

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-4-380-388>

УДК 536.25:620.98

Особенности расчета лучистой составляющей теплового потока горизонтального пучка из оребренных труб с вытяжной шахтой*

А. Б. Сухоцкий¹⁾, Г. С. Маршалова¹⁾, Е. С. Данильчик¹⁾

¹⁾Белорусский государственный технологический университет
(Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Реферат. В статье рассматривается теплообмен излучением пучков из труб с круглыми ребрами с окружающей средой и вытяжной шахтой. Система уравнений, описывающая всю совокупность первичных процессов, из которых складывается радиационный теплообмен ребристых пучков, очень сложна в математическом отношении. Поэтому расчеты лучистого теплообмена проводятся исходя из ряда упрощающих предпосылок с вынужденным искажением реальной физической картины. Кратко рассмотрены основные способы расчета излучения, используемые в инженерной практике: расчет по среднему угловому коэффициенту и зональный метод. Предложен уточненный зональный метод расчета лучистой составляющей теплового потока горизонтального пучка из оребренных труб с вытяжной шахтой. Проведено экспериментальное исследование однорядных пучков из оребренных труб с различными межтрубными шагами S_1 (64 и 70 мм) для малых чисел Рейнольдса $Re = 130–720$ в широком диапазоне определяющей температуры на входе в пучок (16–83 °С). Алюминиевое оребрение трубы пучка имеет следующие параметры: диаметр винтового оребрения $d = 0,0568$ м; диаметр трубы по основанию $d_0 = 0,0264$ м; высота, шаг и средняя толщина ребра соответственно $h = 0,0152$ м, $s = 0,00243$ м и $\Delta = 0,00055$ м. Движение воздуха в пучке осуществлялось гравитационной тягой, создаваемой вытяжной прямоугольной шахтой. Экспериментальный пучок устанавливался над шахтой, а воздух перед поступлением в шахту предварительно подогревался, что позволило расширить диапазон температур воздуха на входе в пучок. Обнаружено, что неправильный учет переизлучения пучка с вытяжной шахтой при проведении расчетов однорядных оребренных пучков приводит к снижению конвективной теплоотдачи на 7–25 %.

Ключевые слова: биметаллическая ребристая труба, алюминиевое круглое оребрение, вытяжная шахта, зональный метод расчета, лучистая составляющая теплового потока, естественная конвекция воздуха

Для цитирования: Сухоцкий, А. Б. Особенности расчета лучистой составляющей теплового потока горизонтального пучка из оребренных труб с вытяжной шахтой / А. Б. Сухоцкий, Г. С. Маршалова, Е. С. Данильчик // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2020. Т. 63, № 4. С. 380–388. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-4-380-388>

Адрес для переписки

Сухоцкий Альберт Борисович
Белорусский государственный
технологический университет
ул. Свердлова, 13а,
220006, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 327-87-30
alk2905@mail.ru

Address for correspondence

Sukhotski Al'bert B.
Belarusian State
Technological University
13a, Sverdlova str.,
220006, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 327-87-30
alk2905@mail.ru

* Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант T19PM-076).

Specific Features of Calculating the Radiant Component of the Heat Flow of Horizontal Bunch from Finned Tubes with Exhaust Shaft

A. B. Sukhotski¹⁾, G. S. Marshalova¹⁾, E. S. Danil'chik¹⁾

¹⁾Belarusian State Technological University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The article discusses the heat exchange of radiation of bunches of round finned tubes with the environment and the exhaust shaft. The system of equations describing the entire set of primary processes that make up the radiation heat exchange of finned bundles is very complex mathematically; therefore, the calculations of radiant heat transfer are usually based on a number of simplifying assumptions with a involuntarily distortion of the real physical picture. The main methods for calculating radiation used in engineering practice, viz. calculation by the average angular coefficient and the zonal method are briefly considered. A refined zonal method for calculating the radiant component of the heat flow of a horizontal bunch of finned tubes with an exhaust shaft is proposed. An experimental study of single-row bunches of finned tubes with different annular steps S_1 (64 and 70 mm) was carried out for small Reynolds numbers $Re = 130-720$ in a wide range of the determining temperature at the beam inlet (16–83 °C). The aluminum finning of the bunch tube had the following parameters: screw finning diameter $d = 0.0568$ m; diameter of the tube at the base $d_0 = 0.0264$ m; height, step and average fin thickness, respectively, $h = 0.0152$ m, $s = 0.00243$ m and $\Delta = 0.00055$ m. Air movement in the bunch was carried out by gravitational traction created by a rectangular exhaust shaft. The experimental bunch was installed above the shaft, and the air was preheated before entering the shaft, which allowed expanding the temperature range of the air at the entrance to the bunch. It was found that incorrect accounting for a bunch reemission with an exhaust shaft when calculating single-row finned bunches causes a decrease in convective heat transfer by 7–25 %.

Keywords: bimetallic ribbed tube, aluminum round fins, exhaust shaft, zonal method for calculating, radiant component of the heat flow, natural air convection

For citation: Sukhotski A. B., Marshalova G. S., Danil'chik E. S. (2020) Specific Features of Calculating the Radiant Component of the Heat Flow of Horizontal Bunch from Finned Tubes with Exhaust Shaft. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 63 (4), 380–388. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-4-380-388> (in Russian)

Введение

Трубы с поперечными круглыми ребрами находят широкое применение в технике. Из них изготавливают теплообменные секции аппаратов воздушного охлаждения, калориферы, испарители холодильных камер и т. п. При эксплуатации теплообменника в режиме свободной конвекции значимая часть теплоты отводится излучением, которая может преобладать в суммарном тепловом потоке и зависит от геометрических параметров пучка и характеристик поверхности излучения [1]. При расчете излучения ребристых труб возникают дополнительные сложности в разработке методик из-за влияния на процесс межреберного шага.

В инженерной практике используют два основных метода расчета теплообмена излучением: расчет по среднему угловому коэффициенту и зональный метод [2].

Первый способ применяется в случаях, когда замкнутую систему можно представить только из двух тел. В пределах каждого тела температура и степень черноты считаются постоянными. Данный метод используется только для двух бесконечных плоскостей. Для сложных вогнутых тел он дает допустимый результат при условии, что степени черноты поверхностей тел достаточно велики и стремятся к единице. Однако в теплообменниках часто применяют трубы с алюминиевыми ребрами, а степень черноты алюминия порядка 0,1–0,2, и использование метода расчета по среднему угловому коэффициенту может привести к значительной погрешности. Поэтому в работах по изучению конвективного теплообмена в пучках оребренных труб с вытяжной шахтой отсутствуют указания по учету лучистой составляющей [3, 4] либо применяется разработанная в [1] методика расчета для свободной конвекции [5–7], в основе которой лежит зональный метод с выделением в пучке двух зон (рис. 1а): зона 2 – наружные половины труб крайних поперечных рядов; зона 3 – остальная часть пучка. Зоной 1 считается окружающая среда, состоящая из двух плоскостей, ограничивающих пучок.

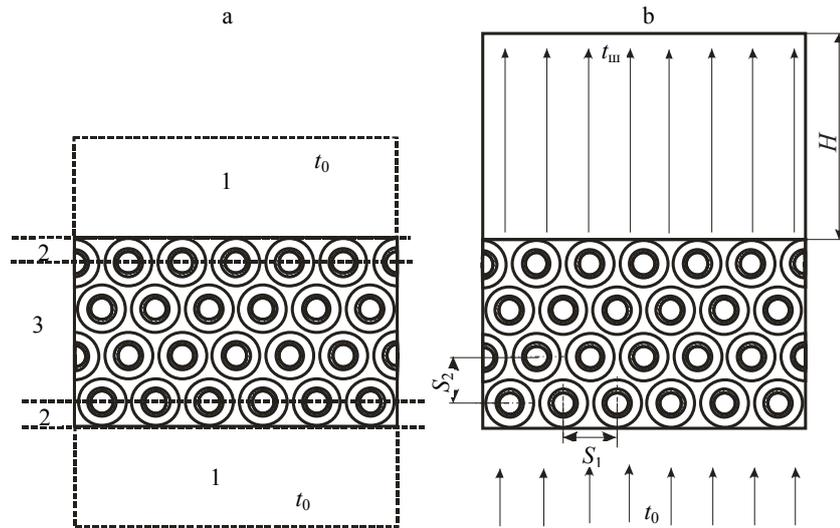


Рис. 1. Схема к расчету излучения пучка без шахты (а) и с шахтой (б)

Fig. 1. The scheme for the calculation of the radiation bunch without a shaft (a) and with a shaft (b)

Формула расчета зональным методом теплового потока излучением, Вт, применительно к пучку оребренных труб

$$Q_{л} = c_0 F \varepsilon_{эф} \varphi_{т-0} \frac{(\Phi_{1-3} + \Phi_{2-3}(z-1))}{z} \left[\left(\frac{273 + t_{ст}}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + t_к}{100} \right)^4 \right], \quad (1)$$

где c_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, $c_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$; $\varepsilon_{эф}$ – эффективная степень черноты системы тел «пучок – среда»; F – пло-

щадь теплоотдающей оребренной поверхности пучка, m^2 ; $\varphi_{т-о}$ – средний угловой коэффициент излучения одиночной круглоребристой трубы к окружающей среде, учитывающий геометрические параметры оребрения трубы; Φ_{1-3} – разрешающий угловой коэффициент излучения от первой зоны к третьей; Φ_{2-3} – то же от второй зоны к третьей; z – количество рядов в пучке, шт.; $t_{ст}$ – средняя температура поверхности стенки у основания ребер труб пучка, °С; t_k – температура поверхности камеры, пола и потолка вокруг пучка, равная температуре окружающего воздуха: $t_k = t_0$, °С.

Окружающая среда считалась абсолютно черным телом, поскольку площадь поверхности камеры намного превышала взаимную поверхность лучистого теплообмена пучка. Формулы для расчета угловых коэффициентов [1] не учитывают влияние продольного шага S_2 труб в пучке, так как по [8] это влияние пренебрежимо мало и угловые коэффициенты от трубного пучка к среде практически всецело зависят от поперечного шага S_1 . На угловые коэффициенты также мало влияет и тип компоновки труб в пучке – коридорная или шахматная. Достоверность данной методики расчета подтверждена экспериментально в [9–11].

При установке над пучком вытяжной шахты (рис. 1б) верхняя зона 1 становится зоной вытяжной шахты с температурой стенок $t_{ш}$. Принимая в первом приближении шахту как абсолютно черное тело, получим формулу для расчета теплового потока, Вт, излучением пучка оребренных труб с шахтой:

$$Q_{л} = Q_{л}^0 + Q_{л}^{ш}; \quad (2)$$

$$Q_{л}^0 = (0,5 + \gamma) c_0 \varepsilon_{эф} F \varphi_{т-о} \frac{(\Phi_{1-3} + \Phi_{2-3}(z-1))}{z} \left[\left(\frac{273 + t_{ст}}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + t_k}{100} \right)^4 \right]; \quad (3)$$

$$Q_{л}^{ш} = (0,5 - \gamma) c_0 \varepsilon_{эф} F \varphi_{т-о} \frac{(\Phi_{1-3} + \Phi_{2-3}(z-1))}{z} \left[\left(\frac{273 + t_{ст}}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + t_{ш}}{100} \right)^4 \right], \quad (4)$$

где γ – коэффициент излучения в отверстие шахты ($0 \leq \gamma \leq 0,5$), $\gamma = 0,5 S_{отв} / (S_{ш} + S_{отв})$; $S_{отв}$, $S_{ш}$ – площадь отверстия и внутренних стенок шахты, m^2 .

Таким образом, тепловой поток, Вт, отведенный от пучка к воздуху конвекцией, рассчитывается из уравнения

$$Q_k = W - Q_{л} - Q_{п}, \quad (5)$$

где W – тепловая мощность, подводимая к пучку, Вт; $Q_{п}$ – тепловые потери через торцы труб и токоподводы, Вт.

При составлении теплового баланса следует учитывать, что верхний лучистый поток нагревает стенки шахты, которая передает теплоту стенок воздуху в ней, а нижний лучистый поток рассеется в окружающую среду

$$Q_k + Q_{\text{л}}^{\text{ш}} = c_p \rho V (t_{\text{ш}} - t_0), \quad (6)$$

где c_p , ρ – средняя изобарная теплоемкость, Дж/(кг·К), и плотность, кг/м³, воздуха, определяемые при температуре $0,5(t_0 + t_{\text{ш}})$; V – объемный расход воздуха через пучок, м³/с.

В [5] проведены исследования однорядного пучка с шахтой для различных межтрубных шагов S_1 , равных 58, 61, 64 и 70 мм. Оребренные трубы пучка имели следующие параметры: диаметр винтового оребрения $d = 0,0568$ м; диаметр трубы по основанию $d_0 = 0,0264$ м; высота, шаг и средняя толщина ребра соответственно $h = 0,0152$ м, $s = 0,00243$ м и $\Delta = 0,00055$ м; теплоотдающая длина оребрения трубы $l = 0,3$ м; общая длина оребренной трубы $l = 0,33$ м. Коэффициент оребрения трубы составил $\varphi = 21$. Материал ребристой оболочки – алюминиевый сплав АД1М, несущей трубы – сталь.

Экспериментальные данные обрабатывали и представляли в безразмерном виде – в числах Нуссельта $Nu = \alpha d_0 / \lambda$ и Рейнольдса $Re = w d_0 / \nu$, где α – коэффициент конвективной приведенной теплоотдачи от оребрения пучка к воздуху, Вт/(м²·°С); w – скорость воздуха в сжатом (узком) поперечном сечении пучка, м/с. Плотность ρ , кг/м³, коэффициенты теплопроводности λ , Вт/(м·К), и кинематической вязкости ν , м²/с, принимали для температуры окружающей среды $t_0 = (16-25)$ °С.

В результате обобщения экспериментальных данных при различных поперечных шагах установки труб с отклонением менее 5 % получено уравнение для расчета числа Нуссельта

$$Nu = 0,00129 \left(\frac{d_0}{d_3} \right)^{0,9} Re^{0,96}, \quad (7)$$

где d_3 – эквивалентный диаметр сжатого поперечного сечения пучка, м,

$$d_3 = \frac{2s}{2h + s} S_1 \left(1 - \frac{1}{S_1} \left(d_0 + 2 \frac{h\Delta}{s} \right) \right). \quad (8)$$

Уравнение (7) действительно в интервале изменения $Re = 130-720$, $d_0/d_3 = 4,85-7,21$. К сожалению, в данной работе тепловой поток излучением пучка в шахту $Q_{\text{л}}^{\text{ш}}$ рассчитывался по t_0 , а скорость потока и число Рейнольдса определялись без учета рассеивания в окружающую среду $Q_{\text{л}}^0$.

Цель исследований – уточнение формулы для расчета теплоотдачи конвекцией однорядного оребренного пучка с шахтой в широком диапазоне определяющей температуры на входе в пучок ($t_{\text{вх}}$).

Экспериментальное исследование и анализ

Для экспериментального исследования использовались такие же трубы, как и в [4], а однорядный пучок собирался с межтрубными шагами S_1 , равными 64 и 70 мм. Схема экспериментальной установки, аппаратурное

оснащение ее измерительными приборами, методика и порядок проведения опытов изложены в [7, 12].

Исследования проводились в два этапа. Сначала пучок устанавливался под прямоугольной вытяжной шахтой высотой $H = 0,52$ м (рис. 2а) и определялись его теплоотдающие характеристики при $t_{\text{вх}} = t_0$. Затем он устанавливался над шахтой (рис. 2б, 3). Причем во втором случае воздух, проходящий через исследуемый однорядный пучок, предварительно подогревался в дополнительном трехрядном пучке, установленном под шахтой. Подогрев воздуха был необходим для обеспечения тяги в шахте и для расширения исследуемого диапазона определяющей температуры $t_{\text{вх}} = t_{\text{ш}}$.

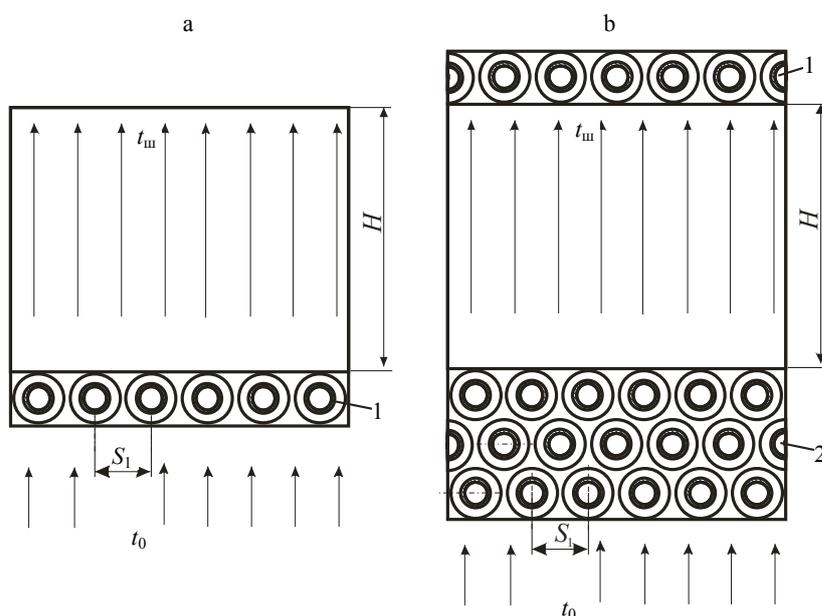


Рис. 2. Схема экспериментальной установки с размещением однорядного пучка под (а) и над шахтой (б): 1 – исследуемый однорядный пучок; 2 – дополнительный греющий пучок

Fig. 2. The scheme of experimental installation with placing of a single-row bunch under (a) and above shaft (b): 1 – single-row bunch under study; 2 – additional heating bunch



Рис. 3. Экспериментальная установка с пучком над шахтой

Fig. 3. Experimental installation with a bunch above the shaft

Скорость воздуха в сжатом поперечном сечении пучка

$$w = \frac{V}{f_{\text{сж}}}, \quad (9)$$

где $f_{\text{сж}} = \ln S_1 [1 - d/S_1]$ – площадь сжатого сечения пучка, м²; n – число труб в одном ряду пучка, $n = 6$ шт.

В результате обобщения экспериментальных данных по теплоотдаче однорядного горизонтального пучка, представленных на рис. 4, с отклонением, не превышающим 7 %, получено уравнение

$$\text{Nu} = C \text{Re}^{0,89}, \quad (10)$$

где C – коэффициент пропорциональности, $C = 0,0114$ для $S_1 = 64$ мм и $C = 0,0096$ для $S_1 = 70$ мм.

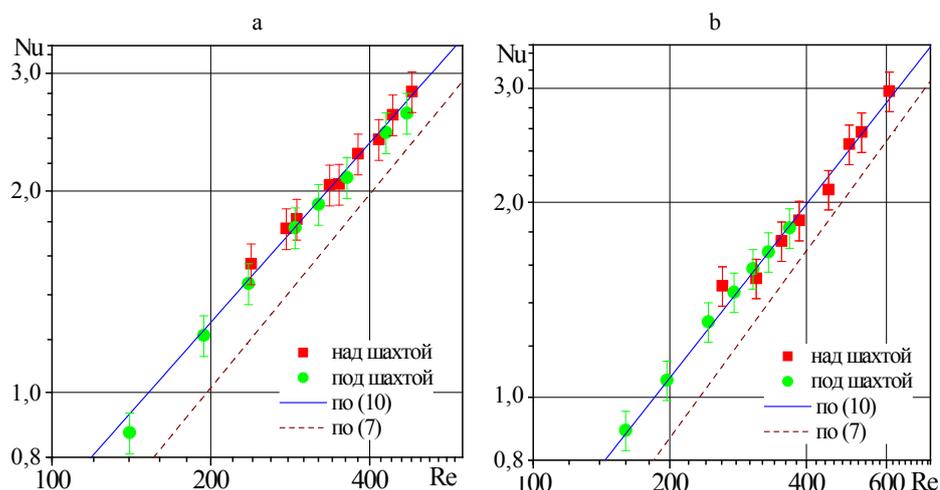


Рис. 4. Зависимость числа Нуссельта от числа Рейнольдса при межтрубном шаге S_1 :
а – 64 мм; б – 70 мм

Fig. 4. Dependence of the Nusselt number on the Reynolds number for annular step S_1 :
а – 64 mm; б – 70 mm

Уравнение (10) действительно в интервале изменения $\text{Re} = 130\text{--}580$, $d_0/d_3 = 4,85\text{--}7,21$. Для теплофизических свойств воздуха при расчете чисел Нуссельта и Рейнольдса определяющей являлась температура воздуха на входе в пучок $t_{\text{вх}} = (16\text{--}83)^\circ\text{C}$.

ВЫВОДЫ

1. Предложенная методика расчета лучистой составляющей позволила уточнить формулы для расчета теплоотдачи конвекцией однорядного оре-

бренного пучка с шахтой в широком диапазоне определяющей температуры воздуха на входе в пучок.

2. Полученные экспериментальные данные позволяют сделать вывод, что применение методики расчета лучистой составляющей для свободной конвекции при проведении расчетов теплоотдачи однорядных оребренных пучков с вытяжной шахтой приводит к погрешности в 7–25 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Самородов, А. В. Методика теплового расчета аппарата воздушного охлаждения в режиме свободной конвекции воздуха / А. В. Самородов, Р. Ф. Теляев, В. Б. Кунтыш // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2002. № 1–2. С. 20–30.
2. Блох, А. Г. Теплообмен излучением / А. Г. Блох, Ю. А. Журавлев, Л. Н. Рыжков. М.: Энергоатомиздат, 1991. 432 с.
3. Мильман, О. О. Экспериментальное исследование теплообмена при естественной циркуляции воздуха в модели воздушного конденсатора с вытяжной шахтой / О. О. Мильман // Теплоэнергетика. 2005. № 5. С. 16–19.
4. 3D CFD Simulations of Air Cooled Condenser-II: Natural Draft Around a Single Finned Tube Kept in a Small Chimney / A. Kumar [et al.] // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2016. No 92. P. 507–522.
5. Маршалова, Г. С. Тепловой расчет и проектирование аппаратов воздушного охлаждения с вытяжной шахтой / Г. С. Маршалова. Минск, 2019. 153 с.
6. Сухоцкий, А. Б. Экспериментальное исследование и обобщение данных по интенсифицированной конвективной теплоотдаче однорядных пучков ребристых труб в потоке воздуха / А. Б. Сухоцкий, Г. С. Маршалова // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 6. С. 552–563. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-552-563>.
7. Сухоцкий, А. Б. Экспериментальное исследование теплоотдачи однорядного пучка из оребренных труб при смешанной конвекции воздуха / А. Б. Сухоцкий, Г. С. Сидорик // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 4. С. 352–366. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-4-352-366>.
8. Самородов, А. В. Совершенствование методики теплового расчета и проектирования аппаратов воздушного охлаждения с шахматными оребренными пучками / А. В. Самородов. Архангельск, 1999. 176 с.
9. Новожилова, А. В. Обобщенная зависимость для теплоотдачи горизонтальных пучков оребренных труб при свободной конвекции воздуха / А. В. Новожилова, З. Г. Марьина // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2016. № 10. С. 13–16.
10. Позднякова, А. В. Совершенствование характеристик и разработка методики расчета промежуточных калориферов лесосушильных камер / А. В. Позднякова. Архангельск, 2003. 147 с.
11. Волков, А. В. Повышение эффективности сушки длительносохнущих пиломатериалов в камерах периодического действия / А. В. Волков. Архангельск, 2003. 154 с.
12. Сидорик, Г. С. Экспериментальный стенд для исследования тепловых и аэродинамических процессов смешанно-конвективного теплообмена круглоребристых труб и пучков / Г. С. Сидорик // Труды БГТУ. Серия 1. Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2018. № 1. С. 85–93.

REFERENCES

1. Samorodov A. V., Telyaev R. F., Kuntyshev V. B. (2002) Method of Thermal Calculation of the Air Cooling Device in the Mode of Free Air Convection. *Izvestiya Vuzov. Problemy Energetiki = Power Engineering: Research, Equipment, Technology*, (1–2), 20–30 (in Russian).
2. Blokh A. G., Zhuravlev Yu. A., Ryzhkov L. N. (1991) *Heat Exchange by Radiation*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 432 (in Russian).
3. Mil'man O. O. (2005) Experimental Study of Heat Exchange during Air Natural Circulation in a Model of an Air Condenser with an Exhaust Shaft. *Teploenergetika = Thermal Engineering*, (5), 16–19 (in Russian).
4. Kumar A., Joshi J. B., Nayak A. K., Vijayan P. K. (2016) 3D CFD Simulations of Air Cooled Condenser-II: Natural Draft Around a Single Finned Tube Kept in a Small Chimney. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 92, 507–522. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.07.136>.
5. Marshalova G. S. (2019) *Thermal Calculation and Design of Air Cooling Devices with Exhaust Shaft*. Minsk. 153 (in Russian).
6. Sukhotskii A. B., Marshalova G. S. (2018) Intensified Convection Heat Transfer of Single-Row Bunch of Finned Tubes in an Air Stream: Experimental Study and Generalization of the Obtained Data. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (6), 552–563 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-552-563>.
7. Sukhotskii A. B., Sidorik G. S. (2017) Experimental Study of Heat Transfer of a Single-Row Bundle of Finned Tubes in Mixed Convection of Air. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (4), 352–366 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-4-352-366>.
8. Samorodov A. V. (1999) *Improving the Method of Thermal Calculation and Design of Air Cooling Devices with Staggered Finned Bundles*. Arkhangelsk. 176 (in Russian).
9. Novozhilova A. V., Mar'ina Z. G. (2017) A Generalized Dependence for Convective Heat Transfer in Horizontal Bundles of Finned Tubes with Free Air Convection. *Chemical and Petroleum Engineering*, 52 (9–10), 669–674. <https://doi.org/10.1007/s10556-017-0250-9>.
10. Pozdnyakova A. V. (2003) *Improvement of Characteristics and Development of Methods for Calculating Intermediate Heaters of Wood Drying Chambers*. Arkhangelsk. 147 (in Russian).
11. Volkov A. V. (2003) *Improving the Drying Efficiency of Long-Drying Lumber in Batch Chambers*. Arkhangelsk. 154 (in Russian).
12. Sidorik G. S. (2018) Experimental Stand for the Study of Thermal and Aerodynamic Processes of Mixed-Convection Heat Exchange of Round-Ribbed Pipes and Bundles. *Trudy BGTU. Seriya 1. Lesnoe Khozyaistvo, Prirodopol'zovanie i Pererabotka Vozobnovlyаемых Resursov = Proceedings of BSTU. Forestry. Environmental Management. Reprocessing of Renewable Resources*, (1), 85–93 (in Russian).