УДК 536.24

ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ПЕРИОДОВ НА ТЕПЛООТДАЧУ НАСАДКИ РЕГЕНЕРАТИВНОГО ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛЯ

Ю.А. Кирсанов¹, Д.В. Макарушкин¹, А.Ю. Кирсанов²

¹Институт энергетики и перспективных технологий – структурное подразделение
ФИЦ «Казанский научный центр РАН», г. Казань, Россия

²Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева, г. Казань, Россия

Резюме: Описан лабораторный стенд с регенеративным воздухоподогревателем, автоматизированной системой управления и измерения параметров воздушных потоков и насадки, предназначенный для исследования теплоотдачи пакета параллельных пластин в нестационарных условиях при разной длительности периодов. Разработана методика измерения нестационарной температуры потоков холодного и горячего теплоносителей с учетом инерционности термодатчиков и методика измерения коэффициента теплоотдачи пластин. Показаны изменения во времени значений числа Нуссельта и тепловой нагрузки, передаваемой насадкой, за отдельные периоды. Полученные в опытах с пакетами пластин из разных материалов и толщин значения среднего за период числа Нуссельта обобщены критериальным уравнением, удобным для инженерных расчетов РВП с листовыми насадками различных типов.

Ключевые слова: лабораторный стенд, регенеративный воздухоподогреватель, нестационарные процессы, измерения, температура, теплоотдача, критериальное уравнение.

Благодарности: Работа выполнена по Договору о творческом сотрудничестве между КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева и Казанским научным центром РАН № 7 от 28.01.2015 г.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-7-8-35-46

INFLUENCE OF THE SWITCHING PERIODS FREQUENCY ON THE THERMAL EMISSIVITY OF A REGENERATIVE AIR PREHEATER

Yu.A. Kirsaniov¹, D.V. Makarushkin¹, A.Yu. Kirsanov²

¹Institute of Power Engineering and Advanced Technologies – structural subdivision of the
Federal Research Center "Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences",
Kazan, Russia

²Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev
Kazan, Russia

Abstract: A laboratory stand with a regenerative air preheater, an automated control system and measurement of airflow parameters and a nozzle designed to study the heat transfer of a packet of parallel plates under non-stationary conditions for different periods is described. The technique of measuring the unsteady temperature of cold and hot coolant flows adjusted for inertia of the thermocouples and the method of measuring the heat transfer coefficient of plates. The time variations of the Nusselt number and the heat load transmitted by the nozzle for

individual periods are shown. Obtained in experiments with the packages of plates of different materials and thickness values of the average Nusselt number for the period criterial generalized equation for convenient engineering calculations RAPH with leaf nozzles of various types.

Keywords: *laboratory stand, regenerative air preheater, unsteady process, measurement, temperature, thermal emissivity, criterial equation.*

Acknowledgments: *The work was carried out under the Treaty on Creative Cooperation between the FSSEI HPE Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev and the FSBIS Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences No. 7 of January 28, 2015.*

Введение

Одной из задач, стоящих перед разработчиками регенеративных воздухоподогревателей (РВП), является оптимизация частоты переключения периодов, или частоты регенерации. В настоящее время теория РВП учитывает влияние этой величины на теплопередачу в РВП за счет влияния переходных термических процессов в насадке, следствием которых является изменение температуры насадки за цикл в виде петли гистерезиса: чем выше частота, тем уже петля гистерезиса и тем выше коэффициент теплопередачи [1–3]. При этом коэффициенты теплоотдачи поверхностей насадки считаются постоянными и равными их значениям в стационарных условиях [1; 2]. Однако известно, что нестационарный характер внешних условий качественно и количественно влияет на локальную теплоотдачу [4–6]. Поэтому осредненный за период коэффициент теплоотдачи насадки, который важен для расчетчиков и конструкторов РВП, становится зависимым, помимо прочих факторов, также и от длительности периодов, то есть от частоты регенерации [3; 7]. В настоящее время эта зависимость изучена недостаточно полно.

Работа посвящена экспериментальным исследованиям влияния длительности периодов на среднее за период значение коэффициента теплоотдачи поверхностей плоских пластин, равноотстоящих друг от друга и собранных в пакет, описанию лабораторного стенда, методики эксперимента и обработки данных.

Лабораторный стенд

Центральным элементом стенда является лабораторный РВП переключающегося типа. Стенд также содержит нагнетатели воздуха 1 (рис. 1), воздухопроводы 2 с расходомерами 3, нагреватель 4, блок перемещения, систему автоматического управления (САУ) и автоматизированную систему измерения (АИС). Корпус РВП отформован из стеклопластика и имеет фланцевый разъем для монтажа внутри него исследуемой насадки в виде пакетов пластин, устанавливаемых во внутренней полости корпуса квадратного сечения 50 × 50 мм. Во входном и выходном патрубках корпуса установлены по три термопары 14, предназначенных для измерения нестационарных температур потоков воздуха на входе и выходе РВП, и штуцеры для измерения перепада давления (на рис. 1 не показаны). Помимо термопар 14 для измерения стационарных температур потоков перед рабочим участком предусмотрены штатные термометры 7. Расход воздуха измеряется с помощью сужающих устройств [8] с манометрами 8 и дифференциальными манометрами 9.

САУ предназначена для управления переключением потоков, то есть для периодического подключения РВП к патрубкам холодного и горячего воздухопроводов. Управление осуществляется контроллером и электроприводами 6 и 12. Тяговый двигатель 12 перемещает РВП по направляющим 10 до оси того или иного воздуховода. В крайнем положении срабатывает концевой выключатель, сигнал от которого поступает на

контроллер, включающий через полевой транзистор прижимной двигатель 6. Последний с помощью стакана 11 прижимает торец корпуса рабочего участка к патрубку воздуховода. Через заданное время, устанавливаемое предварительно оператором, контроллер подает управляющий сигнал на прижимной двигатель 6, который возвращается в исходное состояние, освобождая рабочий участок. Под действием пружин каретки (на рис. 1 не показаны) рабочий участок отжимается от патрубка воздуховода, и в этот момент контроллер подает управляющий сигнал на тяговый двигатель, который через тягу 13 перемещает каретку в другое крайнее положение – напротив патрубка другого воздуховода. Происходит срабатывание другого концевого выключателя, и все операции повторяются. Прижимные стаканы 11 имеют отверстия для свободного выхода воздуха из рабочего участка. Для исключения присосов к патрубкам воздухопроводов приклеены эластичные прокладки из силиконовой резины, к которым прижимаются торцы рабочего участка.

Рис. 1. Схема стенда

1 – нагнетатели; 2 – воздуховоды; 3 – расходомеры; 4 – электронагреватель; 5 – РВП; 6 и 12 – электроприводы; 7 – термометры; 8 – манометры; 9 – дифференциальные манометры; 10 – направляющие; 11 – прижимные стаканы; 13 – тяга; 14 – термопары

АИС включает в себя персональный компьютер (ПК) и устройство ввода-вывода фирмы *National Instruments PCI-6251*, подключаемое к *PCI*-шине ПК [9]. Для создания программного обеспечения АИС использована среда графического программирования *LabVIEW* (Номер лицензионного соглашения: 777455-03. Серийный номер: M71X16236). Регистрация показаний термопар, давлений и перепадов давления (в Мв) на манометрах 8, 9 и РВП производилась с точностью до четвертого знака после запятой с интервалом 0,02 с.

Параметры, регистрируемые АИС: температура потоков на обоих патрубках рабочего участка, температура пластины на ее концах и в средней части, перепады давления на расходомерах и РВП. Перевод показаний из мВ соответственно в градусы и кгс/м² осуществлялся по индивидуальным калибровочным характеристикам термопар и датчиков давления. Показания барометра, штатных термометров и психрометра снимались «вручную». Температуры потоков и пластин измерялись ХК термопарами диаметром 0,2 мм. Спаи сваривались контактной сваркой. В пластинах делались канавки для укладки

термопар, которые после приварки спаев к пластине закрывались эпоксидной смолой заподлицо с поверхностью пластины.

Размеры исследуемых пластин: ширина 50 мм, длина 100 мм. Характеристики пакетов пластин даны в таблице.

Таблица

Массо-габаритные показатели пакетов пластинчатых насадок					
Материал	Количество пластин	Толщина δ_w , мм	Шаг h , мм	Эквивалентный диаметр $d_э$, мм	Масса M , кг
AISI-430	31	0,5	1,5	2,11	0,5795
	25	1	2	1,89	0,9104
	13	1	4	5,02	0,4734
	13	2	4	3,32	0,9453
12X18P10E	31	0,5	1,5	2,11	0,5776
АМц	30	0,5	1,55	2,21	0,1906

Для изучения влияния свободной конвекции на теплоотдачу опыты проводились при вертикальном и горизонтальном положении пластин в пакете.

Методика измерения коэффициента теплоотдачи

Коэффициент теплоотдачи поверхности насадки в отдельном периоде находится по формуле

$$\alpha = \frac{Q}{F_w(\bar{T}_f - \bar{T}_w)}, \quad (1)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²К); Q – тепловая нагрузка, передаваемая через насадку от горячего теплоносителя холодному, Вт; F_w – полная поверхность насадки, м²; $\bar{T}_f = (T_f' - T_f'')/2$ – средняя температура теплоносителя, °С; T_f' и T_f'' – температуры теплоносителя на входе и выходе рабочего участка в рассматриваемом периоде, °С; $\bar{T}_w$ – средняя температура насадки, °С.

Тепловая нагрузка, передаваемая насадкой в текущий момент времени,

$$Q_w = M_w c_w \frac{dT_w}{d\tau}. \quad (2)$$

Здесь M_w – масса насадки, кг; c_w – удельная теплоемкость насадки, Дж/(кг К); T_w – средняя температура насадки, К.

Средние за период коэффициенты теплоотдачи в холодном и горячем периодах цикла находятся так же по формуле (1), где

$$Q \equiv Q_w = M_w c_w \left| T_w(\tau=0) - T_w(\tau=\tau_p) \right| / \tau_p. \quad (3)$$

Здесь $T_w(\tau=0)$ и $T_w(\tau=\tau_p)$ – температура пластин в начале и конце периода соответственно, °С.

Измерение температур потоков

Результаты прямых измерений температур пластин и теплоносителей за цикл в одном из опытов показаны значками на рис. 2. Обращает на себя внимание разный характер зависимости от времени температур пластин и теплоносителей: если первые изменяются почти линейно, то для теплоносителей более подходит экспоненциальный закон с резким изменением в начале периода. В условиях резкого изменения температур потоков,

омывающих термопары, показания АИС содержат погрешность, обусловленную инерционностью термопар. Эта погрешность должна учитываться, прежде всего, в начальный отрезок времени (переходный период) длительностью τ_{rel} , в течение которого происходит наиболее резкое изменение температуры.

Рис. 2. Изменения за цикл температур в опыте с пластинами толщиной 0,5 мм и периодом, длительностью $\tau_p \approx 2,5$ с: 1-6 — пластины; 7-14 — теплоносителей; 7, 8, 9, 10 — на входе в рабочий участок; 11, 12, 13, 14 — на выходе из рабочего участка; значки 1, 3, 5, 7, 9, 11 и 13 — результаты прямых измерений АИС; линии 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 — расчеты по уравнениям регрессии (13) и (14).

Согласно методике измерения нестационарных температур потоков [10–13] поправка на инерционность термодатчика находится из решения уравнения теплопроводности для спая термопары [11]:

$$d\theta/dt + \theta/t_* = \theta_f/t_* , \quad (4)$$

где $\theta = (T - T_\infty)/T_*$; $t = \tau/\tau_p$; T — температура спая, К; T_∞ — температура теплоносителя в конце переходного периода, К; $T_* = (T_{\max} - T_{\min})/2$ — масштаб температуры, К; $T_{\max}$ и $T_{\min}$ — максимальная и минимальная температуры, соответственно, горячего и холодного потоков, К; τ — время от начала периода, с; τ_p — длительность рабочего периода, с; $t_* = \rho c V / (\alpha F)$ — характерное время термопары, с; ρ и c — плотность, кг/м³; F и V — площадь поверхности, м², и объем, м³, спая.

Коэффициент теплоотдачи спая термопары, необходимый для вычисления характерного времени термопары t_* , вычислялся по формулам [14]:

$$\alpha = Nu_l \lambda_f / l ,$$

$$\text{где} \quad Nu_l = Nu_{l,\min} + \sqrt{Nu_{lam}^2 + Nu_{tur}^2}; \quad Nu_{l,\min} = \begin{cases} 0,3 - \text{для цилиндра}, \\ 2 - \text{для шара}; \end{cases}$$

$$Nu_{lam} = 0,664 Re_l^{0,5} Pr_f^{1/3}; \quad Nu_{tur} = \frac{0,337 Re_l^{0,8} Pr_f}{1 + 2,443 Re_l^{-0,1} (Pr_f^{2/3} - 1)}; \quad Re_l = w_f l / \nu_f ;$$

$$l = \begin{cases} d_{tc} \pi / 2 & - \text{для цилиндра}, \\ d_{tc} & - \text{для шара}; \end{cases} \quad Pr = \nu_f / a_f ; \quad \lambda, \quad \nu_f \quad \text{и} \quad a_f \quad - \quad \text{коэффициенты,}$$

соответственно, теплопроводности, Вт/(м К), кинематической вязкости, м²/с, и температуропроводности, м²/с, воздуха в месте установки термопар.

Теплофизические свойства спаев термопар рассчитывались в предположении равенства объемных долей металлов [15–17]: $\rho = 8800$ кг/м³; $c = 424$ Дж/(кг К).

Общее решение обыкновенного дифференциального уравнения (4) [18]:

$$\theta(t) = \theta_0 \exp(-t/t_*) + \frac{1}{t_*} \int_0^t \theta_f(\eta) \exp\left(-\frac{\eta-t}{t_*}\right) d\eta. \quad (5)$$

Конкретное решение уравнения зависит от функции $\theta_f(t)$, определяющей истинную (искомую) зависимость температуры потока от времени. Непротиворечивый и монотонный характер поведения расчетной температуры потока получается при использовании экспоненциальной функции:

$$\theta_f(t) = \exp(a_0 + a_1 t). \quad (6)$$

Искомые коэффициенты a_0 и a_1 находятся из сопоставления решения (5) с уравнением регрессии, аппроксимирующим показания термопар $\theta_{tp}(t)$:

$$\theta_{tp}(t) = \sum_{l=0}^k b_l t^l, \quad (7)$$

где b_l – коэффициенты регрессии.

Интегрирование уравнения (5) после подстановки функции (6) дает выражение для расчетной температуры термопары:

$$\theta(t) = \theta_0 \exp(-t/t_*) + \exp(a_0) [\exp(a_1 t) - \exp(-t/t_*)] / (1 + a_1 t_*). \quad (8)$$

Для нахождения неизвестных a_0 и a_1 задаются два условия: равенство темпов изменения показаний термопары и ее расчетных значений в начале периода:

$$\frac{d\theta_{tp}(0)}{dt} = \frac{d\theta(0)}{dt} \quad (9)$$

и равенство средних за период температур:

$$\int_0^1 \theta_{tp}(t) dt = \int_0^1 \theta(t) dt. \quad (10)$$

Из условий (9) и (10) следуют уравнения, совместное решение которых дает искомые значения коэффициентов a_0 и a_1 :

$$a_0 = \ln(\theta_0 + b_1 t_*). \quad (11)$$

$$\theta_0 t_* [1 - \exp(-1/t_*)] + \frac{\exp(a_0)}{1 + a_1 t_*} \left\{ \frac{\exp(a_1) - 1}{a_1} - t_* [1 - \exp(-1/t_*)] \right\} = \bar{\theta}, \quad (12)$$

где $\bar{\theta}$ – средняя за период относительная температура потока.

Значения температур теплоносителей после корректировки показаний входных и выходных термопар на инерционность определяются выражением:

$$\theta_f = \theta_\infty \pm \exp(a_0 + a_1 t) + \sum_{l=0}^{k_f} c_l t^l, \quad (13)$$

где $\theta_\infty = (T_\infty - T_{\min})/T_*$; знаки «+» и «-» соответствуют холодному и горячему периодам, соответственно; c_l – коэффициенты полинома, определяющего температуру потока после переходного процесса.

Показания термопар, измеряющих температуру пластин, обобщены полиномиальным уравнением регрессии:

$$\theta_w = \sum_{l=0}^{k_w} d_l t^l. \quad (14)$$

Уравнения (13) и (14) показаны на рис. 2 сплошными линиями.

При аппроксимации опытных значений T_w порядок полинома (14) брался равным $k_w = 2$ в опытах с самым коротким периодом и $k_w = 3$ в остальных.

Результаты и их обсуждение

А. Текущие значения коэффициентов теплоотдачи насадки

Текущие значения тепловой нагрузки в отдельном опыте, полученные по формуле (2), показаны на рис. 3. Максимальное расхождение значений Q_w в холодном и горячем периодах одного из опытов составило $\pm 2\%$. Близость линий 1 и 2 на рис. 3 говорит об удовлетворительном соблюдении теплового баланса между периодами.

Рассчитанные по формуле (1) значения текущих коэффициентов теплоотдачи представлены на рис. 4. Характер зависимости коэффициента теплоотдачи от времени качественно согласуется с классическими представлениями [4], объясняющими такое поведение коэффициента теплоотдачи нарастанием во времени толщины пограничного слоя, стремящейся к установившемуся значению. Подобный характер изменения теплоотдачи пластины описывается и теоретическими исследованиями при скачкообразном изменении температуры теплоносителя [5; 6].

Рис. 3. Тепловая нагрузка, передаваемая насадкой, в опытах с пластинами толщиной 1 мм и $Re_{cold} \approx 1270$, $Re_{hot} \approx 1240$; 1 – $\tau_p \approx 2,5$ с; 2 – $\tau_p \approx 10$ с; сплошные линии – холодный период, пунктирные – горячий период

Рис. 4. Изменения числа Нуссельта за период в опытах, представленных на рис. 3. 3 – Nu_{st} [уравнение (14)]

Из рис. 4 следует, что, во-первых, сокращение длительности периодов способствует интенсификации теплоотдачи теплоносителей с насадкой, и, во-вторых, значения числа Нуссельта, рекомендованные для стационарных условий теплообмена [19]

$$Nu_{st} = 1,85 (Re Pr d_3 / l)^{1/3}, \quad (14)$$

находятся ниже полученных опытных значений числа Нуссельта.

Б. Средние за период значения коэффициентов теплоотдачи насадки

Произведена обработка результатов прямых измерений 198 опытов, выполненных с представленными в таблице пакетами пластин. В результате обработки по описанным выше

методикам измерения температур потоков теплоносителей и коэффициента теплоотдачи получено 396 средних за период значений чисел Нуссельта Nu .

Полученные значения Nu представлены на рис. 5. На рис. 5,а в логарифмических координатах показаны значения Nu в зависимости от Re . Значки соответствуют отдельным опытам, и линии – аппроксимирующим их зависимостям $Nu = f(Re)$ при конкретных значениях τ_p : темные значки и сплошные линии соответствуют холодным периодам, а светлые значки и пунктирные линии – горячим периодам. Расслоение линий на рис. 5,а свидетельствует о существовании зависимости Nu от τ_p и подтверждает вывод, сделанный выше, об интенсификации теплоотдачи по мере сокращения длительности периодов τ_p .

На следующем этапе полученный массив средних чисел Нуссельта был обобщен уравнением вида $Nu / (Pr d_3 / l)^{1/3} = f(Re, Gr, v_f / v_w, Fo)$. Выбор определяющих чисел подобия обусловлен необходимостью учесть влияние на теплоотдачу таких факторов, как: режим течения теплоносителей (Re), вклад свободной конвекции (Gr), неизотермичность потоков теплоносителей (v_f / v_w) и неизотермичность насадки, учитываемая числом Фурье $Fo = 4a_w \tau_p / \delta_w^2$, представляющим собой отношение длительности периода ко времени прохождения фронта температурной волны половины толщины пластины. Определяющие числа подобия в опытах изменялись в диапазонах: $522 \leq Re \leq 5771$, $87 \leq Gr \cdot 10^{-3} \leq 656$; $0,801 \leq v_f / v_w \leq 1,185$; $15,4 \leq Fo \leq 21940$.

Рис. 5. Средние за период числа Нуссельта:

а) $Nu = f(Re)$ при длительностях периодов τ_p : 1 – 40 с; 2 – 20 с; 3 – 10 с; 4 – 5 с; 5 – 2,5 с;

б) результаты обобщения значений Nu уравнением регрессии (15)

Регрессионный анализ показал несущественное влияние числа Грасгофа Gr и отношения v_f / v_w на $Nu / (Pr d_3 / l)^{1/3}$. Поэтому уравнение регрессии, обобщающее зависимость среднего за период числа Нуссельта от определяющих чисел подобия, приняло вид:

$$Nu / (Pr d_3 / l)^{1/3} = 3,33 Re^{0,338} \left(10^3 / Fo \right)^{0,062}. \quad (15)$$

Уравнению (15) соответствует линия на рис. 5,б. Коэффициент корреляции точек и линии составляет 0,932, а среднее квадратическое отклонение отдельных точек менее 6 %.

Критериальное уравнение (15) применимо только к насадке из гладких пластин. Однако его отношение к уравнению (14):

$$Nu/Nu_{st} = 1,8 \left(10^3 / Fo \right)^{0,062} \quad (16)$$

в первом приближении может быть распространено, по нашему мнению, и на другие листовые насадки, если под Nu_{st} понимать критериальное уравнение теплоотдачи для конкретной насадки в стационарных условиях. Диапазон чисел подобия, в котором применимо уравнение (16), составляет: $522 \leq Re \leq 5771$; $15,4 \leq Fo \leq 21940$.

В регенеративных воздухоподогревателях, например типа РВП-54, со стальными насадками из листов толщиной 0,5 (в горячей части) и 1 мм (в холодной части), при частоте вращения ротора от 1,5 до 3 об/мин число Фурье изменяется в пределах, примерно, от 2000 до 20000, а отношение Nu/Nu_{st} , согласно уравнению (16), может принимать значения в пределах от 1,5 до 1,72. Отсюда следует, что в условиях нестационарных тепловых процессов, протекающих в промышленных РВП, теплоотдача протекает в 1,5 и более раза интенсивнее, чем это предсказывают классические уравнения теплоотдачи для стационарных условий теплообмена.

Недооценка интенсивности теплоотдачи насадки РВП может отрицательно сказаться как на расчетах теплопередающей способности аппарата, так и на определении минимальной температуры подогрева воздуха в калорифере, при которой предотвращается конденсация содержащихся в дымовых газах паров тех или иных веществ, в первую очередь – паров серной кислоты. Поэтому уточнение значений коэффициентов теплоотдачи в РВП позволяет точнее оценивать диапазон изменений температуры насадки, что особенно актуально для парогенераторов, работающих на серосодержащих топливах – мазуте и каменном угле.

Выводы

1. Разработан автоматизированный стенд для исследований теплоотдачи пластин в течение коротких периодов разной длительности.
2. Применительно к условиям опытов разработана методика измерения нестационарных температур воздушных потоков с учетом инерционности термопар и методика измерения текущих и средних за период значений коэффициентов теплоотдачи поверхности пластин.
3. Получены зависимости текущих значений чисел Нуссельта в относительно коротких периодах, подтверждающие результаты известных теоретических и экспериментальных исследований.
4. Измерены и обобщены критериальным уравнением, удобным для инженерных расчетов, средние за период значения числа Нуссельта в короткие периоды времени для гладких пластин.
5. Предложено критериальное уравнение (16) для средней за период теплоотдачи листовых насадок различных типов в кратковременных процессах, применимое в диапазоне определяющих чисел подобия: $522 \leq Re \leq 5771$ и $15,4 \leq Fo \leq 21940$.

Литература

1. Хаузен Х. Теплопередача при противотоке, прямотоке и перекрестном токе / Пер с нем. И.Н. Дулькина. М.: Энергоиздат, 1981. 384 с.
2. Воздухоподогреватели котельных установок / Т.С. Добряков, В.К. Мигай, В.С. Назаренко, И.И. Надыров, И.И. Федоров. Л.: Энергия, 1977. 184 с.

3. Кирсанов Ю.А. Циклические тепловые процессы и теория теплопроводности в регенеративных воздухоподогревателях. М.: Физматлит, 2007. 240 с.
4. Кошкин В.К., Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. Нестационарный теплообмен. М.: Машиностроение, 1973. 328 с.
5. Виленский В. Д. Нестационарный конвективный теплообмен при внешнем обтекании тел. ТВТ. 1974. Том 12, №5. С. 1091–1104.
6. Padet J. Transient convective heat transfer. J. Braz. Soc. Mech. Sci. & Eng. 2005. Vol.27, n.1, pp.74-95.
7. Кирсанов Ю.А. Влияние нестационарности на теплоотдачу в регенеративном воздухоподогревателе // Изв. вузов. Авиационная техника. 2003. № 1. С. 31–34.
8. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества. Л.: Машиностроение, 1975. 776 с.
9. Кирсанов Ю.А., Кирсанов А.Ю., Юдахин А.Е. Измерение времени тепловой релаксации и демпфирования температуры в твердом теле // Теплофизика высоких температур, 2017. Т. 55, № 1, С. 122–128.
10. Ярышев Н.А. Теоретические основы измерения нестационарной температуры. Л.: Энергоатомиздат, 1990. 256 с.
11. Ahtmann M., von Wolfersdorf J., Meyer G. Application of the Transient Heat Transfer Measurement Technique in a Low Aspect Ratio Pin Fin Cooling Channel. ASME. J. Turbomach. 2015. 137 (12).
12. Bernhard F. Technische Temperaturmessung, Springer-Verlag, Berlin. 2004.
13. Garnier B, Lanzetta F. In situ realization/characterization of temperature and heat flux sensors. Advanced Spring School « Thermal Measurements & Inverse techniques », Domaine de Françon, Biarritz, March 1–6. 2015.
14. Справочник по теплообменникам: В 2 т. Т. 1. / Пер. с англ., под ред. Б.С. Петухова, В.К. Шикова. М.: Энергоатомиздат, 1987. 560 с.
15. Физические величины: Справочник / А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
16. Таблицы физических величин. Справочник / Под ред. акад. И.К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.
17. Никонов Н.В. Термопары. Типы, характеристики, конструкции, производство. М.: ООО «МТК Метотехника», 2015. 62 с.
18. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. М.: Наука, 1971. 576 с.
19. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: Справочное пособие. М.: Энергоатомиздат, 1990. 367 с.

Авторы публикации

Кирсанов Юрий Анатольевич – д-р техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник Института энергетики и перспективных технологий – структурного подразделения ФИЦ «Казанский научный центр Российской академии наук». E-mail: kirsanov-yury@mail.ru.

Макарушкин Данила Витальевич – аспирант Института энергетики и перспективных технологий – структурного подразделения ФИЦ «Казанский научный центр Российской академии наук». E-mail: atpp.danila@mail.ru.

Кирсанов Александр Юрьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Радиоэлектроника и информационно-измерительная техника» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ). E-mail: akirsanov@list.ru.

References

1. Wärmeübertragung im Gegenstrom, Gleichstrom und Kreuzstrom. Dr.-Ing. E.h. Helmuth Hausen em. Professor der Technischen Universität Hannover. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York 1976.
2. Air preheaters of boiler plants / Dobryakov T.S., Migai V.K., Nazarenko V.S., Nadyrov I.I., Fedorov I.I. - Leningrad: Energia, 1977. 184 p.
3. Kirsanov Yu.A. Cyclic thermal processes and the theory of thermal conductivity in regenerative air preheaters. Moscow: Fizmatlit, 2007. 240 p.
4. Koshkin V.K., Kalinin E.K., Dreitzer G.A., Yarkho S.A. Non-stationary heat transfer. Moscow: Mechanical Engineering, 1973. 328 p.
5. Vilensky V.D. Non-stationary convective heat exchange with external flow past bodies. // High Temperature. Vol. 12. No. 5. 1974.
6. Padet J. Transient convective heat transfer. J. Braz. Soc. Mech. Sci. & Eng. 2005. Vol.27. No.1. P.74-95.
7. Kirsanov Yu.A. Influence of Nonstationarity on Heat Transfer in the Regenerative Air Heater // Russian Aeronautics. 2003. No 1.
8. Kremlevsky P.P. Flowmeters and quantity counters. – Leningrad: Mashinostroenie, 1975. 776 p.
9. Kirsanov Yu.A., Kirsanov A.Yu., Yudakhin A.E. Measurement of Thermal Relaxation and Temperature Damping Time in Solid // High Temperature. 2017. Vol. 55. No. 1. P. 114–11.
10. Yaryshev N.A. Theoretical basis for measuring unsteady temperature. – Leningrad: Energoatomizdat, 1990. 256 c.
11. Ahtmann M., von Wolfersdorf J., Meyer G. Application of the Transient Heat Transfer Measurement Technique in a Low Aspect Ratio Pin Fin Cooling Channel. ASME. J. Turbomach. 2015. 137 (12).
12. Bernhard, F. Technische Temperaturmessung, Springer-Verlag, Berlin. 2004.
13. B Garnier, F Lanzetta. In situ realization/characterization of temperature and heat flux sensors. Advanced Spring School «Thermal Measurements & Inverse techniques ». Domaine de Françon. Biarritz. March 1-6. 2015.
14. Heat Exchanger Design Handbook. V. 1. Heat Exchanger Theory / Contr. D.B. Spalding, J. Taborek. – Hemisphere Publishing Corp. 1983.
15. Physical quantities: Handbook. / A.P. Babichev, N.A. Babushkina, A.M. Bratkovsky and others; Ed. I.S. Grigorieva, E.Z. Meilikhova. - Moscow: Energoatomizdat, 1991. 1232 p.
16. Tables of physical quantities. Handbook. Ed. I.K. Kikoin. – Moscow: Atomizdat, 1976. 1008 p.
17. Nikonov N.V. Thermocouples. Types, characteristics, designs, production. – Moscow: MTK Metotekhnika LLC, 2015. 62 p.
18. E. Kamke, Differential Gleichungen Lösungsmethoden und Lösungen. I. Gewöhnliche Differentialgleichungen. Leipzig, 1959.
19. Kutateladze S.S. Heat Transfer and Hydrodynamic Resistance: A Reference Manual. – Moscow: Energoatomizdat, 1990. 367 p.

Authors of the publication

Kirsanov Yuriy Anatol'evich – doctor of technical sciences, docent, leading researcher of Institute of Power Engineering and Advanced Technologies – structural subdivision of the Federal Research Center "Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences". E-mail: kirsanov-yury@mail.ru.

Makarushkin Danila Vital'evich – postgraduate student of Institute of Power Engineering and Advanced Technologies – structural subdivision of the Federal Research Center "Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences". E-mail: atpp.danila@mail.ru.

Kirsanov Alexander Yur'evich – PhD, docent of a department of “Electronics and information-measuring equipment” of Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev. E-mail: akirsanov@list.ru.

Поступила в редакцию

18 мая 2018 г.