

УДК 621.514

Д.М.Маркович<sup>1</sup>, А.С.Небучинов<sup>1</sup>,  
С.З.Сапожников<sup>2</sup>, В.Ю.Митяков<sup>2</sup>, А.В.Митяков<sup>2</sup>, А.Ю.Бабич<sup>2</sup>, А.В.Башкатов<sup>2</sup>,  
А.А.Гусаков<sup>2</sup>, Э.Р.Зайнуллина<sup>2</sup>, А.С.Косолапов<sup>2</sup>, В.В.Сероштанов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт теплофизики СО РАН,  
630090, Россия, Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 1, E-mail: dmark@itp.nsc.ru  
<sup>2</sup> Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»  
195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, E-mail:  
andrey.mityakov@gmail.com

## **«КОМПЛЕКСНАЯ PIV-ДИАГНОСТИКА И ТЕПЛОМЕТРИЯ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА НА ПОВЕРХНОСТИ ПОПЕРЕЧНО ОБТЕКАЕМОГО ЦИЛИНДРА»**

### **АННОТАЦИЯ**

Вопросы гидродинамики и теплообмена актуальны при создании новых энергетических машин и теплообменников. Предлагается комплексная методика для совместного исследования поля скорости методом PIV (Particle Image Velocimetry) и параметров теплообмена – плотности теплового потока и коэффициента теплоотдачи – с помощью градиентных датчиков.

ТЕПЛОМЕТРИЯ, ГИДРОДИНАМИКА, ЦИЛИНДР, ДАТЧИК ТЕПЛООВОГО ПОТОКА, PIV-ДИАГНОСТИКА, ТЕПЛООБМЕН, АЭРОДИНАМИЧЕСКАЯ ТРУБА

### **1. ВВЕДЕНИЕ**

Изучение теплообмена и течений до сих пор выполнялось в ходе достаточно сложных отдельных экспериментов. Если методика и аппаратура для экспериментального исследования течений весьма разнообразны и широко апробированы, то исследование нестационарного теплообмена на изотермических поверхностях тормозилось отсутствием датчиков теплового потока с необходимым быстродействием.

В лаборатории кафедры «Теоретические основы теплотехники» Санкт - Петербургского политехнического университета созданы, апробированы и внедрены в лабораторный и промышленный эксперимент быстродействующие градиентные датчики теплового потока (ГДТП).

В работе измерены местные плотности теплового потока и одновременно зафиксированы поля скорости при поперечном обтекании кругового нагретого цилиндра. При этом ставились задачи:

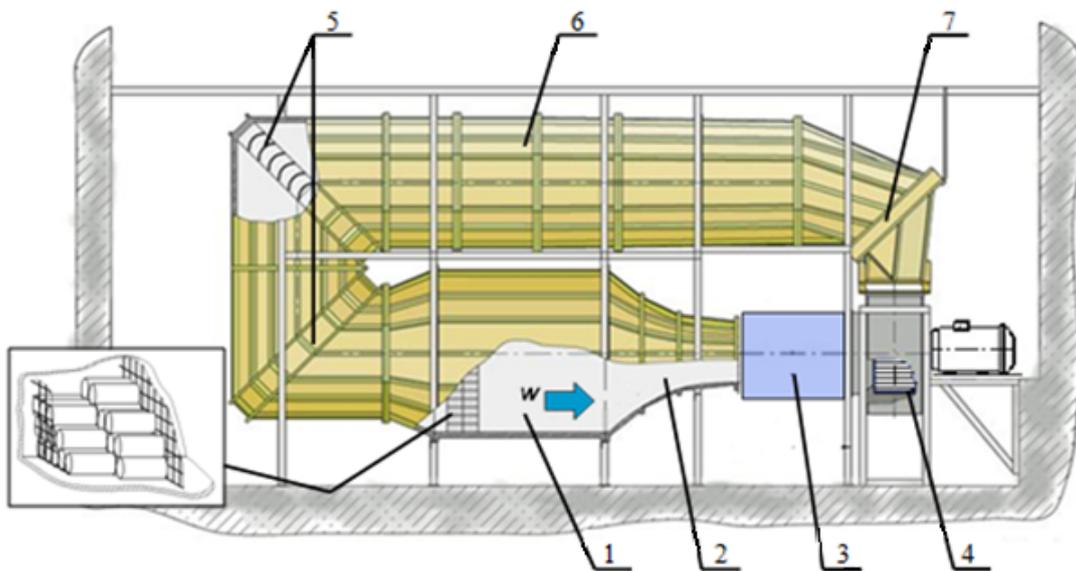
- создать комплексный метод PIV-диагностики и теплотметрии;
- изучить влияние течения на теплоотдачу нагретого кругового цилиндра;
- установить турбулизаторы и исследовать их эффективность.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Исследования выполнены в аэродинамической трубе (рис.1) кафедры “Теоретические основы теплотехники” Санкт–Петербургского политехнического университета.



а)



б)

Рис. 1. Фотография (а) и схема (б) аэродинамической трубы:

1 – форкамера с хонейкомбом; 2 – конфузор; 3 – камера Эйфеля; 4 – центробежный вентилятор; 5 – повороты с лопатками; 6 – обратный канал; 7 – охладитель воздуха.

Аэродинамическая труба состоит из водо-воздушного теплообменника (охладителя воздуха) 7, обратного канала 6, конфузора 2, камеры Эйфеля 3 и центробежного вентилятора 4. Лопатки 5, установленные в поворотной части трубы, совместно с хонейкомбом 1 позволяют понизить степень турбулентности потока до 1% .

Действие градиентных датчиков теплового потока (ГДТП) основано на поперечном эффекте Зеебека [2]: при протекании теплового потока через пластину с анизотропией теплофизических и термоэлектрических свойств в направлении, нормальном вектору теплового потока, возникает термоЭДС, пропорциональная величине теплового потока (рис. 2). Постоянная времени всех исследованных до настоящего времени ГДТП имеет порядок  $10^{-9} \dots 10^{-8}$  с (рис. 3). Это позволяет считать ГДТП практически безынерционным средством измерения для большинства процессов теплообмена.

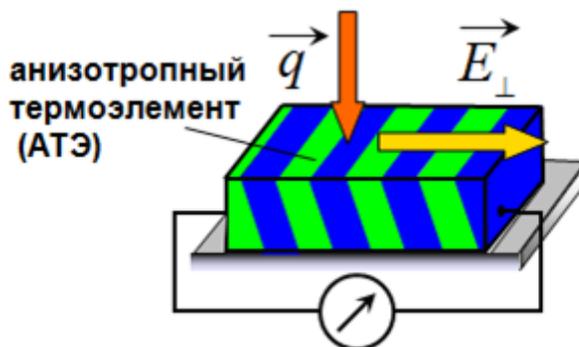


Рис.2. Поперечный эффект Зеебека

Плотность теплового потока

$$q = \frac{E_{\perp}}{S_0 F}, \text{ Вт/м}^2, \quad (1)$$

где  $E_{\perp}$  – сигнал ГДТП, В

$S_0$  – вольт-ваттная чувствительность ГДТП, В/Вт

$F$  – площадь ГДТП,  $\text{м}^2$ .

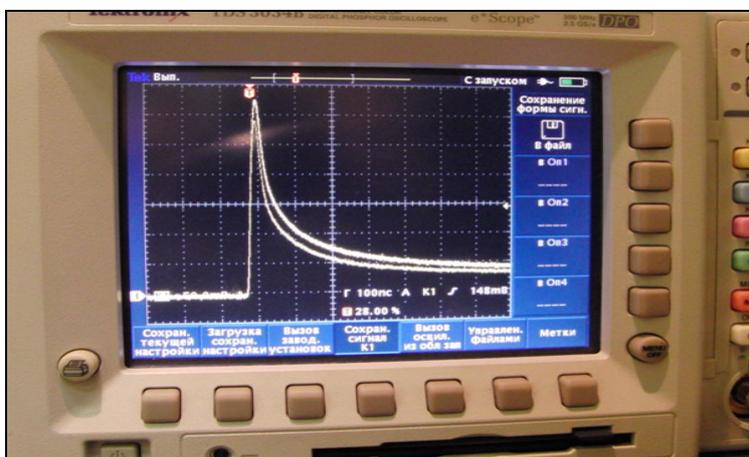


Рис.3. Постоянная времени ГДТП

В опытах, описанных ниже, использовались ГДТП на основе висмута чистоты 0,9999 с вольт-ваттной чувствительностью около 10 мВ/Вт (рис. 4).

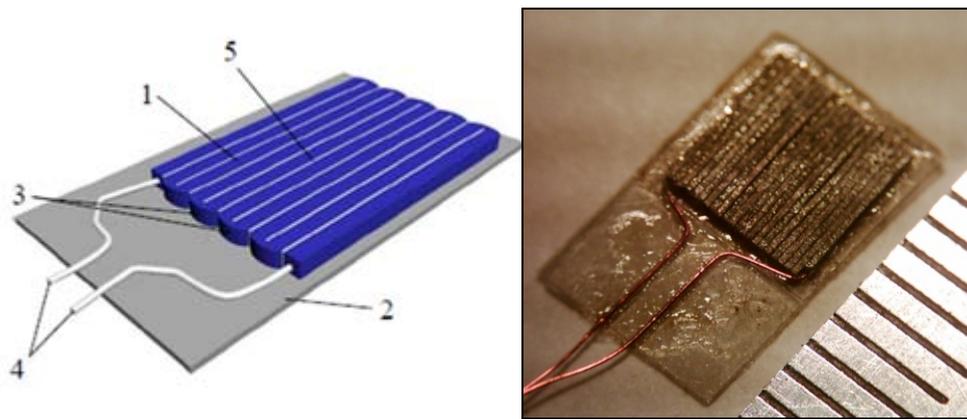
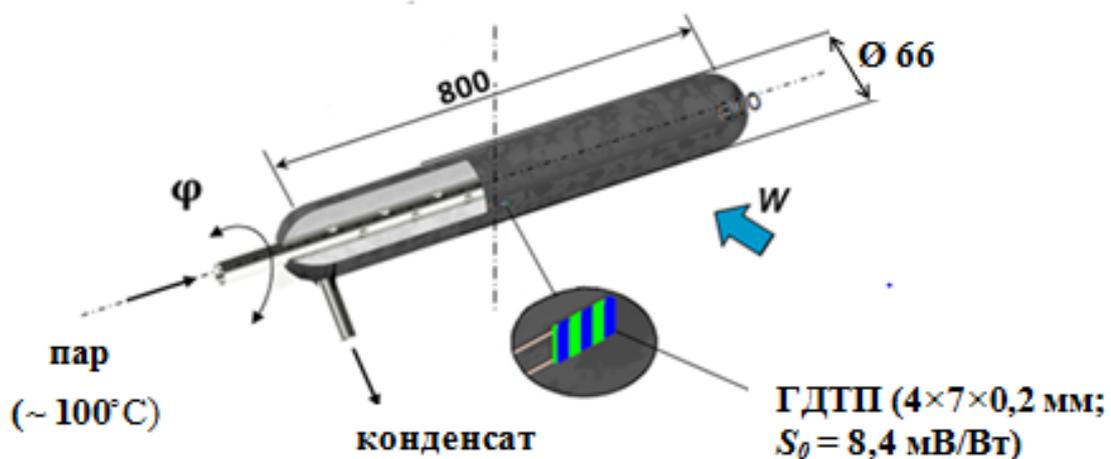


Рис. 4. ГДТП на основе анизотропного висмута: а – схема, б – общий вид. Числами обозначены: 1 – анизотропный термоэлемент; 2 – подложка из слюды; 3 – спаи из висмута; 4 – токовыводы; 5 – лавсановые прокладки.

В камеру Эйфеля помещается испытуемая модель – цилиндр (рис. 5) с наружным диаметром  $D = 66$  мм, выполненный из стального листа толщиной 0,1 мм. Цилиндр обогревается изнутри насыщенным паром; температура его стенок близка к  $100^{\circ}\text{C}$ . На поверхности цилиндра установлен ГДТП на основе висмута. Толщина датчика 0,2 мм, размеры в плане  $4 \times 7$  мм, вольт-ваттная чувствительность –  $8,4$  мВ/Вт.



а)



б)

Рис. 5 Фотография (а) и схема (б) модели обогреваемого цилиндра

### 3. ГРАДУИРОВКА ГДТП

Градуировка ГДТП заключается в определении зависимости между тепловым потоком, проходящим через датчик и термоЭДС, которую он генерирует. В результате градуировки была определена вольт-ваттная чувствительность ГДТП  $S_{\theta} = 8,4$  мВ/Вт с неопределенностью, не превышающей 1%.

Для градуировки ГДТП создана установка, состоящая из цилиндрической вакуумной камеры (рис. 6) 10 с рубашкой охлаждения, по оси которой расположена галогенная лампа накаливания трубчатого типа. На оси камеры в держателях 6 фиксируется трубка 9 из нержавеющей стали. На поверхности трубки установлены градуируемый ГДТП 8 и хромель-алюмелевые термопары 3 (для определения температуры отнесения и контроля равномерности нагрева по длине трубки 9). Подвод электропитания к лампе и выводы термометров осуществляются через гермовыводы на торце камеры. Корпус 10 охлаждается водой, циркулирующей в двойной стенке; подвод и отвод воды осуществляется через патрубки 1 и 4. Вакуумирование полости стэнда производится через патрубков 5. Тепловой поток от нагревателя передается в радиальном направлении. Для измерения теплового потока на внешней стенке установлен заранее отградуированный ГДТП 2.

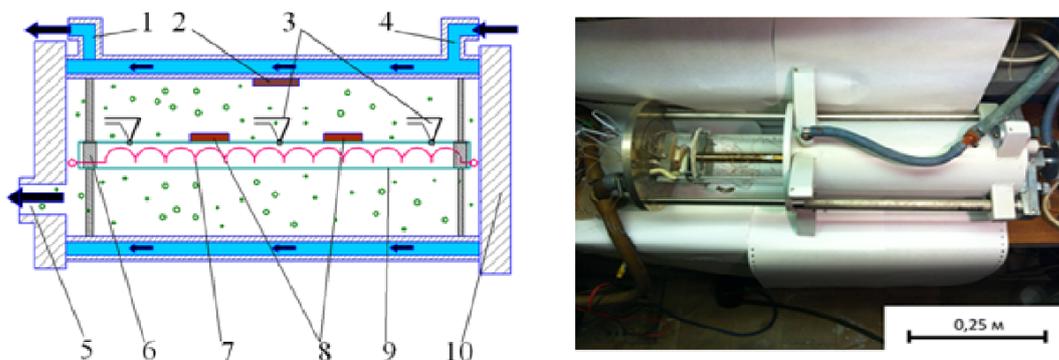


Рис. 6. Схема (а) и общий вид (б) стэнда для градуировки ГДТП. Числами обозначены: 1 - патрубок отвода воды; 2 – вспомогательный ГДТП; 3- термопары; 4 – патрубок подачи воды; 5 – патрубок для откачки вакуума; 6 – держатели; 7 – нагреватель; 8 – градуируемые ГДТП; 9 – трубка; 10 – вакуумная камера.

### 4. ЭКСПЕРИМЕНТ

В работе реализовано совместное использование PIV – диагностики (на основе системы ПОЛИС) (рис. 7) [2] и градиентной теплотметрии [3] (рис. 8). Принцип работы системы PIV заключается в том, что, в поток подаются трассеры (частицы диаметром 2...3 мкм), которые подсвечиваются лазерным ножом – лучом, разведенным цилиндрической линзой в плоскость. Для подачи трассеров используется дымогенератор. По команде блока синхронизации лазер производит двойную вспышку, фотокамера 1 фиксирует трассеры, а фотокамера 2 записывает измеряемый осциллографом сигнал ГДТП, установленного на поверхности цилиндра. Данные с камер 1 и 2 передаются для обработки в компьютер.

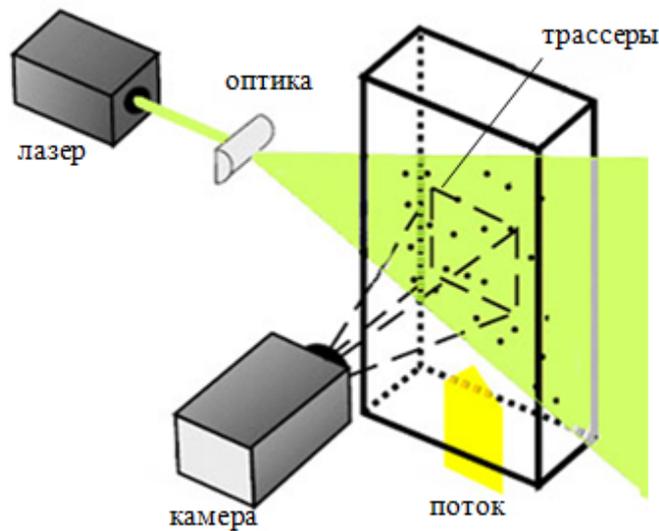


Рис. 7. Общая схема измерения скорости PIV – методом

Для измерения сигнала ГДТП использован светолучевой осциллограф Н-145, в котором ртутная лампа заменена на лазер. Луч осциллографа после отражения от зеркала гальванометра фиксировался камерой 2, и далее сигнал поступал в компьютер. Магнитное поле, в котором находится гальванометр осциллографа, избавило от помех, чего (при малом уровне сигнала) не обеспечивают АЦП последних поколений.

Настройки системы ПОЛИС позволяют регулировать подачу трассеров и частоту фотоснимков в зависимости от скорости и характера течения. Все фотографии обрабатывались в программе ActualFlow, дающей поле скорости для каждого момента времени.

В ходе эксперимента цилиндр проворачивается электроприводом вокруг своей оси на угол  $0^\circ < \varphi < 180^\circ$ , поэтому ГДТП фиксирует изменения плотности теплового потока в диапазоне углов от лобовой до кормовой точки.

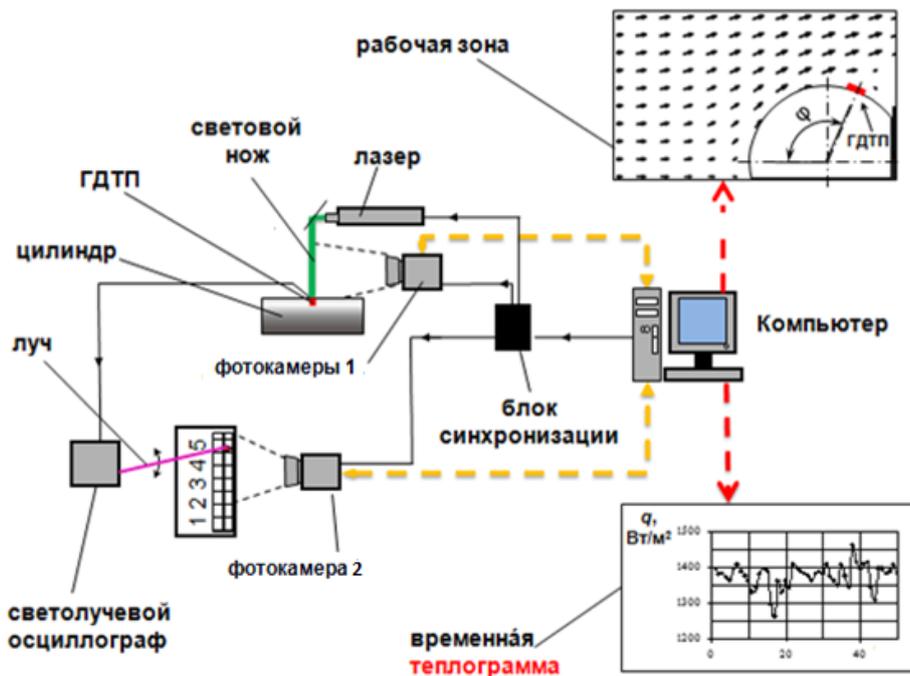


Рис. 8. Блок-схема совместного использования PIV-диагностики и градиентной теплотометрии

Цилиндр обогревается насыщенным водяным паром, поступающим через гибкий шланг из парогенератора. Мощность парогенератора такова, что позволяет поддерживать температуру поверхности цилиндра стабильной и близкой к  $100^{\circ}\text{C}$  при различных скоростях течения и коэффициентах теплоотдачи.

Для каждого момента времени фиксируется поле скорости при обтекании цилиндра и местная плотность теплового потока. Проанализировав полученные результаты, можно выявить связь между коэффициентами теплоотдачи (местным и средним) и скоростью течения. Число Рейнольдса в различных опытах составляло  $(1,2 \dots 5,2) \cdot 10^4$ .

Местная плотность теплового потока в точке с угловой координатой  $\varphi$  определяли по показаниям датчика ГДТП [1]:

$$q_{\varphi} = \frac{E_{\varphi}}{S_0 F}, \quad (2)$$

где  $E_{\varphi}$  – сигнал ГДТП в точке с угловой координатой  $\varphi$ ;  $S_0$  – вольт-ваттная чувствительность ГДТП;  $F$  – площадь ГДТП.

Местное значение коэффициента теплоотдачи

$$\alpha_{\varphi} = \frac{q_{\varphi}}{T_f - T_w}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К}), \quad (3)$$

где  $T_w$  – температура поверхности цилиндра,  $T_f$  – температура потока воздуха,  $^{\circ}\text{C}$ .

Безразмерное местное число Нуссельта

$$\text{Nu}(\varphi)_f = \frac{\alpha_{\varphi} d}{\lambda_f}, \quad (4)$$

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

## 5. РЕЗУЛЬТАТЫ

Построена зависимость  $\text{Nu}(\varphi)$ , и, для сравнения, представлена экспериментальная кривая из работы [4] (Рис. 9). Несмотря на то, что для лучшего осреднения требуется больше данных, кривые хорошо согласуются.

В области  $0 < \varphi < 80^{\circ}$  наблюдается устойчивое снижение числа Нуссельта за счет утолщения пограничного слоя. В момент, когда пограничный слой отрывается (при  $\varphi = 85^{\circ}$ ), число Нуссельта начинает возрастать. Другое снижение вызвано малой скоростью потока в рассматриваемой области после отрыва. Здесь число Нуссельта имеет сильные колебания вследствие завихренностей, спровоцированных закручиванием оторванного пограничного слоя.

На рис. 10 изображена теплограмма и поля скорости; показано различие картин течения между максимальной и минимальной местной плотностью теплового потока.

Обтекание на низких числах Рейнольдса связано с такими терминами, как «отрыв потока» и «ламинарно-турбулентный переход. Здесь для интенсификации теплообмена можно использовать турбулизаторы на поверхности цилиндра. Турбулизатор изменяет картину обтекания, а также точку ламинарно-турбулентного перехода. Так как турбулентный пограничный слой отрывается гораздо труднее, то можно увеличить средний коэффициент теплоотдачи от нагретого цилиндра, а также уменьшить лобовое сопротивление.

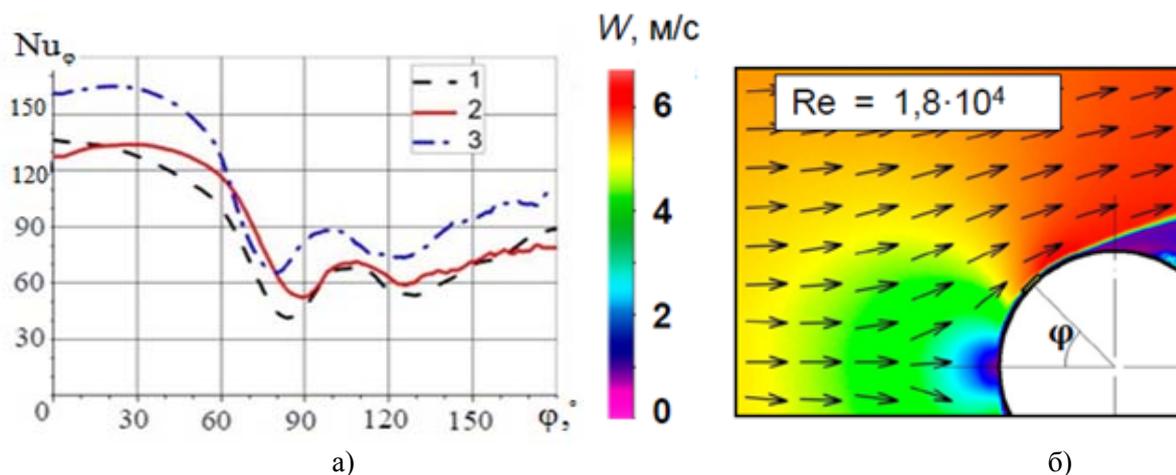


Рис. 9. Осредненное распределение числа Нуссельта (а) и средний вектор скорости (б)  
 1 – данные работы [4] для  $Re = 1,59 \cdot 10^4$ ; 2 – для  $Re = 1,8 \cdot 10^4$ ; 3 – для  $Re = 2,6 \cdot 10^4$

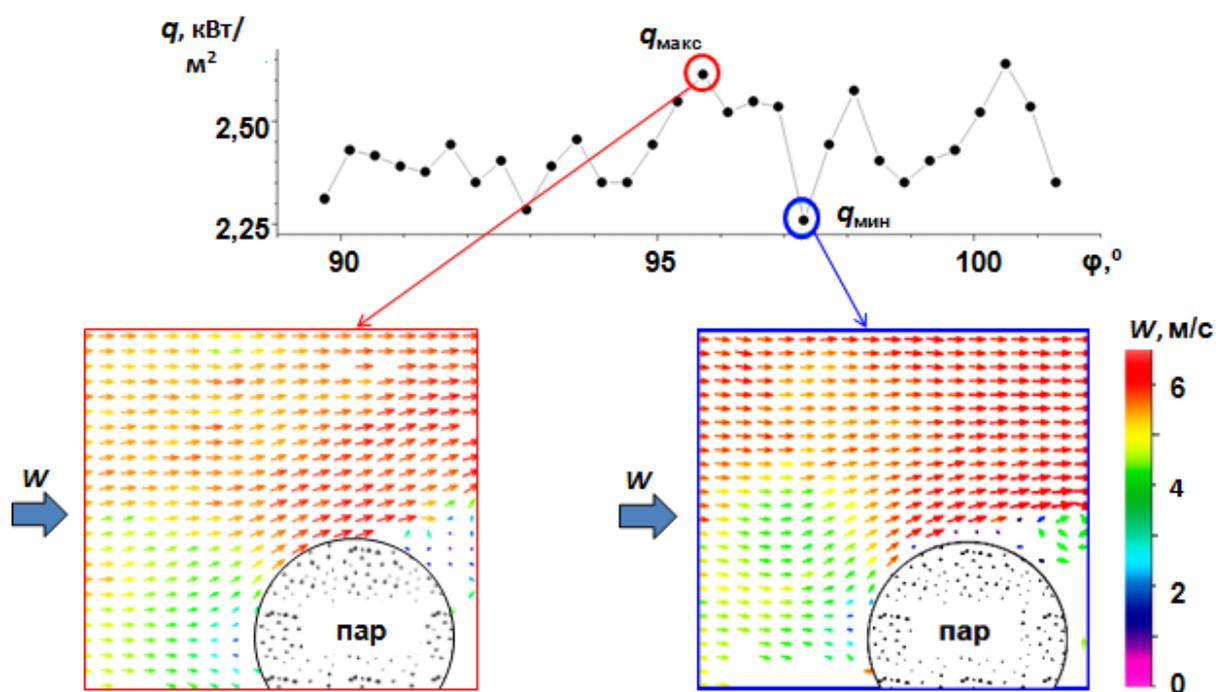


Рис. 10. Угловая теплограмма  $q(\varphi)$  и поля скорости  
 ( $Re = 2,4 \cdot 10^4$ )

Проведена серия опытов с использованием турбулизатора в виде тонкой проволоки (диаметром 0,8...2 мм). Экспериментально подобран оптимальный диаметр проволоки, который соотносится с толщиной пограничного слоя (около 1 мм), и угол установки турбулизатора:  $d_T = 1\text{мм}$  (рис. 11),  $\varphi_T = 55^\circ$ .

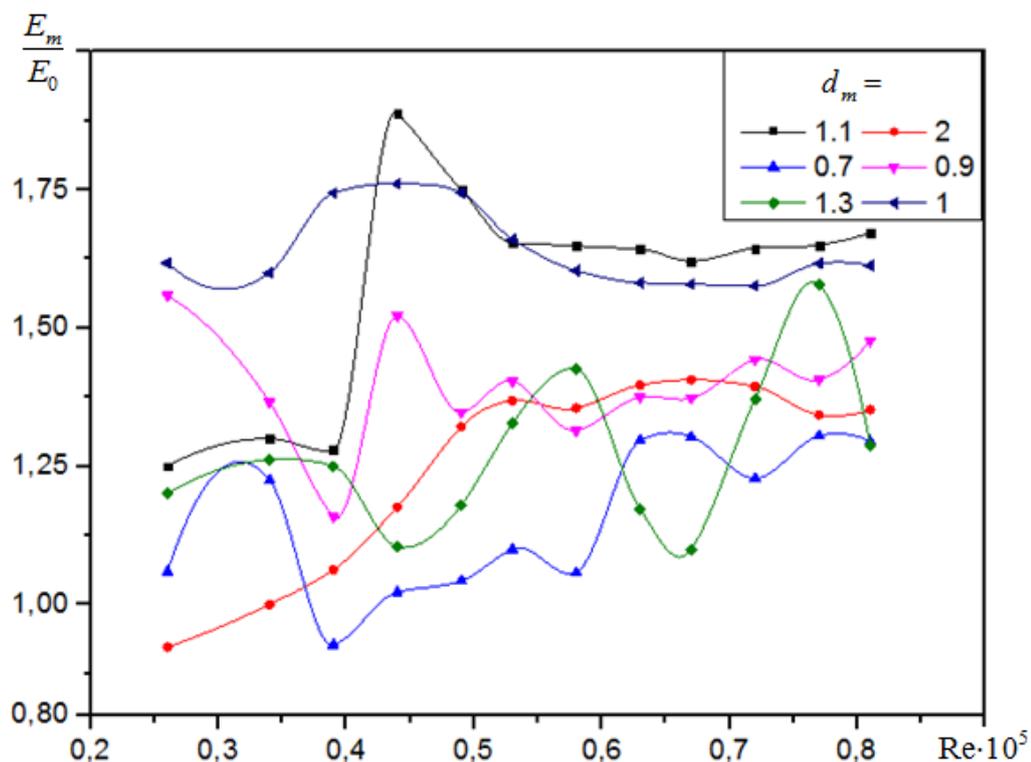


Рис. 11. Зависимость отношения показаний ГДТП с турбулизатором и без него при разных числах Рейнольдса.

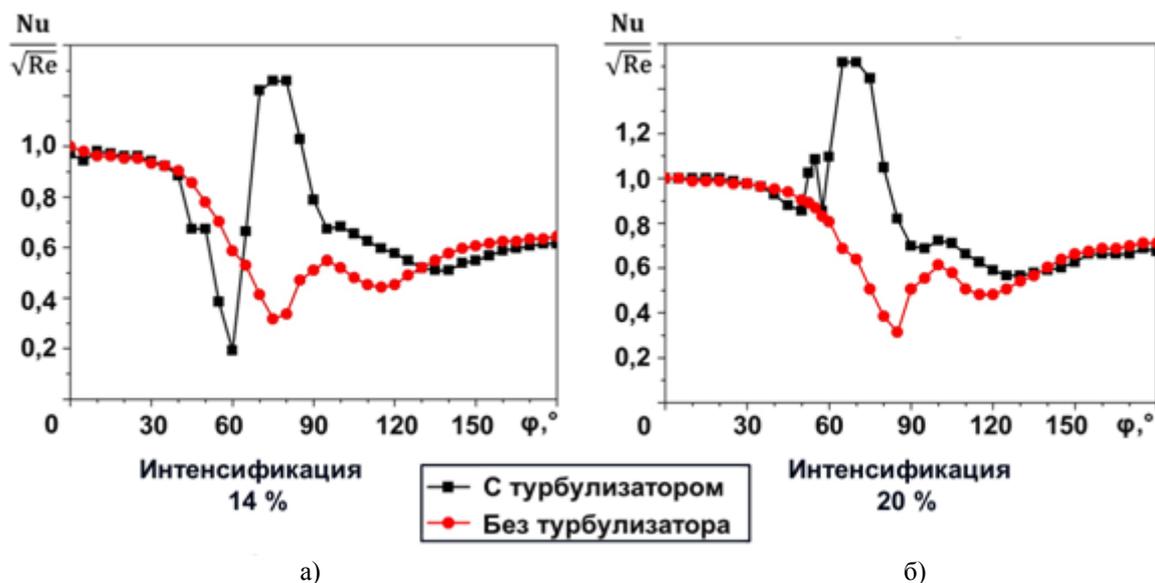


Рис. 12. Интенсификация теплообмена при помощи турбулизатора ( $d_T=1\text{ мм}$ ): а –  $Re=53,4 \cdot 10^3$ ,  $\varphi_T=55^\circ$  проволока прилегает к поверхности цилиндра; б –  $Re=48,5 \cdot 10^3$ ,  $\varphi_T=55^\circ$  проволока установлена с зазором в 1,2 мм.

Опыты с проволокой на поверхности цилиндра показали увеличение среднего коэффициента теплоотдачи на 14%. Отнесение турбулизатора на 1,2 мм от поверхности цилиндра устраняет «провал» перед ним и повышает средний коэффициент теплоотдачи на 20% (рис. 12).

### СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- ГДТП – гетерогенный датчик теплового потока;
- PIV— Particle Image Velocimetry
- Re — число Рейнольдса
- Nu — число Нуссельта

$q$  – плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;  
 $E$  – сигнал ГДТП, мкВ;  
 $S_0$  – вольт-ваттная чувствительность датчика, мВ/Вт;  
 $F$  – площадь датчика, мм<sup>2</sup>;  
 $\alpha_\phi$  – коэффициент теплоотдачи;  
 $T_w$  – температура поверхности цилиндра, °С;  
 $T_f$  – температура потока воздуха, °С;  
 $Nu(\phi)_f$  – число Нуссельта в зависимости от координаты  $\phi$ ;  
 $d$  – диаметр цилиндра, м;  
 $\lambda_f$  – теплопроводность воздуха, Вт/(м·К).  
 $\phi$  – угловая координата положения ГДТП, град.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В. Градиентные датчики теплового потока: Изд-во СПбГПУ, 2003. 168 с.
2. «ПОЛИС» измеритель полей скорости [Электронный ресурс]/Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск. - Режим доступа: <http://www/itp.nsc.ru/piv/piv.htm>.
3. Маркович Д.М., Небучинов А.С., Гусаков А.А., Митяков А.В., Митяков В.Ю., Можайский С.А., Сапожников С.З. Возможности совместного применения PIV и градиентной теплотметрии \ \ Оптические методы исследования потоков: XII Межд. науч.-технич. конференция [Электронный ресурс]: труды конференции. – Электрон.дан. – М.: НИУ «МЭИ», 2013. – 1 электрон.опт. диск (CD-ROM). – Доклад № 2-8, 12 с. – ISBN 978-5-91940-663-1 – № гос. регистрации 0321302584.
4. ErtanBuyruk. Heat transfer and flow structures around circular cylinders in cross-flow // Tr. J. of Engineering and Environmental Science 23(1999), pp. 299 – 315.
5. Сапожников, С.З. Градиентные датчики теплового потока в теплотехническом эксперименте / С.З. Сапожников, В.Ю. Митяков, А.В. Митяков. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. 203 с. 003В

D.M.Markovich<sup>1</sup>, A.S. Nebuchinov<sup>1</sup>,  
S.Z. Sapozhnikov<sup>2</sup>, V.Y. Mityakov<sup>2</sup>, A.V. Mityakov<sup>2</sup>, A.Y. Babich<sup>2</sup>, A.V. Bashkatov<sup>2</sup>,  
A.A. Gusakov<sup>2</sup>, E.R. Zainullina<sup>2</sup>, A.S. Kossolapov<sup>2</sup>, V.V. Seroshtanov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*KutateladzeInstituteofThermophysicsSBRAS,  
1 Acad. LavrentyevAve., Novosibirsk, 630090, Russia  
dmark@itp.nsc.ru*

<sup>2</sup>*PetertheGreatSt.PetersburgPolytechnicUniversity,  
PolytechnicheskayaStr.,29, Saint-Petersburg, 195251, Russia  
andrey.mityakov@gmail.com*

## **SIMULTANEOUS PIV AND GRADIENT HEAT FLUX MEASUREMENT FOR FLUID DYNAMIC AND HEAT TRANSFER RESEARCH OF A CIRCULAR CYLINDER IN CROSS-FLOW**

*Fluid dynamic and heat transfer are important for new heat exchangers design. In thy present paper the simultaneous heat flux and flow velocity measurement are shown. The measurement done with gradient heat flux sensors and PIV (Particle Image Velocimetry) method. New data for cylinder with turbulent promoters are presented.*

**GRADIENT HEAT FLUX MEASUREMENT, FLUID DYNAMIC, CYLINDER, HEAT FLUX SENSOR, SIMULTANEOUS PIV, HEAT TRANSFER, WIND TUNNEL**