W_z$  в зоне обратного течения.

PIV - исследования для цилиндра, установленного вертикально, показали, что могут встречаться различные направления  $W_z$ , что может быть связано с концевыми эффектами или отклонением угла наклона зоны вихреобразования от угла атаки цилиндра; полагаем, что точка минимума в числе Нуссельта может сдвигаться в зависимости от условий эксперимента.

Мы не уловили различий в поле скорости за цилиндром в зависимости от того, нагретым он был или холодным; возможно, это связано с быстрым охлаждением оторванного пограничного слоя.

Термоанемометрия показала, что в следе за цилиндром с уменьшением угла  $\beta$  падает частота схода вихрей, это соответствует выводам Mahbub Alam, MD., Zhou Y.

Заметим, что частотные характеристики вихря весьма полезны при верификации численных моделей. В нашей работе использовался термоанемометр постоянной температуры ТАП - 3, сигнал которого независимо обрабатывался осциллографом Tektronix TDS 3034B и АЦП - комплексом фирмы National Instruments (плата NI PXI - 4461). Частоту схода вихрей определяли путем обработки в среде LabView. Соответствующее расчётам число Струхала составляет 0,19...0,2; в работе получены кривые привносимой мощности, частотный спектр соответствует общепринятым представлениям.

В завершении работы мы развили тему цилиндра с проволоками - турбулизаторами диаметром  $d = 0,86...2,0$  мм, разнесёнными относительно лобовой точки симметрично на угол  $\pm\psi$ . Проволоки располагались как вплотную к образующей, так и с зазором  $\delta$ . Опытным путём достаточно быстро были подобраны наиболее выгодные значения  $\psi$ ,  $d$  и  $\delta$ . Удалось показать, в частности, что при  $\delta \neq 0$  устраняется застойная зона перед проволокой, а изменение теплоотдачи происходит так, как показано на рисунке 9. Выявлено также влияние угла атаки  $\beta$ . Опыты показали, что местный коэффициент теплоотдачи вблизи турбулизатора повышается в 2,5 раза, а средний – в 1,14 раза. Частотный анализ показал, что проволоки - турбулизаторы не влияют сколько-нибудь существенно на число Струхала, следовательно, этот вид турбулизации не приведет к резонансным явлениям в теплообменнике.

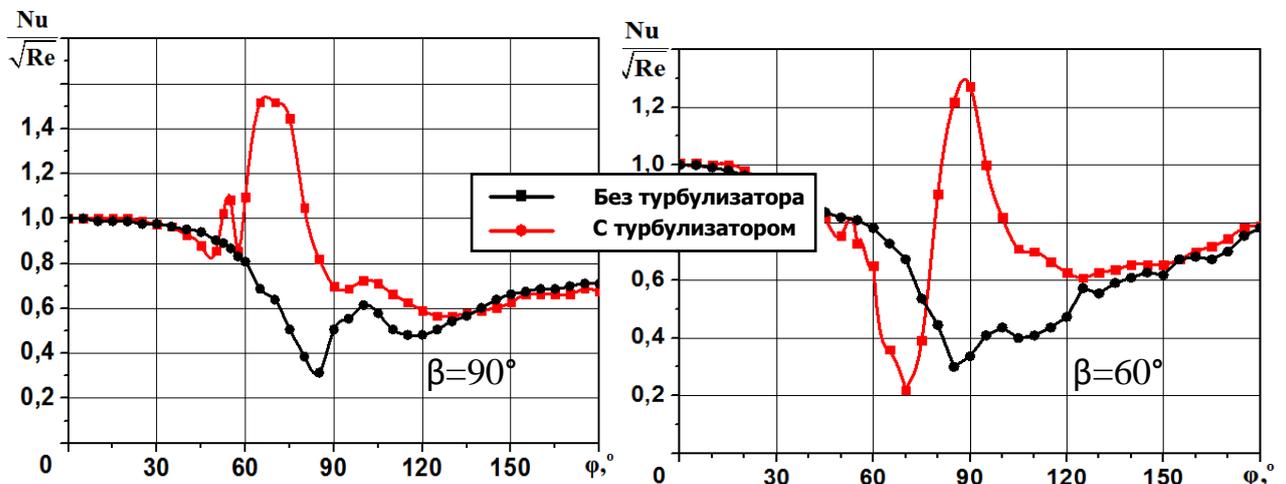


Рисунок 9 – Местные коэффициенты теплоотдачи для цилиндра с проволоками-турбулизаторами

В заключение отметим, что в работе оценена неопределённость значений основных величин по ГОСТ Р54500.3 – 2011. Стандартная неопределённость измеренной плотности теплового потока составила  $1,3 \text{ Вт/м}^2$ , а скорости –  $0,48 \text{ м/с}$ ; оба показателя позволяют считать результаты исследования достаточно достоверными.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- 1) Предложена методика исследования течения и теплообмена при обтекании цилиндра, совмещающая технологию, оборудование и возможности PIV-подхода и градиентной теплотметрии.
- 2) Методика апробирована на модели кругового цилиндра с паровым обогревом, обтекаемой потоком воздуха по нормали и под углом к образующим в диапазоне чисел Рейнольдса от 10150 до 78800.
- 3) Адекватность предложенного подхода подтверждена сравнением с общепризнанными данными литературных источников. Показано, что достигнутый в эксперименте метрологический уровень достаточен для того, чтобы считать результаты доказательными.
- 4) Подтверждено наличие трехмерного течения при обтекании цилиндра под углом атаки, отличным от прямого, выявлены изменения в условиях теплообмена в зависимости от режимных и геометрических параметров.
- 5) Установлены частотные характеристики для местной плотности теплового потока на поверхности кругового цилиндра. Показано соответствие или близость этих результатов данным других авторов.
- 6) Исследованы течение и теплообмен при обтекании цилиндра со стержнями-турбулизаторами, расположенными параллельно образующей и симметрично относительно лобовой точки. В ходе экспериментов подобрана оптимальная геометрия системы; показано, что интенсификация теплообмена вблизи турбулизаторов повышает средний коэффициент теплоотдачи на 14...20%.

**Основные положения и результаты диссертационной работы изложены в следующих публикациях:**

**В рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК:**

- 1) Гусаков А.А. Градиентная теплотметрия: идеи, реализация, результаты / С.З. Сапожников, В.Ю. Митяков, А.В. Митяков, С.А. Можайский, А.А. Гусаков // Труды Академэнерго. -2014. -№ 3 –С. 16-35.

- 2) Гусаков А.А. Исследование теплообмена при обтекании цилиндра под различными углами атаки / А.В. Башкатов, А.А. Гусаков, Э.Р. Зайнуллина, А.С. Косолапов, А.В. Митяков, В.Ю. Митяков, С.А. Можайский, С.З. Сапожников, В.В. Сероштанов // Труды Академэнерго. -2014. -№ 4 –С. 16-35.
- 3) Гусаков А.А. Совместное использование PIV-технологии и градиентной теплотметрии // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 7 – С. 565—570.
- 4) Гусаков А.А. PIV-диагностика и градиентная теплотметрия в исследовании поперечного обтекания цилиндра / А.А. Гусаков, В.Ю. Митяков, А.В. Митяков, С.З. Сапожников, Д.М. Маркович, А.С. Небучинов // Тепловые процессы в технике, 2015. №8 – С.343-350.

**В других изданиях:**

- 1) Gusakov, A.A. Simultaneous PIV and Gradient Heat Flux Measurement of a Circular Cylinder in Cross-Flow / Andrey A. Gusakov, Artem S. Kosolapov, Dmitriy M. Markovich, Andrey V. Mityakov, Vladimir Y. Mityakov, Sergey A. Mozhayskiy, Alexander S. Nebuchinov, Sergey Z. Sapozhnikov // Applied Mechanics and Materials 2014, Vol. 629, pp. 444-450
- 2) Гусаков А.А. В топке промышленного котла / А.А. Гусаков А.В. Митяков, В.Ю. Митяков, С.З. Сапожников, А. Снарский // Энергонадзор.– 2014. – №6(58) – С. 20-21.
- 3) Гусаков А.А. Совмещение PIV-технологии и градиентной теплотметрии при исследовании течения и теплообмена в сферической лунке / Д.М. Маркович, А.С. Небучинов, А.А. Гусаков, А.В. Митяков, В.Ю. Митяков, С.А. Можайский, С.З. Сапожников // Тезисы VI Российской национальная конференция по теплообмену. Т. 1. – М.: Издательский дом МЭИ, 2014 – С. 71-72.
- 4) Гусаков А.А. Исследование теплообмена при обтекании массива лунок с совместным использованием PIV диагностики и градиентной теплотметрии / Д.М. Маркович, А.С. Небучинов, С.З. Сапожников, В.Ю. Митяков,

А.В. Митяков, А.В. Башкатов, А.А. Гусаков, Э.Р. Зайнуллина, А.С. Косолапов, С.А. Можайский, В.В. Сероштанов // Тезисы Всероссийской конференции XXXI Сибирский теплофизический семинар, 2014 – С. 40.

5) Гусаков А.А. Градиентная теплотметрия: идеи, реализация, результаты / С.З. Сапожников, В.Ю. Митяков, А.В. Митяков, С.А. Можайский, А.А. Гусаков // Материалы докладов IX школы-семинара молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова. Казань, 2014 – С. 19-26.

6) Гусаков А.А. Исследование течения и теплообмена цилиндра с помощью PIV-диагностики и градиентной теплотметрии / А.А. Гусаков, В.Ю. Митяков, С.А. Можайский // Сборник докладов II Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием. – Екатеринбург: УрФУ, 2013. – С. 41-44.

7) Гусаков А.А. Новые материалы в градиентной теплотметрии / О.А. Барабанова, С.В. Набатчиков, С.З. Сапожников, В.Ю. Митяков, А.В. Митяков, А.А. Гусаков // Инновации в материаловедении и металлургии: материалы IV Международной интерактивной научно-практической конференции. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2015. – С. 286-290.

8) Гусаков А.А. PIV-диагностика и градиентная теплотметрия в исследовании поперечного обтекания цилиндра / А.А. Гусаков, В.Ю. Митяков, С.А. Можайский, А.С. Небучинов // Тез. 6-ой Российской нац. конф. по теплообмену. Т. 1. – М.: Издательский дом МЭИ, 2014. – С. 53-54.

9) Гусаков А.А. Теплотметрия PIV – диагностика: комплексный подход к исследованию теплообмена и гидродинамики на примере поперечно обтекаемого цилиндра / А.В. Башкатов, В.В. Сероштанов, Э.Р. Зайнуллина, А.С. Косолапов, А.Ю. Бабич, А.А. Гусаков // Научный форум с международным участием «Неделя науки СПбПУ»: материалы научно-практической конф. Институт энергетике и транспортных систем СПбПУ. Ч. 2. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. – С. 280-282.

10) Гусаков А.А. Особенности процессов теплообмена при непоперечном

обтекании круглого цилиндра / В.В. Сероштанов, А.С. Косолапов, Э.Р. Зайнуллина, А.Ю. Бабич, А.В. Башкатов, А.А. Гусаков // Научный форум с международным участием «Неделя науки СПбПУ»: материалы научно-практической конф. Институт энергетики и транспортных систем СПбПУ. Ч. 2. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. – С. 309-311.