

DOI: 10.18721/JPM.11214

УДК 536.2

АЭРОДИНАМИКА И ТЕПЛООБМЕН НА ПОВЕРХНОСТИ ОДИНОЧНОГО КОЛЬЦЕВОГО РЕБРА

А.А. Гусаков, М.А. Греков, В.В. Сероштанов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

В представленной статье предлагается объединить измерения теплового потока с тепловизионной и PIV-диагностикой для исследования обтекания воздушным потоком поверхности кольцевого ребра и теплообмена на ней. Рассматриваемое полое ребро обогревалось изнутри насыщенным паром, и таким образом изотермическая внешняя поверхность имитировала «идеальное» ребро. При этих режимах также изучены течение и теплообмен на поверхности сплошного ребра, изготовленного из титанового сплава; при этом ребро имело такую же форму и размеры, а градиентные датчики теплового потока устанавливались на его поверхности. В результате проведенных исследований получены поля скорости вблизи ребра, температурное поле на его поверхности, а также значения плотности теплового потока. Анализ полученных данных позволил получить важную информацию об аэродинамических и тепловых свойствах потока вблизи поверхности ребра. Предложенный авторами объединяющий метод позволяет исследовать поток и теплообмен на поверхности ребра в режиме реального времени.

Ключевые слова: градиентная теплотметрия; PIV-диагностика; круглое ребро; тепловой поток; коэффициент теплоотдачи

Ссылка при цитировании: Гусаков А.А., Греков М.А., Сероштанов В.В. Аэродинамика и теплообмен на поверхности одиночного кольцевого ребра // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2018. Т. 11. № 2. С. 151 – 164. DOI: 10.18721/JPM.11214

AERODYNAMICS AND HEAT TRANSFER OVER THE SURFACE OF A SINGLE CIRCULAR FIN

A.A. Gusakov, M.A. Grekov, V.V. Seroshtanov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation

In the paper, it has been proposed to unite the heat flux measurements with thermal imaging and the PIV diagnostics for studies in aerodynamics and heat transfer over the surface of a circular fin. The hollow fin under consideration was heated by saturated steam from within; meanwhile the isothermal external surface simulated an ideal fin. The surface flow and heat transfer of the solid fin sized and shaped identically, and made of titanium alloy, was investigated in the same regimes. Gradient heat flux sensors were placed on the fin surface. The velocity field near the fin, the temperature field and the heat flux per unit area over its surface were obtained. The data analysis

gave an impartial piece of information. The proposed method allows examination of a flow and a heat transfer over the fin surface in the real-time processing.

Key words: heat flux measurement; PIV diagnostics; circular fin; heat flux; heat transfer coefficient

Citation: A.A. Gusakov, M.A. Grekov, V.V. Seroshtanov, Aerodynamics and heat transfer over the surface of a single circular fin, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 11 (2) (2018) 151 – 164. DOI: 10.18721/JPM.11214

Введение

Основными элементами большинства рекуперативных теплообменников конвективного типа являются поперечно обтекаемые пучки труб круглого сечения, обычно с оребрением их поверхности. Структура течения вблизи оребренных труб достаточно хорошо изучена. Определяющим параметром является число Рейнольдса Re , вычисляемое по диаметру трубы и скорости внешнего потока. Для изучения гидродинамики в пакетах оребренных труб важна, прежде всего, эффективность теплообмена в первых рядах труб, где практически не сказывается влияние шага труб и типа трубного пучка [1]. Данный факт обусловил наш выбор экспериментальной модели.

Исследование течения и теплообмена на поперечно оребренных трубах наталкивается на ряд трудностей, вызванных многофакторностью задачи. Так, в работах [5, 6] описано трехмерное течение у основания ребра. Из-за различия скоростей вблизи поверхности ребра и в ядре потока, при набегании потока на стенку трубы возникает перепад давления вдоль оси трубы. Вследствие такого перепада движение жидкости совершается от центра межреберного канала к основанию ребра. Показано также, что при малой относительной высоте ребра возрастает влияние трубы как преграды для основного потока [1]. Визуализация течения в этой работе осуществлялась с помощью саже-керосиновой взвеси.

Для исследований по данной тематике распространено также применение метода пересчета поля скорости по данным измерений поля статического давления. С появлением и расширением сферы применения лазеров стал использоваться метод PIV (Particle Image Velocimetry), который основан на измерении скорости по изображе-

нию частиц и открыл новые перспективы развития данного научного направления.

В исследовании теплообмена целевой функцией служит местный коэффициент теплоотдачи α . Многочисленные работы, посвященные измерению этой величины, основаны на применении разнообразных методов в широком диапазоне геометрических условий и режимов течения. Так, метод, основанный на аналогии между процессами тепло- и массообмена [1], позволяет определять коэффициенты массопереноса фотометрическим способом. Представлены картины, на которых интенсивность окраски различных участков ребра пропорциональна значению местного коэффициента теплоотдачи. Ввиду сложности идентификации экспериментальных данных, а также трудностей при реализации фотометрического метода в целом, последний дальнейшего распространения не получил.

Более распространены методики, основанные на использовании датчиков теплового потока (ДТП). В работе [1] измерения выполнялись на полностью обогреваемых моделях оребренных труб. ДТП устанавливались на ребре и на поверхности несущего цилиндра, а их положение относительно направления набегающего потока варьировалось поворотом трубы вокруг оси. Исследования местных коэффициентов теплоотдачи проводились на одиночных трубах [1, 15] и в пакетах труб [7, 9].

Результаты этих и других исследований противоречивы. Различия связаны как с количественными, так и с качественными характеристиками распределения местного коэффициента теплоотдачи. Некоторые авторы отмечают (см., например, работу [1]), что распределение коэффициента теплоотдачи по поверхности ребра неравномерно, причем у вершины ребра величина α выше, чем у основания, где образуется



более толстый пограничный слой. Отмечается также, что максимальные значения целевой функции α приходится на азимутальный угол поворота $\varphi = 70 - 90^\circ$. Близкие результаты получены и в работах [5, 9].

Однако выполнены исследования [6, 15] при сходных режимах, где обнаружены локальные максимумы интенсивности теплообмена у основания ребра. Кроме того, результаты работы [1] указывают на всплески интенсивности теплообмена в области $\varphi = 100 - 130^\circ$, что авторы объясняют отрывом пограничного слоя от поверхности трубы.

Несмотря на большое разнообразие используемых поперечно ребренных поверхностей теплообмена, на сегодняшний день отсутствует универсальный и точный метод их расчета. Это обусловлено неравномерностью распределения коэффициента теплоотдачи по поверхности ребра [1, 2, 4, 8]. Анализ представленных в литературе результатов привел нас к заключению, что совместное исследование теплообмена и обтекания ребра методами градиентной теплотометрии, PIV- и тепловизионной диагностики может дать существенно новые и полезные результаты и позволит уточнить существующие методики расчета и расчетные модели.

Цель работы – выявить влияние режима течения, высоты ребра и угла натекания на распределение и осредненные значения коэффициента теплоотдачи комплексным методом.

В данной работе представлены результаты опытов по исследованию теплообмена и течения воздушного потока вокруг одиночного кольцевого ребра, полученные впервые путем совместного применения PIV- и тепловизионной диагностики, а также уникальной градиентной теплотометрии.

Экспериментальные методики

Визуализация течения проводилась методом PIV, тепловой поток измерялся методом градиентной теплотометрии, а температуру на поверхности ребра в местах установки ГДТП измеряли с использованием тепловизионной диагностики. Объединение гра-

диентной теплотометрии и PIV-диагностики нами апробировано и уже применялось в эксперименте; результаты этих измерений обобщены в работах [12, 16, 17]. Дополнительное использование тепловизионной диагностики должно дать возможность распространения этого подхода на исследования неизотермических поверхностей теплообмена.

Измерение теплового потока. На кафедре «Теплофизика энергетических установок» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого созданы и внедрены в экспериментальные исследования градиентные датчики теплового потока (ГДТП). Уникальной особенностью этих датчиков являются их рекордно низкие значения постоянной времени; они составляют $10^{-8} - 10^{-9}$ с [9], что делает их практически безынерционным средством измерения для большинства задач теплообмена.

Действие ГДТП основано на поперечном эффекте Зеебека: при прохождении теплового потока через пластину, обладающую анизотропией тепло- и электрофизических свойств, в ней возникает термоэдс, нормальная вектору плотности теплового потока и пропорциональная его модулю [9, 10].

В работе использовали пять ГДТП, выполненных на основе монокристаллического висмута (рис. 1). Размеры трех из них в плане составляли 2×2 мм, четвертого – 4×7 мм, а пятого – 5×5 мм. Толщина всех ГДТП составляла 0,2 мм. Вольт-ваттная чувствительность ГДТП, определяемая с помощью абсолютной градуировки по джоуль-ленцеву тепловому потоку, находилась на уровне 10 мВ/Вт. Генерируемый датчиками сигнал записывался с помощью универсального вольтметра В7-78/1 производства фирмы АК ИП (Россия).

PIV-диагностика. Технология PIV, реализованная системой POLIS [11], позволила бесконтактным методом визуализировать течение воздуха вблизи поверхности ребра. При PIV-диагностике (рис. 2) воздушный поток I засеивается частицами диаметром 2 – 3 мкм, которые подсвечиваются двойными вспышками лазерного ножа (он получен преобразованием лазер-

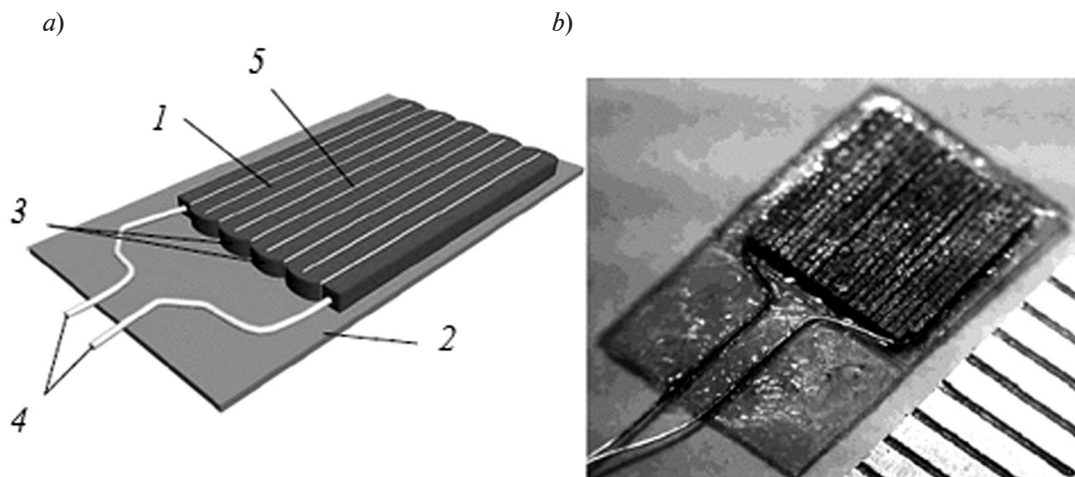


Рис. 1. Схематическое изображение (а) и фотография (б) градиентного датчика теплового потока (ГДТП):
 1 – бруски висмута; 2 – подложка из слюды; 3 – места пайки висмутом;
 4 – токовыводы; 5 – лавсановая изоляция

ного луча 2 с помощью системы цилиндрических линз). Цифровая камера 3 во время вспышек фиксирует изображение трассеров. Синхронную работу камеры и лазера обеспечивает блок синхронизации (на схеме не показан). Система позволяет регулировать подачу частиц (трассеров) и частоту фотографий в соответствии с режимом течения, чтобы минимизировать эффекты, связанные с действием сил инерции и плавучести.

Далее все фотографии обрабатывались

в программе ActualFlow, которая рассчитывает поле скорости и завихренности. Для определения перемещения частиц программа использует корреляционные методы обработки изображений. Метод PIV позволяет регистрировать мгновенные и рассчитать осредненные по времени поля скорости в плоскости лазерного ножа. В наших опытах использовалась классическая (2D) конфигурация метода, а количество фотографий составило 1000 пар.

При PIV-диагностике, связанной с об-

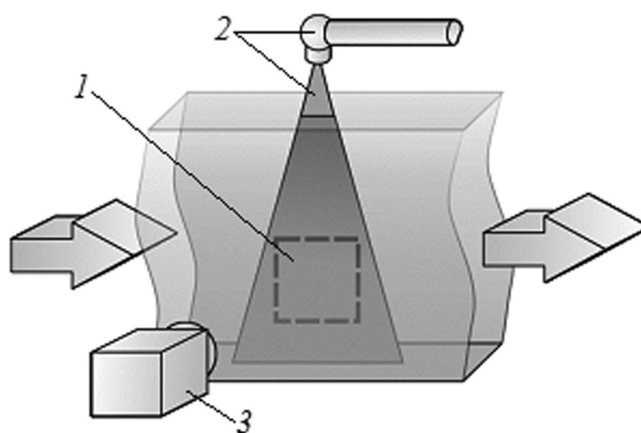


Рис. 2. Общая схема измерения скорости PIV-методом:
 1 – регистрируемый поток с трассерами; 2 – лазер и лазерный нож; 3 – цифровая камера;
 стрелки указывают направление потока

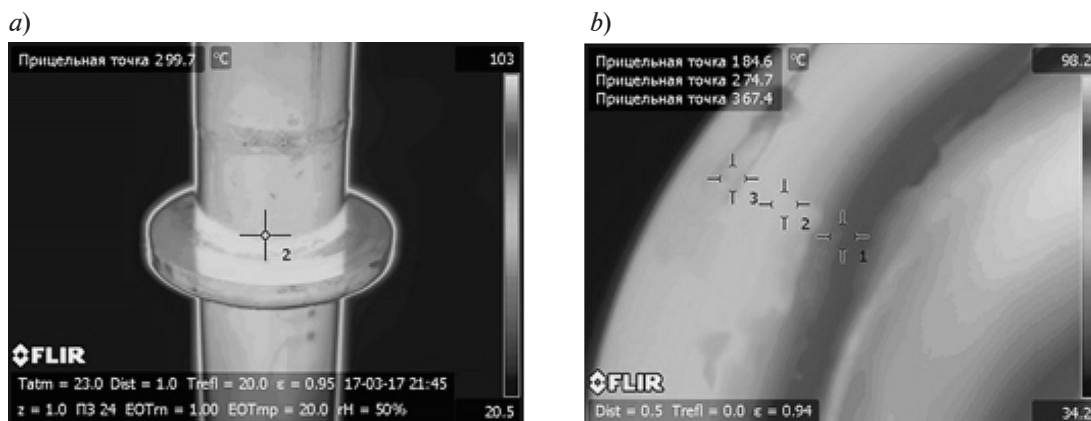


Рис. 3. Тепловизионные фотографии цилиндра с изотермическим ребром (a) и фрагмента неизотермического ребра (b); показаны прицельные температурные точки в местах установки датчиков

течением нагретых моделей, выяснилось, что дым, генерируемый штатным устройством, непригоден [12]. Взвешенные масляные трассеры диаметром 1 – 5 мкм над нагретой поверхностью успевали испариться, и визуализация течения в пристенном слое становилась невозможной. Поэтому в качестве трассеров мы использовали твердые частицы древесного дыма из дыма пачечника.

Для борьбы с бликами от лазера ребро и несущий цилиндр обрабатывались смесью индустриального масла, спирта и флуоресцирующего вещества родамин 6G, благодаря которому лазерный луч при отражении меняет длину волны, по сравнению с падающим. Отраженный свет фильтровался

узкополосным зеленым фильтром, установленным на фотокамере.

Тепловизионная диагностика. Для измерения температуры поверхности ребра был использован тепловизор FLIR P640 (Forward-Looking Infrared). Тела, температура которых отлична от абсолютного нуля, излучают электромагнитные тепловые волны. Спектральная плотность мощности этого излучения имеет максимум, длина волны которого зависит от температуры. Положение максимума в спектре излучения сдвигается с повышением температуры в сторону меньших длин волн. Тела, нагретые до температур 40 – 100 °C, характеризуются максимумом излучения в среднем инфракрасном диапазоне. Программное обеспе-

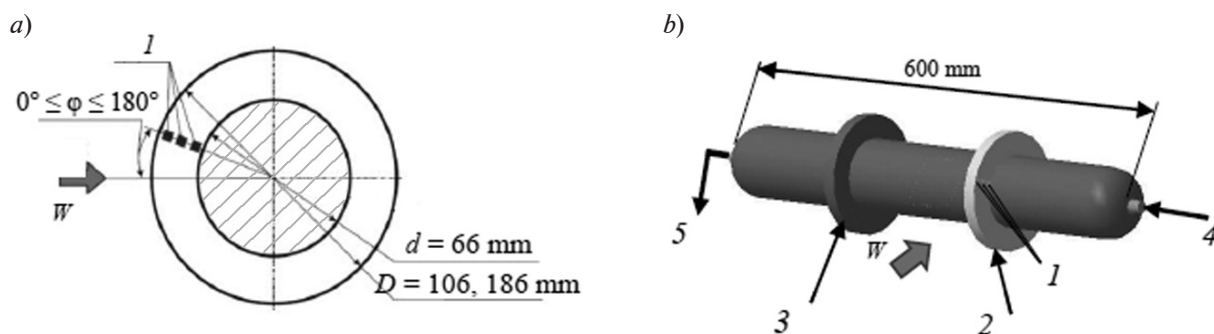


Рис. 4. Схематические представления опытной модели оребренного цилиндра: a – чертеж поперечного сечения; b – общий внешний вид; 1 – три ГДТП; 2, 3 – изотермическое и неизотермическое ребра, соответственно; 4 – подача пара; 5 – слив конденсата. Высота ребер $H = 20$ и 60 мм; W – вектор набегающего воздушного потока

чение камеры позволяло одновременно измерять температуру в нескольких точках на поверхности ребер практически без задержки во времени и с точностью в 1 К. В качестве примера на рис. 3 приведены две тепловизионные фотографии.

Экспериментальная установка

Экспериментальная модель объекта исследования. Исходная модель представляла собой оребренный цилиндр диаметром 66 мм и длиной 600 мм, изготовленный из стального листа толщиной 0,1 мм. На цилиндре были смонтированы два кольцевых ребра диаметром $D = 106$ мм. Первое ребро было полым и моделировало идеальное (изотермическое) ребро, а второе, выполненное из титанового сплава (теплопроводность $\lambda = 9$ Вт/(м·К)), моделировало неизотермическое ребро.

Вторая модель была сделана аналогично, но внешний диаметр ребер составил $D = 186$ мм. ГДТП устанавливались на поверхности ребер (рис. 4). Градуировка ГДТП на стенде, описанном в работе [10], обеспечивала достаточную точность измерения плотности теплового потока [14], при этом суммарная стандартная неопределенность не превышала 1 %.

Изнутри модель нагревалась насыщенным водяным паром при атмосферном давлении с температурой, близкой к 100 °С.

Цилиндр проворачивался вокруг оси, что позволяло перемещать ГДТП в окружающем направлении. Температура на поверхности идеального ребра $T_w = \text{const}$ при всех значениях угла поворота $0 \leq \varphi \leq 180^\circ$ (рис. 4, а); она дополнительно контролировалась тепловизором. Температура T_w ребра 3 (изготовлено из титанового сплава), которая зависит от высоты ребра H и угловой координаты φ , также измерялась тепловизором.

Модель устанавливалась на поворотном столе, что позволяло менять угол β между вектором набегающего потока W и осью цилиндра.

Аэродинамическая труба. Опыты проводились в рабочей зоне дозвуковой аэродинамической трубы (рис. 5), разработанной, изготовленной и испытанной на кафедре «Теплофизика энергетических установок» СПбПУ [9].

Труба открытого типа снабжена камерой Эйфеля из оргстекла, обеспечивающей реализацию PIV-технологии. Поток воздуха от центробежного вентилятора через охладитель поступает в обратный канал. Благодаря повороту с лопатками воздух попадает в форкамеру с хонейкомбом. Конфузор обеспечивает поджатие 1 : 7; через круглое выходное отверстие диаметром 450 мм воздух подается в камеру Эйфеля и далее – на вход в вентилятор.

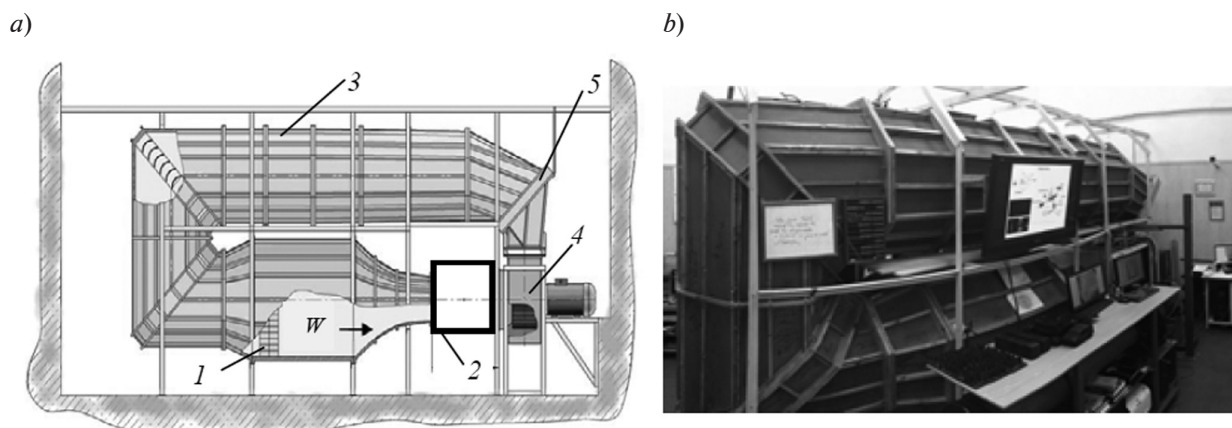


Рис. 5. Схематическое изображение (а) и внешний вид (б) аэродинамической трубы, использованной в опытах:

1 – форкамера, 2 – камера Эйфеля, 3 – обратный канал, 4 – вентилятор, 5 – теплообменник;
 W – вектор набегающего воздушного потока

Труба имеет две особенности: использование тиристорного привода и реверс вентилятора позволяют вести опыты при скоростях, не превышающих 0,1 – 0,2 м/с;

охладитель, подключенный к системе холодного водоснабжения, обеспечивает длительную работу трубы на воздухе, практически не меняющем температуру (разброс значений составляет ±0,1 К).

Охладитель увеличивает сопротивление аэродинамической трубы на 500 Па, в результате чего падает скорость в рабочей части, поэтому он выполнен в виде сменной кассеты, которую при кратковременных опытах можно удалить и заменить кассетой с направляющими лопатками.

Для снижения турбулентности воздушного потока в трубе установлены лопаточные аппараты в поворотах, а также хоней-

комб и конфузور. Степень турбулентности не превышает 1 % во всем диапазоне скоростей [9].

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Аэродинамические исследования были проведены для чисел Рейнольдса $Re = (0,4 - 4,1) \cdot 10^4$. Это число выражается следующим образом:

$$Re = \frac{W \cdot d}{\nu},$$

где W , м/с – скорость потока; d , м – диаметр несущего цилиндра; ν , м²/с – кинематическая вязкость.

Определялись также местная плотность теплового потока q_ϕ (Вт/м²) в различных точках по высоте ребер с угловой координатой ϕ , местный коэффициент теплоотда-

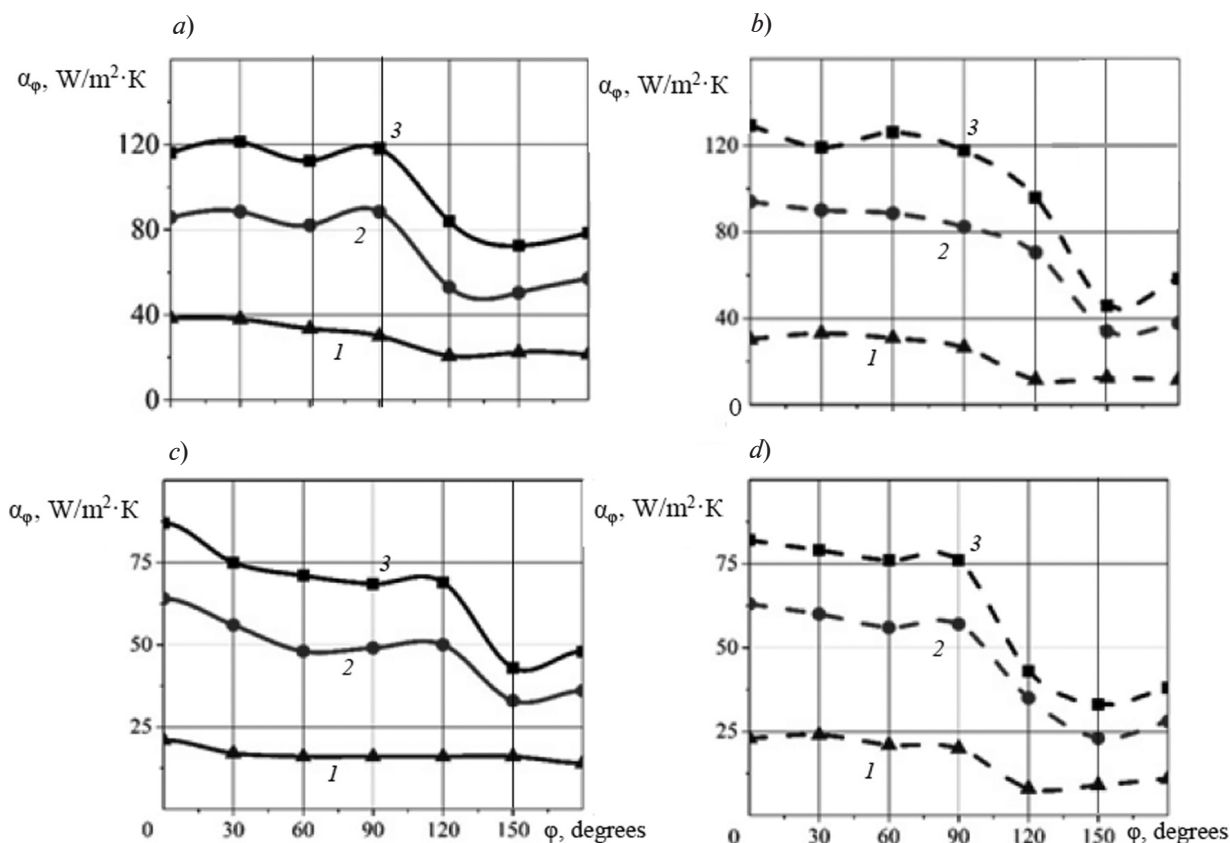


Рис. 6. Зависимости локального коэффициента теплоотдачи изотермического (a, c) и неизо- термического (b, d) ребер высотой 20 мм (a, b) и 60 мм (c, d) от угла поворота цилиндра ϕ для разных значений числа Рейнольдса Re , 10^4 : 0,9 (1), 2,2 (2), 4,1 (3)

чи α_ϕ (Вт/(м²·К)), местное число Нуссельта Nu_ϕ . Указанные характеристики определяются следующими формулами:

$$q_\phi = \frac{E}{S_0 \cdot F},$$

где E , мВ – сигнал ГДТП; S_0 , мВ/Вт – вольт-ваттная чувствительность датчика; F , м² – площадь ГДТП в плане;

$$\alpha_\phi = \frac{q_\phi}{T_f - T_w},$$

где T_f , T_w , °С – температуры потока воздуха и поверхности ребра, соответственно;

$$Nu_\phi = \frac{\alpha_\phi d}{\lambda_f},$$

где d , м – диаметр несущего цилиндра; λ_f , Вт/(м·К) – теплопроводность воздуха;

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

где α – значение α_ϕ , усредненное по высоте ребра.

На рис. 6 показаны зависимости местного коэффициента теплоотдачи α_ϕ на ребрах высотой $H = 20$ мм (изотермическом и неизотермическом) при разных углах ϕ и для различных режимов. Видно, что величина α_ϕ по высоте изотермического ребра изменяется значительно меньше, чем та же величина для ребра, выполненного из титанового сплава. Для сплошного ребра величина α_ϕ около корня оказывается при всех значениях угла ϕ меньше, чем для полого.

На рис. 6 также приведены зависимости

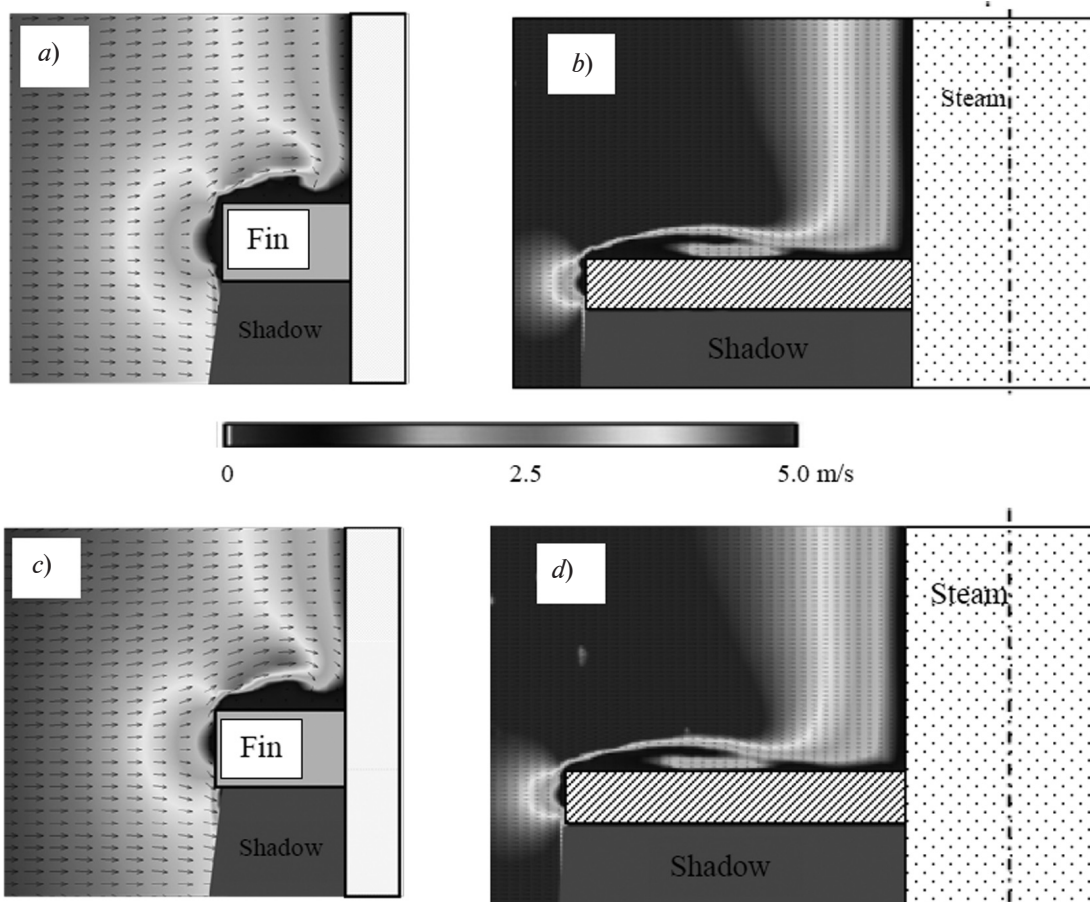


Рис. 7. Поля скорости около ребер высотой $H = 20$ мм (a, c) и 60 мм (b, d) для чисел Рейнольдса $Re = 2,2 \cdot 10^4$ (a, b) и $4,1 \cdot 10^4$ (c, d)

местного коэффициента теплоотдачи для ребра высотой 60 мм. Распределения α_{ϕ} для идеального и неидеального ребер различаются значительно, чем для ребра высотой 20 мм.

Видно, что эпюра распределения коэффициента теплоотдачи идеального ребра оказывается более заполненной, чем неидеального, однако у вершин ребер теплоотдача значительно ниже, чем в остальной части. Это объясняется наличием у ребра острой кромки достаточно большой ширины ($\delta = 10$ мм). Около кромки образуется застойная зона, о чем свидетельствуют представленные выше картины течения.

Интересно отметить наличие экстремума зависимости коэффициента теплоот-

дачи α от координаты h , соответствующей месту монтажа; экстремум наблюдается при $h = 20$ мм как для идеального, так и для неидеального ребер. Его объяснение требует дополнительного исследования. Внимания заслуживает и тот результат, что коэффициент теплоотдачи около корня ребра из титанового сплава крайне мал: в области $\phi = 120 - 180^\circ$ при скорости свободного потока $W = 0,9$ м/с $\alpha = 1 - 4$ Вт/(м²·К). Это можно объяснить разницей температуры на поверхности несущего цилиндра, обогреваемого паром (100 °С), и у корня ребра (85 - 92 °С); температура последнего ниже на 8 - 15 °С ввиду значительного контактного термического сопротивления.

На рис. 7 показаны усредненные поля

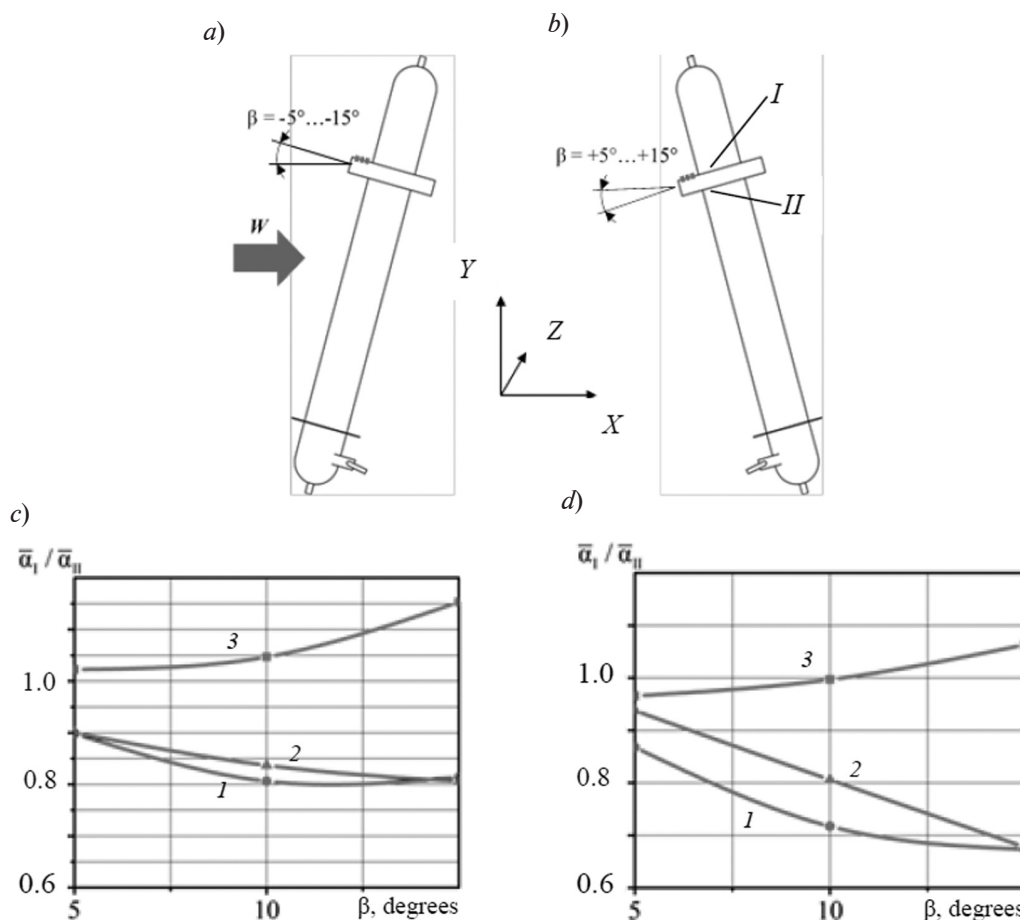


Рис. 8. Схематичное представление модели цилиндра с ребром в двух положениях (a, b) и графики зависимостей безразмерного коэффициента теплоотдачи от угла β для изотермического (c) и неизотермического (d) ребер, а также для разных значений числа Рейнольдса $Re 10^4$: 0,9 (1), 2,2 (2), 4,1 (3)

скорости воздушного потока над ребрами различной высоты. Векторы показывают направление потока в сечении светового ножа.

Полученные картины течения для ребра высотой $H = 20$ мм достаточно хорошо согласуются с результатами исследовательской работы [1]. Объяснить распределение местного коэффициента теплоотдачи по высоте ребра лишь на основе осредненных картин течения практически невозможно. Для объяснения различий в поведении величины α для идеального и неидеального ребер необходима постановка эксперимента, обеспечивающая одновременную запись картин течения, значений плотности теплового потока и температуры. Методика совместного использования теплотрии и PIV-диагностики разработана и применена в работе [5].

Визуализация течения около ребра высотой 60 мм на рис. 7, *b*, *d* иллюстрирует зону застоя у вершины ребра и вихрь на середине его высоты. Можно сделать вывод,

что форма пограничного слоя в этих случаях имеет общую структуру течения, что соответствует результатам работы [1]. Наши PIV-исследования для ребра высотой 60 мм показали наличие вихря, представленного на рис. 8. Максимум теплосъема достигается на координате $h = 20$ мм; он обусловлен возвратным вихрем, образованным при отрыве потока [3, 17].

На следующем этапе работы изучалось влияние угла атаки β между вектором скорости воздушного потока W и осью цилиндра на характеристики обтекания воздухом оребренного цилиндра. Рассматривалось ребро высотой 20 мм под углом атаки $\beta = 5 - 15^\circ$, в том же диапазоне чисел Рейнольдса [15].

Обтекание под углом относительно горизонтальной плоскости XZ в декартовой системе координат несимметрично. Цилиндр наклоняли под отрицательным углом атаки: $\beta = -(5 - 15)^\circ$ (рис. 8). Таким образом были измерены коэффициенты теплоотдачи на обеих сторонах ребра, что по-

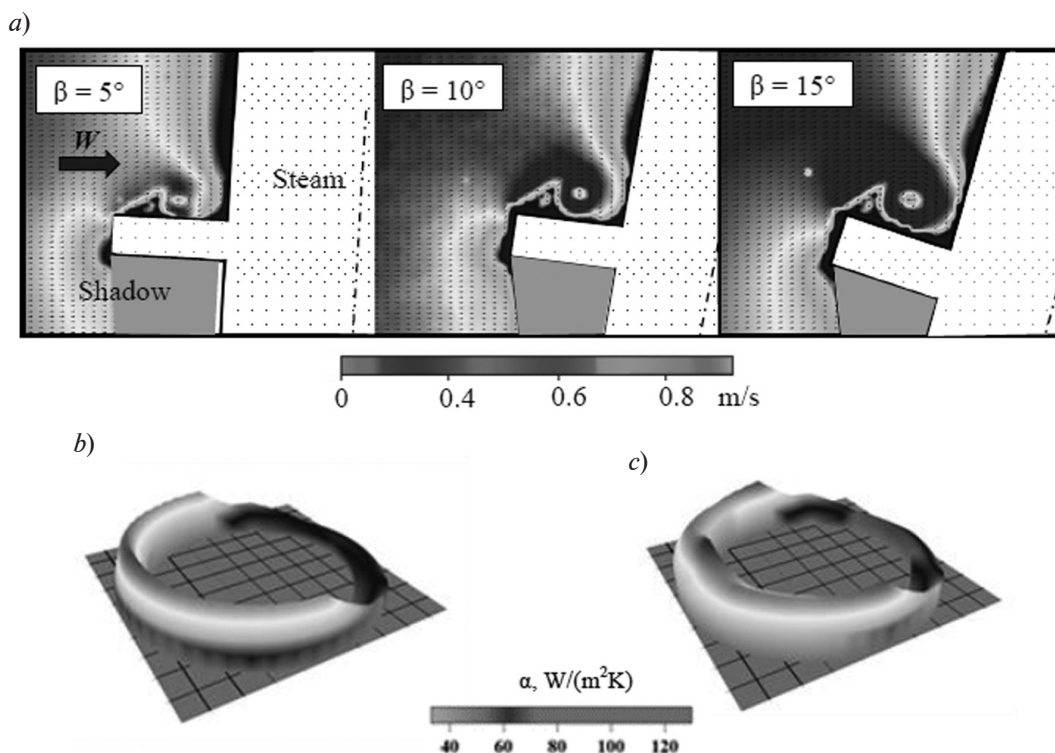


Рис. 9. Поля скорости вблизи изотермического ребра для $Re = 0,4 \cdot 10^4$ при различных углах атаки β (a), а также распределения коэффициента теплоотдачи α на верхней (b) и нижней (c) поверхностях неизотермического ребра при $\beta = 5^\circ$ и $Re = 2,1 \cdot 10^4$



зволило усреднить их по всей поверхности теплообмена.

На рис. 8 видно, что вклад среднего коэффициента теплоотдачи на нижней поверхности (I) больше, чем на верхней (J), и увеличивается с ростом угла атаки. При возрастании скорости потока наблюдается противоположная картина: наибольший вклад в средний коэффициент теплоотдачи вносит верхняя поверхность ребра (J). Получено также распределение местного коэффициента теплоотдачи по высоте изотермического и неизотермического ребер.

Анализ полей скорости, полученных при помощи PIV-диагностики, позволяет утверждать, что при изменении угла β зоны застоя и зоны с отрывными вихрями смещаются (рис. 9) с верхней поверхности на нижнюю и наоборот, а в сумме дают примерно одинаковый средний коэффициент теплоотдачи.

На рис. 9, *b*, *c* показаны также распределения коэффициента теплоотдачи по высоте неизотермического ребра в диапазоне измерений ГДТП (5, 10 и 15 мм от корня ребра) для угла $\beta = 5^\circ$ и числа Рейнольдса $Re = 2,1 \cdot 10^4$. Распределения показаны отдельно для верхней (*b*) и нижней (*c*) поверхностей ребра, так как при $\beta \neq 0$ оно несимметрично.

Заключение

На основе двух специально изготовленных моделей проведено всестороннее исследование аэродинамических и теплотеметрических характеристик металлического цилиндра, снабженного ребрами, в условиях его внутреннего подогрева и обтекания воздушным потоком. В результате проведенных измерений получены поля скорости потока вблизи изотермического и неизотермического ребер, температурное поле на его поверхности, а также значения

плотности теплового потока. Анализ этих данных позволил получить важную информацию об аэродинамических и тепловых свойствах потоков вблизи поверхности ребра. Основные итоги проделанного исследования следующие:

выявлено влияние высоты ребра на структуру потока и распределение коэффициента теплоотдачи;

показано, что на поверхности изотермического ребра при изменении угла атаки средний коэффициент теплоотдачи практически не изменяется во всем исследованном диапазоне чисел Рейнольдса, тогда как на поверхности неизотермического ребра его увеличение достигает 6,5%;

для значения числа Рейнольдса $Re = 4000$ средний коэффициент теплоотдачи на верхней поверхности ребра больше, чем на нижней, и он увеличивается с ростом угла атаки β (в случае $\beta > 0$). Когда скорость набегающего потока растет, наибольший средний коэффициент теплоотдачи достигается на нижней поверхности ребра;

в области углов поворота цилиндра $\varphi = 120 - 240^\circ$ коэффициент теплоотдачи резко снижается для всех режимов.

Впервые показана возможность совместного применения градиентной теплотеметрии, PIV- и тепловизионной диагностики для измерения коэффициента теплоотдачи на неизотермической поверхности. Такой подход позволяет исследовать поток и теплообмен на поверхности ребра в режиме реального времени и открывает новые возможности для аэродинамических и теплотеметрических исследований. Например, в дальнейшем следует рассмотреть аналогичную модель, содержащую сегментные ребра, в частности раскрытые на угол $\varphi = 120 - 240^\circ$ по пути большей дуги.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Письменный Е.Н. Теплообмен и аэродинамика пакетов поперечно оребренных труб. Киев: Альтерпрес, 2004. 244 с.
2. Hamakawa H., Matsuoka H., Hosokai K., Nishida E., Kurihara E. Characteristics of aerodynamics sound radiated from two finned

1. cylinders // Proc. of the ASME-2014 "Pressure Vessels and Piping Conf.". Anaheim, California, USA: ASME, 2014. Vol. 4. P. V004T04A073.

3. Bansal M. Experimental and numerical investigation of three equispaced cylinders in cross-flow. Master's thesis. Waterloo, Ontario, Canada:

University of Waterloo, 2014.

4. **Дрейцер Г.А.** О некоторых проблемах создания высокоэффективных трубчатых теплообменных аппаратов // *Новости теплоснабжения*. 2004. № 5 (45). С. 37–43.

5. **Легкий В.М., Жолудов Я.С., Геращенко О.А.** Локальный теплообмен одиночной поперечно омываемой круглой трубы с внешним кольцевым оребрением // *Инженерно-физический журнал*. 1976. Т. 30. № 2. С. 274–280.

6. **Жукаускас А.А., Улинскас Р.В., Зинявичюс Ф.В.** Местные характеристики теплоотдачи и обтекания шахматных пучков ребристых труб // *Труды АН Литовской ССР. Сер. Б*. 1984. Т. 2. № 141. С. 46–53.

7. **McClure Jeff.E.J.** On the planar flow development and structural loading of cylinders with circular fins in cross-flow. Waterloo, Ontario, Canada: University of Waterloo, 2015.

8. **Webb R.L., Nae-Hyun Kim.** Principles of enhanced heat transfer. New York: Taylor&Francis Group, 2005.

9. **Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В.** Градиентные датчики теплового потока. СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2003. 168 с.

10. **Heinz O., Pyushin B., Markovich D.** Application of a PDF method for the statistical processing of experimental data // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2004. Vol. 25. No. 5. Pp. 864–874.

11. **Gusakov A.A., Kosolapov A.S., Markovich D.M., Mityakov A.V., Mityakov V.Y.,**

Mozhayskiy S.A., Nebuchinov A.S., Sapozhnikov S.Z. Simultaneous PIV and gradient heat flux measurement of a circular cylinder in cross-flow // *Appl. Mech. Mater.* 2014. Vol. 629. Pp. 444–449.

12. **Походун А.И.** Экспериментальные методы исследований. Погрешности и неопределенности измерений. СПб.: Изд. СПбГУ ИТМ, 2006. 112 с.

13. **Sparrow E.M., Gorman J.M., Friend K.S., Abraham J.P.** Flow regime determination for finned heat exchanger surfaces with dimples/protrusions// *Numerical Heat Transfer. Part A. Applications*. 2013. Vol. 63. No. 4. Pp. 245–256.

14. **Samie F., Sparrow E.M.** Heat transfer from a yawed finned tube // *Journal of Heat Transfer*. 1986. Vol. 108. No. 2. Pp. 479–482.

15. **Sumner D.** Flow above the free end of a surface-mounted finite-height circular cylinder // *Journal of Fluids and Structures*. 2013. Vol. 43. Pp. 41–63.

16. **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 Conf.* 2017. 3rd Siberian Thermophysical Seminar. 10 July 2017. STS. 2017. Vol. 115. No. 02006, Pp. 1–4.

17. **Mityakov A., Mityakov V., Sapozhnikov S., Gusakov A., Bashkatov A., Seroshtanov V., Zainullina E., Babich A.** Hydrodynamics and heat transfer of yawed circular cylinder // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2017. Vol. 115. Part A. December. Pp. 333–339.

Статья поступила в редакцию 27.02.2018, принята к публикации 03.05.2018.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ГУСАКОВ Андрей Александрович – кандидат технических наук, ассистент кафедры «Теплофизика энергетических установок» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
a.gusakov.spb@mail.ru

ГРЕКОВ Михаил Александрович – ассистент кафедры «Теплофизика энергетических установок» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
grekov66@yandex.ru

СЕРОШТАНОВ Владимир Викторович – ассистент кафедры «Теплофизика энергетических установок» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
vladvik1992@gmail.com

REFERENCES

- [1] **E.N. Pismennyy**, *Teploobmen i aerodinamika paketov poperechno-orebrennykh trub* [Heat exchange and aerodynamics of packages of cross-finned tubes], Alterpres, Kiev, 2004.
- [2] **H. Hamakawa, H. Matsuoka, K. Hosokai, et al.**, Characteristics of aerodynamics sound radiated from two finned cylinders, In: Proc. of the ASME 2014, Pressure Vessels and Piping Conference, Anaheim, California, USA, ASME. (4) (2014) V004T04A073.
- [3] **M. Bansal**, Experimental and numerical investigation of three equispaced cylinders in cross-flow, Master's thesis, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, 2014.
- [4] **G.A. Dreytser**, O nekotorykh problemakh sozdaniya vysokoeffektivnykh trubchatykh teploobmennykh apparatov [On some problems of creating high-efficiency tubular heat exchangers], *Novosti teplosnabzheniya*. (5(45)) (2004) 37–43.
- [5] **V.M. Legkii, Ya.S. Zholudov, O.A. Gerashchenko**, Local heat exchange of a single transversely round tube with external circular fins, *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 30 (2) (1976) 178–182.
- [6] **A.A. Zhukauskas, R.V. Ulinskas, F.V. Zinyavichyus**, Mestnyye kharakteristiki teplootdachi i obtekaniya shakhmatnykh puchkov rebristykh trub [Local characteristics of heat transfer and flow around the staggered banks of finned tubes], *Trudy AN Lit. SSR, Ser. B. 2* (141) (1984) 46–53.
- [7] **Jeff.E.J. McClure**, On the planar flow development and structural loading of cylinders with circular fins in cross-flow, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, 2015.
- [8] **R.L. Webb, Nae-Hyun Kim**, Principles of enhanced heat transfer, Taylor&Francis Group, New York, 2005.
- [9] **S.Z. Sapozhnikov, V.Yu. Mityakov, A.V. Mityakov**, Gradiyentnyye datchiki teplovogo potoka [Gradient heat flux sensors], Izd-vo SPbSPU, St. Petersburg, 2003.
- [10] **O. Heinz, B. Ilyushin, D. Markovich**, Application of a PDF method for the statistical processing of experimental data, *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 25 (5) (2004) 864–874.
- [11] **A.A. Gusakov, A.S. Kosolapov, D.M. Markovich, et al.**, Simultaneous PIV and gradient heat flux measurement of a circular cylinder in cross-flow, *Appl. Mech. Mater.* 629 (2014) 444–449.
- [12] **A.I. Pokhodun**, Eksperimentalnyye metody issledovaniy. Pogreshnosti i neopredelennosti izmereniy [Experimental methods of research. Errors and uncertainties in measurements], SPbGU ITM, St. Petersburg, 2006.
- [13] **E.M. Sparrow, J.M. Gorman, K.S. Friend, J.P. Abraham**, Flow regime determination for finned heat exchanger surfaces with dimples/protrusions, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*. 63(4) (2013). 245–256.
- [14] **F. Samie, E.M. Sparrow**, Heat transfer from a yawed finned tube, *Journal of Heat Transfer*. 108 (2) (1986) 479–482.
- [15] **D. Sumner**, Flow above the free end of a surface-mounted finite-height circular cylinder, A review, *Journal of Fluids and Structures*. 43 (2013) 41–63.
- [16] **A. Mityakov, A. Babich, A. Bashkatov, et al.**, Investigating heat transfer augmentation using gradient heat flux measurement and PIV method, MATEC Web of Conferences, 2017, 3rd Siberian Thermophysical Seminar, STS 2017, 115 (10 July) (2017), No. 02006, 1–4.
- [17] **A. Mityakov, V. Mityakov, S. Sapozhnikov, et al.**, Hydrodynamics and heat transfer of yawed circular cylinder, *Int. J. Heat Mass Transf.* 115A (December) (2017) 333–339.

Received 27.02.2018, accepted 03.05.2018.

THE AUTHORS

GUSAKOV Andrey A.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation
a.gusakov.spb@mail.ru

GREKOV Mikhail A.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation
grekov66@yandex.ru

SEROSHTANOV Vladimir V.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation

vladvik1992@gmail.com