

УДК 536.25

А. Б. Сухоцкий, В. Н. Фарафонов, С. О. Филатов, Г. С. Сидорик
Белорусский государственный технологический университет

РАЗРАБОТКА СТЕНДА И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ ОДИНОЧНОЙ ОРЕБРЕННОЙ ТРУБЫ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УГЛАХ НАКЛОНА

Разработан экспериментальный стенд для исследования свободной конвекции, состоящий из короба, калориметрической трубы и контрольно-измерительной аппаратуры. Опытным путем определены торцевые тепловые потери для биметаллической оребренной калориметрической трубы. Проведен эксперимент по исследованию гладкой калориметрической трубы со степенью черноты 0,66 и 0,99 и построена экспериментальная зависимость чисел Нуссельта от чисел Рейлея. Проведен эксперимент по исследованию свободной конвекции на калориметрической оребренной трубе со степенями черноты 0,66 и 0,99. Предложены расчетные формулы для учета лучистой составляющей в свободноконвективном теплообмене для оребренной калориметрической трубы. Построены экспериментальные зависимости чисел Нуссельта от чисел Рейлея для оребренной калориметрической трубы с различной степенью черноты. Проведены исследования теплоотдачи при свободной конвекции воздуха на одиночной оребренной калориметрической трубе с различными углами установки и построена экспериментальная зависимость чисел Нуссельта от чисел Рейлея. По результатам выполненных исследований были сделаны следующие выводы: разработанная экспериментальная установка позволяет качественно проводить исследования свободноконвективного теплообмена; получены расчетные зависимости, позволяющие вычислять свободноконвективный теплообмен для одиночной оребренной калориметрической трубы при различных углах наклона.

Ключевые слова: аппарат воздушного охлаждения, конвективный теплообмен, свободная конвекция, калориметрическая труба, трубчатый электронагреватель, число Нуссельта, число Рейлея, коэффициент теплоотдачи, торцевые тепловые потери.

A. B. Sukhotskiy, V. N. Farafontov, S. O. Filatov, G. S. Sidorik
Belarusian State Technological University

STAND DEVELOPMENT AND RESEARCH OF FREE CONVECTION FOR SINGLE FINNED TUBE FOR DIFFERENT RAKE ANGLE

An experimental bench for the study of free convection, consisting of boxes, calorimeter tubes and test equipment was produced. Based on experience there has determined the end the heat loss of the bimetallic calorimetric finned tube. An experiment to exam the smooth colorimetric tube with the emissivity factor 0.66 and 0.99 was conducted, and the experimental dependence of the Nusselt numbers from Rayleigh numbers has been built. An experiment on the study of free convection on a calorimeter finned tube with the degrees of blackness of 0.66 and 0.99 was held. There were proposed the formulas for recording of the radiant component of free convection heat exchange for calorimetric finned-tube. The experimental Nusselt numbers dependence on Rayleigh numbers for the calorimeter finned tubes with varying degrees of black have been built. There were conducted the test of heat exchange in free convection of air on a single finned calorimetric pipe with different angles of installation and the experimental dependence of Nusselt numbers on Rayleigh's has been built. Based on the results of the studying the following conclusions have been made: the developed experimental setup allows qualitative study of free convection heat exchange; calculated dependences allowing to calculate free convection heat transfer for single-finned calorimetric pipe at various angles have been received.

Keywords: air cooler heat exchangers, convective heat transfer, free convection, calorimetric-parameter-pipe, tubular electric heater, Nusselt number, Rayleigh number, heat transfer coefficient, end heat losses.

Введение. Свободная конвекция имеет широкий спектр применения как в природных процессах, так и в области технических и научных исследований. В настоящее время интерес к изучению свободноконвективной теплоотдачи повышается, что способствует углублению понимания физических процессов для естественной конвекции [1, 2].

В данный момент большое внимание в Беларуси уделяется проблемам ресурсо- и энергосбережения. Этот фактор способствует расширению применимости аппаратов воздушного охлаждения, работающих в режиме свободной конвекции. Областью применения свободноконвективных процессов являются химическая и нефтехимическая промышленность, металлургия,

компрессорные станции с трубопроводами, электростанции, системы охлаждения оборотной воды в установках для кондиционирования и т. д. [3, 4]. Обширная область применения свободной конвекции актуализирует исследования и обобщение теоретических и экспериментальных данных по свободноконвективным процессам.

Однако практическая реализация свободной конвекции изучена недостаточно широко в виду того, что долгое время в энергетике не проводились исследования в области свободноконвективной теплоотдачи. Они считались малоактуальными.

Теплоотдача при естественной конвекции рассмотрена для широкого диапазона геометрических параметров труб пучков для одиночных гладких труб [5], одиночных оребренных труб, однорядных и многорядных ребристых пучков [6–10].

Для достоверности выбора поверхности теплообмена, а также исследования и анализа теплоотдачи необходима безошибочная и точная оценка коэффициентов теплоотдачи. Для этого предлагаются различные критериальные уравнения, но не сложилось целостного мнения о выборе характерного размера и определяющей температуры, что в итоге ведет к различию численных значений коэффициентов теплоотдачи. Из-за сложности процессов теплообмена при свободной конвекции во многих случаях, особенно на ребристых поверхностях, где наблюдается сопряженный теплообмен, т. е. равнозначность конвективной и лучистой составляющей, невозможно применение теоретических методов описания и расчета в виду их громоздкости и недостоверности, сложности и в некоторых случаях неосуществимости. Таким образом, для описания и расчета свободноконвективной теплоотдачи применяются эмпирические критериальные уравнения.

Основная часть. Экспериментальный стенд (рис. 1) для исследования естественной конвекции состоит из камеры 1 размером $0,8 \times 0,8 \times 1$ м, в которой размещена калориметрическая труба 2.

Атмосферный воздух вокруг калориметрической трубы нагревается, а затем за счет разности плотностей горячего и холодного воздуха подымается вверх в окружающую среду. Температура на поверхности калориметрической трубы фиксируется с помощью хромель-алюмелевых термопар 7 диаметром 0,2 мм, которые через переключатель подключались к вольтметру 4 (модель В7-40/5). Температура воздуха t_0 внутри камеры измерялась двумя ртутными лабораторным термометром 5 с точностью $0,1^\circ\text{C}$. Общий для всех термопар холодный спай помещался в сосуд Дьюара 6 с тающим льдом.

В качестве калориметрической трубы применялась ребристая (или гладкая) труба длиной теплоотдающей части 300 мм, внутрь которой соосно вставлялся трубчатый электронагреватель (ТЭН) со следующими параметрами: диаметр – 12,5 мм, материал оболочки – углеродистая сталь, спираль – проволока с высоким омическим сопротивлением, наполнитель – электротехнический периклаз марки ППЭ мощностью 320 Вт. Общий вид трубчатого электронагревателя представлен на рис. 2.

Между ТЭНом и стенкой засыпался кварцевый песок дисперсным составом 0,16–0,32 мм. ТЭН подключен к регулируемому масляному трансформатору 8 (модель АОМН-40-220-75). Мощность, подводимая к трубе, измерялась ваттметром 3 (модель К 505). Торцевые участки калориметрической трубы для уменьшения потерь теплоты защищены фторопластовыми втулками наружным диаметром 45 мм, длиной 35 мм. На обеих втулках заложено по одной 6-спайной дифференциальной термобатарее.

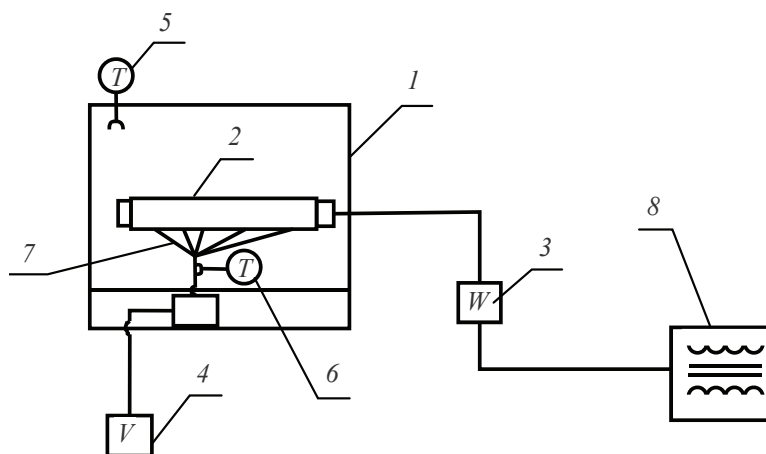


Рис. 1. Экспериментальный стенд для исследования смешанной конвекции:
1 – камера; 2 – калориметрическая труба; 3 – ваттметр; 4 – вольтметр;
5 – ртутный лабораторный термометр; 6 – сосуд Дьюара; 7 – термопары;
8 – масляный трансформатор

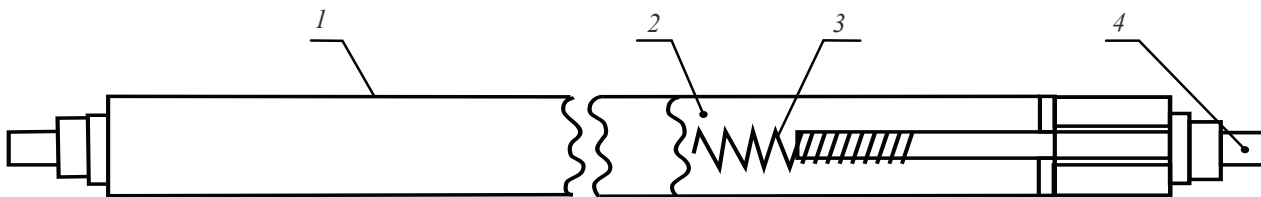


Рис. 2. Общий вид трубчатого электронагревателя:
1 – оболочка; 2 – наполнитель (электрический периклаз); 3 – спираль; 4 – втулка

При исследовании конвективных потоков возникает вопрос качественного учета торцевых потерь ребристых калориметрических труб. Для решения этой задачи использовалась гладкая стальная калориметрическая труба 25×4 мм. Величина торцевых потерь теплоты $Q_{пот}$ определялась для различных тепловых режимов по результатам предварительно поставленных опытов. Снаружи труба обматывалась изоляционным материалом (асбестовая ткань). Для контроля температуры на поверхности изоляции в средней части длины трубы закреплялись 4 термопары по периметру окружности через 90°.

В опытах по определению тепловых потерь для установившегося теплового режима измеряли: подводимую электрическую мощность W , температуру поверхности изоляции $t_{из}$, температуру наружного воздуха t_0 , ЭДС дифференциальных термопар E_1 и E_2 . С увеличением W толщину изоляции наращивали от 30 до 65 мм, добиваясь того, чтобы разность температур $(t_{из} - t_0)$ в стационарном тепловом состоянии не превышала 3–4°С. Так как этот температурный перепад незначителен, считали, что вся подводимая мощность W рассеивается через торцы трубы. Результаты эксперимента представлены на рис. 3.

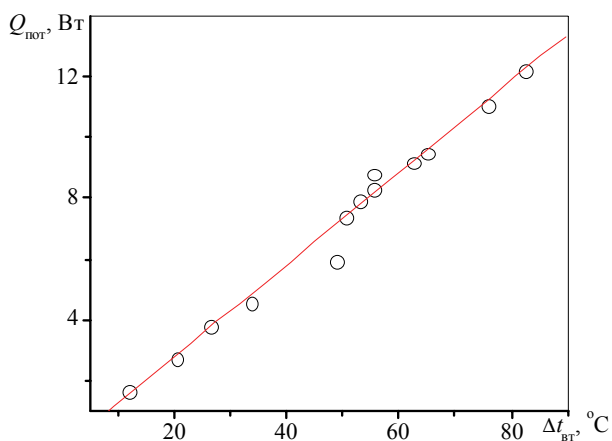


Рис. 3. Зависимость потерь на втулках от разности температур

В дальнейшем торцевые тепловые потери обребренной трубы определялись по аппроксимирующей линейной зависимости

$$Q_{пот} = -0,25764 + 0,15165 \cdot \Delta t_{вт}, \quad (1)$$

где $\Delta t_{вт}$ – потери на втулках, °С.

Для проверки достоверности полученной зависимости (1) был проведен эксперимент, в рамках которого исследовалась закопченная гладкая цилиндрическая труба 25×4 мм длиной теплоотдающей части 300 мм со степенью черноты 0,95. Вдоль трубы по периметру окружности под углом 36° было установлено 5 термопар и проведен эксперимент, в рамках которого для установившегося теплового режима измеряли: подводимую электрическую мощность W , температуру поверхности втулок $t_{вт}$, температуру наружного воздуха t_0 , среднюю ЭДС дифференциальных термопар $E_{ср}$. По результатам измерений была построена экспериментальная зависимость (рис. 4) чисел Нуссельта от чисел Рейля и проведено сравнение с данными Михеева.

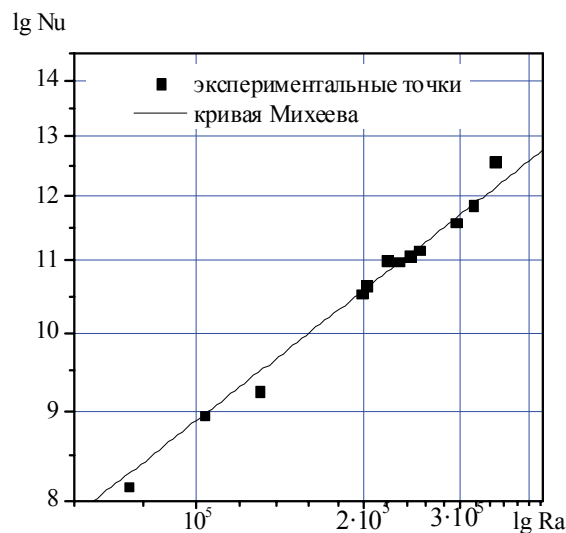


Рис. 4. Экспериментальная зависимость чисел Нуссельта от Рейля для гладкой калориметрической трубы

Из графика следует, что экспериментальные точки качественно ложатся на кривую Михеева

$$Nu = 0,5 \cdot Ra^{0,25}. \quad (2)$$

Погрешность эксперимента не превысила 3%, что говорит о том, что учет концевых потерь проведен достоверно.

Далее был проведен эксперимент по исследованию свободной конвекции на предварительно очищенной 14%-ным раствором NaOH калориметрической оребренной трубе со следующими геометрическими параметрами $d \times d_0 \times h \times s \times \Delta \times l = 56 \times 26 \times 15 \times 2,5 \times 0,5 \times 330$ мм и приведенной степени черноты $\varepsilon_{\text{пр}} = 0,66$ [11]. Для измерения средней температуры стенки $t_{\text{ст}}$ у основания ребер заложено 5 хромель-алюмелевых термопар ($d = 0,2$ мм) вдоль обрабатываемой трубы, сдвинутых относительно друг друга на 30° на половине трубы окружности, считая, что вторая половина имеет симметричное поле температур.

При нагреве калориметрической трубы некоторая часть теплоты отводится излучением, поэтому необходим учет лучистой составляющей [12], [13]. Результирующий тепловой поток излучения между калориметрической трубкой и камерой, образующими замкнутую систему, определяли по формуле

$$Q_{\text{л}} = \varepsilon_{\text{пр}} \cdot \Phi_{\text{T-O}} \cdot c_0 \cdot F_1 \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (3)$$

где $\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведенная степень черноты системы тел; $\Phi_{\text{T-O}}$ – средний угловой коэффициент излучения трубы к окружающей среде; c_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела; F_1 – площадь поверхности оребренной трубы, м^2 ; T_1 и T_2 – абсолютные температуры соответственно оребренной трубы и окружающего в камере воздуха, К.

Тепловой поток, отведенный конвекцией от трубы к окружающему воздуху, рассчитывался по уравнению

$$Q_{\text{к}} = W - Q_{\text{л}} - Q_{\text{п}}, \quad (4)$$

где W – электрическая мощность, подводимая к калориметру, Вт; $Q_{\text{л}}$ – тепловой поток, отведенный излучением от трубы к воздуху, Вт; $Q_{\text{п}}$ – тепловые потери через торцы труб и токопроводы, Вт.

Средний конвективный коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$:

$$\alpha_{\text{к}} = \frac{Q_{\text{к}}}{F \cdot (t_{\text{ст}} - t_0)}, \quad (5)$$

где F – площадь теплоотдающей оребренной поверхности трубы, м^2 ; $t_{\text{ст}}$ – средняя температура поверхности стенки у основания ребер трубы (среднеарифметическая температура по показаниям термопар), $^\circ\text{C}$.

По завершении этой серии опытов трубу зачерняли копотью трансформаторного масла для того, чтобы она сохраняла постоянное значение приведенной черноты $\varepsilon_{\text{пр}} = 0,99$ [14]. После зачернения трубы были снова проведены исследования теплоотдачи по изложенной выше ме-

тодике. Результаты опытов приведены на рис. 5. Как видно, зависимости чисел Нуссельта от чисел Рейля для калориметрических труб с различными степенями черноты хорошо согласуются, что указывает на достоверность разработанной методики эксперимента.

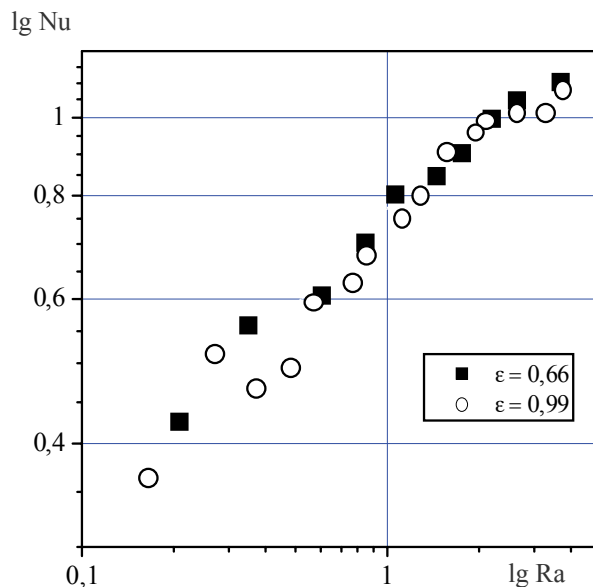


Рис. 5. Экспериментальная зависимость чисел Нуссельта от чисел Рейля для оребренной калориметрической трубы

Проведенные экспериментальные исследования показали, что созданная установка позволяет качественно проводить исследования свободноконвективного теплообмена ребристых труб воздухоохлаждаемых теплообменников.

На разработанной экспериментальной установке также были проведены исследования теплоотдачи при свободной конвекции воздуха на одиночной оребренной трубе с различными углами наклона – $0, 30, 45, 60, 90^\circ$. Во время экспериментов электрическая мощность, подводимая к оребренной трубе, изменялась в пределах $W = 10\text{--}220$ Вт, температура стенки у основания ребер составляла $t_{\text{ст}} = 32\text{--}230^\circ\text{C}$, температура окружающего воздуха в камере $t_0 = 20\text{--}24^\circ\text{C}$. Определяющей температурой для теплофизических свойств воздуха $\alpha, \lambda, \nu, \beta$ являлась температура окружающего воздуха t_0 [15]. За определяющий размер был принят диаметр трубы по основанию ребер d_0 .

Исследования показали, что для различных углов установки трубы общим является монотонный рост интенсивности теплоотдачи с увеличением числа Ra.

Из графика на рис. 6 видно, что теплоотдача оребренной трубы, установленной под углом в 30° , практически не отличается от горизонтальной. Но при этом существенно уменьшаются габариты теплообменного пучка в пространстве.

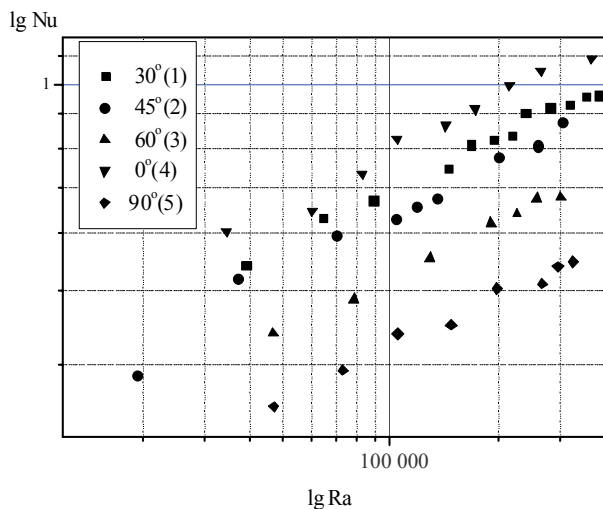


Рис. 6. Экспериментальная зависимость чисел Нуссельта от чисел Релея для оребренной калориметрической трубы с различными углами ее установки

При дальнейшем росте угла наклона происходит резкое снижение теплосъема с поверхности труб, так как режим обтекания трубы приближается к режиму обтекания вертикальной трубы, механизм теплоотдачи с поверхности которой имеет совершенно иной характер. При вертикальном расположении трубы в межреберном пространстве практически отсутствует циркуляция воздуха, и весь конвективный поток отводится с торцевой поверхности труб.

Заключение. Проведенные экспериментальные исследования показали, что созданная установка позволяет качественно проводить исследования свободноконвективного теплообмена ребристых труб воздухоохлаждаемых теплообменников.

Получены расчетные зависимости, позволяющие рассчитывать свободноконвективный теплообмен на одиночной оребренной трубе в воздухе при любых углах наклона.

Литература

1. Аппарат воздушного охлаждения: пат. 2200907 Рос. Федерация, МПК F24F 3/00 / Асадуллин М. З., Аскарров Р. М., Гольянов А. И., Исмаилов И. Г., Мукминов А. Р., Сатиков И. Ф., Файзуллин С. М., Файзуллин А. С.; заявитель ООО «Баштрансгаз». № us 5835341, заявл. 11.03.2001; опубл. 20.03.2003 // Официальный бюллетень / Федеральный институт интеллектуальной собственности. 2003. № 8. С. 87.
2. Теплообменный аппарат типа аппарата воздушного охлаждения газа: пат. 2266488 Рос. Федерация, МПК 7 F28 D 1/02 / Лифанов В. А., Берестов В. А., Шляхов С. Б.; заявители Овчар В. Г., Даниленко В. Г., Лифанов В. А. № 2004108990/06, заявл. 26.03.2004; опубл. 20.12.2005 // Официальный бюллетень / Федеральный институт интеллектуальной собственности. 2004. № 35. С. 51.
3. Аппарат воздушного охлаждения: пат. 9446 Респ. Беларусь, МПК 7 F 24 F 3/00, F 28 D 1/00 / Кунтыш В. Б., Сухоцкий А. Б., Миннигалеев А. Ш., Мулин В. П.; заявитель Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет». № u 20130091, заявл. 31.01.2013; опубл. 30.08.2013 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. 2013. № 9. С. 70.
4. Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения: справочник / под общ. редакцией В. Б. Кунтыша, А. Н. Бессонного. СПб.: Недра, 1996. 512 с.
5. Кунтыш В. Б., Бессонный А. Н. Примеры расчетов нестандартизированных эффективных теплообменников. СПб.: Недра, 2000. 300 с.
6. Кунтыш В. Б., Самылов А. И. Исследование теплоотдачи однорядных пучков из оребренных труб при совместном действии свободной и вынужденной конвекции воздуха // Изв. вузов. Энергетика. 1999. № 4. С. 59–68.
7. Короленко Ю. А. Теплоотдача от горизонтального пучка труб к воздуху в условиях свободной конвекции // Изв. Томского ордена трудового красного знамени политехнического института имени С. М. Кирова. 1962. № 110. С. 26–33.
8. Мильман О. О. Экспериментальное исследование теплообмена при естественной циркуляции воздуха в модели воздушного конденсатора с вытяжной шахтой // Теплоэнергетика. 2005. № 5. С. 16–19.
9. Мачулин В. И. Теплообмен вертикального ряда труб при естественной конвекции воздуха // Холодильная техника. 1976. № 7. С. 24–25.
10. Кунтыш В. Б., Позднякова А. В., Мелехов В. И. Теплоотдача естественной конвекцией одиночного ряда вертикальных оребренных труб калориферов лесосушильных камер // Изв. Вузов. Лесной журнал. 2002. № 2. С. 116–119.
11. Самородов А. В. К расчету теплообмена излучением круглоребристых труб и пучков // Труды лесоинженерного факультета Петрозаводского гос. ун-та. 1999. Вып. 2. С. 135–142.
12. Самородов А. В. Совершенствование методики теплового расчета и проектирования аппаратов воздушного охлаждения с шахматными оребренными пучками. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПбГТУ, 1999. С. 3–22.

13. Кунтыш В. Б., Марьяна З. Г., Топоркова М. А. Исследование облуженности оребренных труб аппаратов воздушного охлаждения // Изв. вузов. Энергетика. 1981. № 10. С. 119–122.

14. Самородов А. В., Рошин С. П., Кунтыш В. Б. Лучистый теплообмен одиночной ребристой трубы с окружающей средой // Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов: сб. науч. тр. 1997. Вып. II. С. 102–113.

15. Самородов А. В., Теляев Р. Ф., Кунтыш В. Б. Методика теплового расчета аппарата воздушного охлаждения в режиме свободной конвекции воздуха // Изв. Вузов. Проблемы энергетики. 2002. № 1–2. С. 20–30.

References

1. Asadulin M. Z., Askarov R. M., Golyanov A. I., Ismailov I. G., Satikov I. F., Faizullin S. M., Faizullin A. S. *Apparat vozdušnogo ochlazhdenia* [Air cooler heat exchanger]. Patent RF, no. 5835341, 2003.

2. Lifanov V. A., Berestov V. A., Shl'achov S. B. *Teploobmennii apparat tipa apparata vozdušnogo ochlagdenia* [Heat exchanger as a type of air cooler heat exchanger]. Patent RF, no. 2004108990/06, 2004.

3. Kuntyshev V. B., Sukhotskii A. B., Minnigaleev A. Sh., Mulin V. P. *Apparat vozdušnogo ochlazhdenia* [Air cooler heat exchanger]. Patent RB, no. 20130091, 2013.

4. Kuntyshev V. B., Bessonov A. N. *Osnovi rascheta i proektirovaniya teploobmennikov vozdušnogo ochlagdenia* [Basic of calculation and design of air cooled heat exchangers]. St. Petersburg, Nedra Publ., 1996. 512 p.

5. Kuntyshev V. B. *Primeri raschetov nestandardizirovannykh effektivnykh teploobmennikov* [Examples of substandard heat exchanger's calculations]. St. Petersburg, Nedra Publ., 2000. 300 p.

6. Kuntyshev V. B., Samilov A. I. The study of heat transfer, single beams of ribbed-indigenous pipes under the joint action of free and forced convection air. *Izvestia vuzov. Energetika* [Proceedings of the higher education institutions. Power engineering], 1999, no. 4, pp. 59–68 (in Russian).

7. Korolenko U. A. Heat transfer of horizontal tubes beam to air in condition of free convection. *Izv. Tomskogo trudovogo krasnogo znameni politeknicheskogo instituta im. S. M. Kirova* [Tomsk Red Flag of Labor Polytechnic Institute named after S. M. Kirov], 1962, no. 110, pp. 26–33 (In Russian).

8. Mil'man O. O. Experimental research of heat transfer in condition of free convection in the air condenser models with exhaust shaft. *Teploenergetika* [Thermal engineering], 2005, no. 5, pp. 16–19 (In Russian).

9. Machulin V. I. Heat transfer of a number of vertical tubes for free natural air's convection. *Kholodilnaya tekhnika* [Refrigerating engineering], 1976, no. 7, pp. 24–25 (In Russian).

10. Kuntyshev V. B., Pozdnyakova A. V., Melechov V. I. Heat transfer by natural convection of a single row of vertical ribbed pipes in wood-drying kiln's calorifiers. *Izvestia vuzov. Lesnoi zhurnal* [Proceedings of the higher education institutions. Forestry journal], 2002, pp. 116–119 (In Russian).

11. Samorodov A. V. Calculation of radiative heat transfer of domed-ribbed tubes and beams. *Trudy lesoingenernogo facul'teta Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta* [Proceedings of the Faculty of Forestry of Petrozavodsk State University], 1999, no. 2, pp. 135–142 (In Russian).

12. Samorodov A. V. *Sovershenstvovanie metodiki teplovogo rasczeta i proektirovaniya apparatov vozdušnogo ochlazhdenia s shahmatnimi puczkami: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Perfection of a technique of thermal calculation and design of air coolers with chess ribbed beams: abstract of thesis PhD (Engineering)]. St. Petersburg, 1999, pp. 3–22.

13. Kuntyshev V. B. Research of irradiance finned pipe air cooling heat exchangers. *Izvestia vuzov. Energetika* [Proceedings of the higher education institutions. Power engineering], 1981, no. 10, pp. 119–122 (In Russian).

14. Samorodov A. V. Radiant heat transfer of single finned tube with the environment. *Sbornik nauchnich trudov. Ochrana okrudgaushei sredi i racsional'noe ispol'zovanie prirodnych resursov* [Collection of scientific works. Environmental protection and rational use of natural resources], 1997, no. 2, pp. 135–142 (In Russian).

15. Samorodov A. V., Telyaev R. F., Kuntyshev V. B. Methods of thermal calculation apparatus air cooling in free air convection. *Izvestia vuzov. Energetika* [Proceedings of the higher education institutions. Power engineering], 2002, no. 1–2, pp. 20–30 (In Russian).

Информация об авторах

Сухоцкий Альберт Борисович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры энергосбережения, гидравлики и теплотехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: alk2905@mail.ru

Фарафонов Валерий Николаевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры энергосбережения, гидравлики и теплотехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь).

Филатов Святослав Олегович – кандидат технических наук, ассистент кафедры энергосбережения, гидравлики и теплотехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: filatau@tut.by

Сидорик Галина Сергеевна – аспирант кафедры энергосбережения, гидравлики и теплотехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: galiana.sidorik@gmail.com

Information about the authors

Sukhotskiy Al'bert Borisovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor of the Department of Energy-saving, Hydraulics and Heat Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: alk2905@mail.ru

Farafontov Valeriy Nikolaevich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor of the Department of Energy-saving, Hydraulics and Heat Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus).

Filatov Svyatoslav Olegovich – PhD (Engineering), Assistant of the Department of Energy-saving, Hydraulics and Heat Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: filatau@tut.by

Sidorik Galina Sergeevna – PhD student of the Department of Energy-saving, Hydraulics and Heat Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: galiana.sidorik@gmail.com

Поступила 01.11.2016