

**ИССЛЕДОВАНИЕ СМЕШАННОКОНВЕКТИВНОЙ ТЕПЛОТДАЧИ  
ОДНОРЯДНЫХ ВОЗДУХООХЛАЖДАЕМЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ ПРИ  
РАЗЛИЧНЫХ ПОПЕРЕЧНЫХ ШАГАХ УСТАНОВКИ ТРУБ**

**А. Б. Сухоцкий, Г. С. Сидорик**

**Белорусский государственный технологический университет, г. Минск,  
Республика Беларусь**

[alk2905@mail.ru](mailto:alk2905@mail.ru), [galiana.sidorik@gmail.com](mailto:galiana.sidorik@gmail.com)

**Резюме:** В статье представлено исследование однорядных воздухоохлаждаемых теплообменников, состоящих из биметаллических накатных алюминиевых ребристых труб с различными поперечными шагами их установки, оснащенных дополнительным интенсифицирующим устройством – вытяжной шахтой, различной высоты. Проанализирована методика обработки полученных опытных данных и представлены зависимости чисел Нуссельта от чисел Грасгофа. Проанализирована физическая картина структуры потока воздуха, проходящего через однорядный горизонтальный ребренный пучок. Установка вытяжной шахты над пучком приводит к значительному росту теплоотдачи в 2,5-3,0 раза, но при этом эффективность теплоотдачи существенно зависит от высоты вытяжной шахты, ее аэродинамического сопротивления и поперечного шага установки труб в теплообменном пучке. Для смешанноконвективного теплообмена зависимость теплоотдачи от поперечного шага установки труб имеет отличный характер по сравнению со свободноконвективным теплообменом.

**Ключевые слова:** воздухоохлаждаемый теплообменник, естественная конвекция, биметаллическая ребристая труба, вытяжная шахта, число Грасгофа, число Нуссельта, подъемно-вытяжной перепад давления, коэффициент теплоотдачи.

**INVESTIGATION OF A MIXED-CONVECTIVE HEAT TREATMENT OF SINGLE-  
AIR AIR COOLED EXCHANGERS IN VARIOUS CROSS-STEPS PIPE INSTALLATION**

**A. B. Sukhotskii, G. S. Sidorik**

**Belarussian state technological university, Minsk, Republic of Belarus**

[alk2905@mail.ru](mailto:alk2905@mail.ru), [galiana.sidorik@gmail.com](mailto:galiana.sidorik@gmail.com)

**Abstract:** The article presents a study of single-row air-cooled heat exchangers consisting of bimetallic rolling aluminum finned tubes with different transverse steps of their installation, equipped with an additional intensifying device - a suction shaft, of various heights. The methodology of processing the obtained experimental data is analyzed and the Nusselt numbers reliance on Grashof numbers are presented. The physical picture of the air flow structure passing through a single-row horizontal finned beam is analyzed. Because of the analysis, it was concluded that the installation of the exhaust shaft above the beam leads to a significant increase in heat transfer by a factor of 2.5-3.0, but the efficiency of heat transfer depends on the height of the extraction shaft and on the back spacing. In such case the mixed convective heat transfer reliance

*on back spacing is differed from a character of dependence as compared to free convection heat exchange.*

**Keywords:** *air-cooled heat exchanger, free convection, bimetallic finned tube, exhaust shaft, Grashof number, Nusselt number, lift-and-exhaust differential pressure, heat transfer coefficient*

Применимость воздухоохлаждаемых теплообменников в различных отраслях промышленности в данный момент расширяется благодаря их экологичности и отсутствия потребности в охлаждающей воде. Наибольшее распространения этот вид теплообменников получил в химической, нефтехимической, нефтеперерабатывающей, газовой и пищевой промышленности, также применяются на автомобильных газонаполнительных компрессорных станциях, в тепло- и электроэнергетике, в холодильной технике, на атомных станциях [1].

При эксплуатации воздухоохлаждаемых теплообменников (ВОТ) актуальной задачей является снижения расхода электрической энергии на работу их вентиляторов. Одним из технических решений уменьшения энергопотребления ВОТ является перевод их работы в течение некоторого периода времени года в безвентиляторный режим, при котором отключаются все или часть вентиляторов охлаждающего воздуха, а отвод теплоты от охлаждаемого рабочего тела (продукта, энергоносителя, теплоносителя) осуществляется свободной конвекцией. Однако теплоотдача оребренных трубных пучков в условиях свободной конвекции является недостаточно изученной. Это объясняется сложностью процессов теплообмена при свободной конвекции [2, 3], особенно на ребристых поверхностях, где присутствует сопряженный теплообмен, и по этой причине становится невозможным применение теоретических методов описания и расчета в виду их громоздкости, неточности, сложности и в некоторых случаях неосуществимости [4]. Теплоотдача при естественной конвекции рассмотрена для одиночных гладких труб [5], одиночных оребренных труб, однорядных и многорядных ребристых пучков [6 – 9].

К сожалению область температур окружающего воздуха, при которых возможно применение ВОТ в условиях свободной конвекции, ограничена. Но при оснащении ВОТ дополнительными устройствами, позволяющими интенсифицировать свободную конвекцию, теплопроизводительность теплообменника может оставаться неизменной при более высоких температурах окружающего воздуха без потребления электроэнергии приводом вентилятора. Одним из таких устройств, не потребляющим энергию, является вытяжная шахта, установленная над ВОТ для увеличения расхода охлаждающего воздуха.

Для исследования влияния вытяжной шахты на тепловую эффективность ВОТ было проведено экспериментальное исследование теплоотдачи однорядных пучков из горизонтально расположенных ребристых труб со спирально накатными алюминиевыми ребрами. Изучались трубы с поперечными шагами  $S_1 = 58, 61, 64$  и  $70$  мм, установленные между фанерными досками толщиной  $4$  мм, а их торцы для снижения тепловых потерь были защищены фторопластовыми втулками. Геометрические размеры биметаллической оребренной трубы следующие, мм: диаметр  $d = 56$ ; диаметр трубы по основанию  $d_0 = 26$ ; высота, шаг, средняя толщина ребра соответственно  $h = 15$ ;  $s = 2,5$ ;  $\Delta = 0,5$ ; длина оребренной части трубы  $l = 300$ . Коэффициент оребрения трубы  $\phi = 21$ . Вытяжная шахта с прямоугольным основанием, переходящим в цилиндрическую трубу, внутренним диаметром  $0,105$  м и высотой  $H_{ш} = 0,52, 1,16, 1,48, 2,1$  м устанавливалась непосредственно над однорядным пучком. Для снижения тепловых потерь вытяжная шахта снаружи покрывалась слоем минерального волокна толщиной  $2-3$  см.

Теплоотдача изучалась методом полного моделирования. Применялся обогрев оребренных труб вставными теплоэлектронагревателями. Средняя труба в пучке являлась калориметром. Схема экспериментальной установки, конструкция трубы-калориметра и ее

оснащение температурными датчиками, аппаратное оформление установки измерительными приборами, методика исследования и порядок проведения опытов изложены в [10]. Во время проведения опытов температура поверхности трубы-калориметра у основания ребер (среднеарифметическая температура по показаниям термопар) изменялась в интервале  $t_{cm} = 30 - 162$  °С, температура окружающего воздуха в камере  $t_0 = 17 - 24$  °С, подводимая к калориметру электрическая мощность  $W = 10 - 200$  Вт.

По данным измерений вычисляли средний приведенный конвективный коэффициент теплоотдачи, отнесенный к полной наружной поверхности, Вт/(м<sup>2</sup>К)

$$\alpha_k = \frac{Q_k}{(t_{cm} - t_0) \cdot F}, \quad (1)$$

где  $Q_k$  – конвективный тепловой поток, Вт;  $F = l \cdot \pi \cdot d_0 \cdot \varphi$  – площадь теплоотдающей оребренной поверхности трубы, м<sup>2</sup>.

Тепловой поток  $Q_k$ , Вт, отведенный от трубы к воздуху конвекцией, рассчитывался из уравнения

$$Q_k = W - Q_{\lambda} - Q_n, \quad (2)$$

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

Тепловые потери через торцевые участки оребренной трубы вычислялись на основании предварительно проведенных опытов по следующей формуле [11], Вт

$$Q_n = 0,4125 + 0,08663 \cdot W - 1,41106 \cdot 10^{-4} \quad (3)$$

Тепловой поток излучением рассчитывался по рекомендациям [12].

Результаты эксперимента представлялись в виде зависимости числа Нуссельта от числа Грасгофа:

$$Nu = \frac{\alpha_k \cdot d_0}{\lambda}, \quad (4)$$

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot l^3 \cdot (t_{cm} - t_0)}{\nu^2}, \quad (5)$$

где  $\lambda$ ,  $\nu$  – коэффициенты теплопроводности, Вт/(м К), и кинематической вязкости м<sup>2</sup>/с;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\beta$  – коэффициент температурного расширения, К<sup>-1</sup>.

Определяющей температурой для определения числа Нуссельта является температура окружающего воздуха  $t_0$ , °С.

В результате анализа полученных экспериментальных данных у автора сформировалась определенная физическая картина структуры потока воздуха, проходящего через однорядный горизонтальный оребренный пучок, которая схематично представлена на рис. 1. Поток воздуха, проходящий через пучок, условно можно разделить на три части: межреберный (I), обтекающий (II) и межтрубный (III).

Межреберный поток движется в полостях между ребрами трубы и за счет большой поверхности контакта имеет наибольший отбор тепла и, соответственно, максимальное повышение температуры. При этом он обладает также максимальной подъемной силой, обусловленной низкой весовой плотностью, но из-за малого проходного сечения этот поток воспринимает максимальное сопротивление движению.

Обтекающий поток нагревается за счет взаимодействия с поверхности торцов ребер и смешивается с межреберным потоком. Его поведение и характеристики во многом идентичны с потоком, обтекающим гладкую трубу с диаметром равным диаметру оребрения экспериментальной трубы. Сопротивление его движению главным образом оказывает взаимодействие с межтрубным потоком воздуха.

Межтрубный поток, по сути, является паразитным, поскольку препятствует движению обтекающему потоку и непосредственно не участвует в охлаждении трубного пучка. Он практически неподвижен при свободной конвекции, а при смешанной конвекции движется за счет подъемной тяги создаваемой вытяжной шахтой.

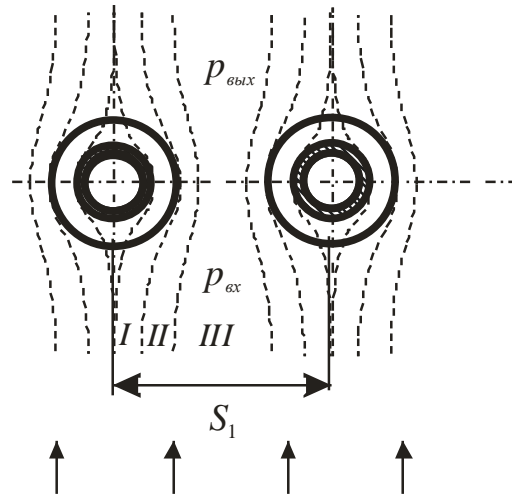


Рис. 1. Схема обтекания воздухом однорядного оребренного пучка

При этом необходимо понимать, что все потоки термодинамически взаимодействуют между собой – обмениваются тепловой и кинетической энергией. За пучком на некотором они полностью перемешиваются, их температуры и скорости выравниваются.

Также на структуру потока существенное влияние оказывает перепад давления воздуха на входе и выходе из пучка  $\Delta p = p_{вх} - p_{вых}$ . При естественной конвекции перепад давления равен нулю, поскольку давление на входе и выходе из пучка равно атмосферному.

При установке вытяжной шахты над пучком общее гравитационное давление пучка и шахты равен их общему аэродинамическому сопротивлению

$$\Delta p_n^{sp} + \Delta p_u^{sp} = \Delta p_n^{con} + \Delta p_u^c \quad (7)$$

где  $\Delta p_n^{sp}$ ,  $\Delta p_u^{sp}$  – гравитационное давление пучка и шахты;  $\Delta p_n^{con}$ ,  $\Delta p_u^{con}$  – аэродинамическое сопротивление пучка и шахты.

Если гравитационное давление шахты больше ее аэродинамического сопротивления  $\Delta p_u^{sp} > \Delta p_u^{con}$ , то давление за пучком меньше атмосферного (вакуум), иначе – больше атмосферного (избыточное). Следовательно, в зависимости от аэродинамических характеристик вытяжной шахты перепад на пучке  $\Delta p = \Delta p_n^{sp} - \Delta p_n^{con}$  может быть и положительным и отрицательным.

Исходя из этого представления о структуре потока воздуха, обтекающего однорядный горизонтальный пучок оребренных труб, ниже представлен анализ полученных экспериментальных данных.

На рис.2 представлены в логарифмическом виде зависимости числа Нуссельта от числа Грасгофа для различных поперечных шагов при свободной конвекции воздуха. Как видно, максимум интенсивности теплоотдачи достигается при поперечных шагах 61 и 64 мм. Это обусловлено тем, что при больших поперечных шагах дополнительное аэродинамическое сопротивление движению обтекающему потоку создает практически неподвижный межтрубный поток. По сути, обтекание трубы воздухом аналогично обтеканию одиночной трубы. При уменьшении шага снижается межтрубное поперечное сечение и соответственно уменьшается влияние паразитного межтрубного потока. При оптимальных шагах 61 и 64 мм

межтрубный холодный поток отсутствует, обтекающий поток соседних труб объединяется в единый поток. При малых же поперечных шагах обтекающий поток оказывается зажатым между трубами и его расход снижается, что ведет к снижению теплоотдачи.

Так же на рисунке видно снижение теплоотдачи при числах Грасгофа  $Gr > 4 \cdot 10^5$ . Это, по-видимому, обусловлено тем, что при больших температурах из-за возрастания вязкости воздуха рост интенсивности межреберного потока практически не происходит, а интенсивность съема тепла обтекающим потоком снижается из-за уменьшения эффективности отвода тепла ребрами при больших перепадах температур. Поэтому подобное снижение интенсивности теплоотдачи при высоких числах Грасгофа для гладких труб в условиях естественной конвекции воздуха отсутствует.

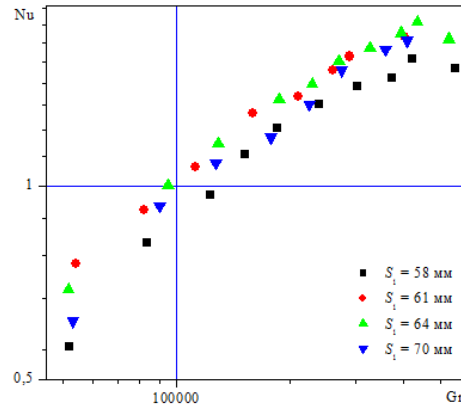


Рис. 2. Зависимость чисел Нуссельта от чисел Грасгофа при различных поперечных шагах для свободной конвекции

На рис. 3, а и б представлены в логарифмическом виде зависимости  $Nu = f(Re)$  для различных поперечных шагов в условиях смешанной конвекции с высотой вытяжной шахты  $H_{ш} = 0,52$  и  $2,12$  м, соответственно. Как видно, в отличие от свободной конвекции, для смешанной конвекции при уменьшении поперечного шага интенсивность теплоотдачи к воздуху возрастает, и максимум не наблюдается. Это обусловлено тем, что под действием гравитационного давления шахты межтрубный поток находится в активном движении и не препятствует перемещению обтекающего потока.

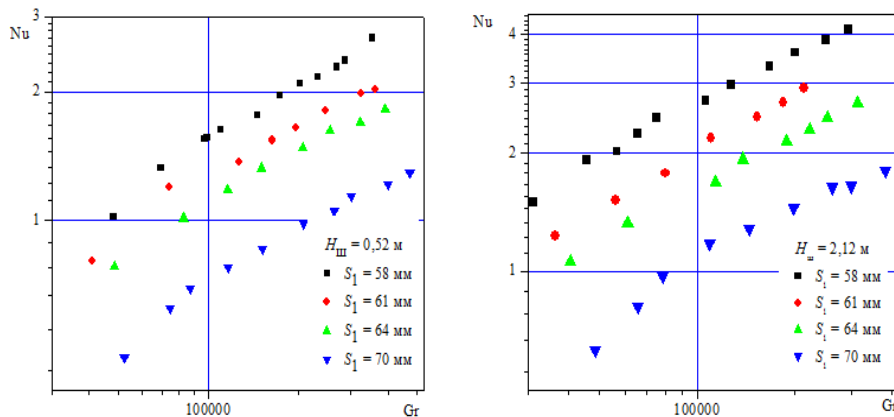


Рис. 3. Зависимость чисел Нуссельта от чисел Грасгофа для различных поперечных шагов при высоте шахты: 0,52 м (а), 2,12 м (б)

На рис. 4, *a* и *б* представлены зависимости числа Нуссельта от числа Грасгофа для различных высот вытяжной шахты и без шахты для поперечных шагов 58 и 70 мм, соответственно. На рис. 4, *a* видно, что установка вытяжной шахты над пучком приводит к значительному росту теплоотдачи в 2,5-3,0 раза. На рис. 4, *б* наблюдается противоположная картина – установка шахты над пучком приводит к снижению числа Нуссельта и только при высоте шахты 2,12 м происходит незначительный рост теплоотдачи.

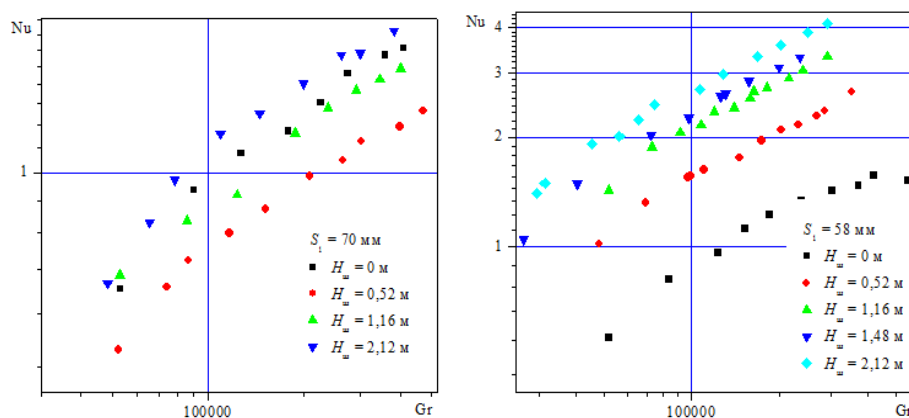


Рис. 4. Зависимость чисел Нуссельта от чисел Грасгофа для различных высот шахты при поперечных шагах: 58 мм (а), 70 мм (б)

Это объясняется тем, что пучок с шагом  $S_1 = 70$  мм обладает незначительным аэродинамическим сопротивлением  $\Delta p_n^{con}$  (проходное сечение  $0,066$  м<sup>2</sup>), а при установке над ним вытяжной шахты с диаметром 105 мм (проходное сечение  $0,0087$  м<sup>2</sup>) и более высоким аэродинамическим сопротивлением создается подпор, который приводит к росту давления за пучком выше атмосферного, т. е. создаются условия, при которых перепад давления воздуха на пучке становится отрицательным. В результате вытяжная шахта снижает расход межреберного и обтекающего потока воздуха. При высоте шахты 1,16 м гравитационное давление шахты уменьшает давление за пучком до примерно равного атмосферному, и теплоотдача пучка становится аналогичной, как в условиях свободной конвекции. Дальнейшее увеличение высоты шахты приводит к снижению давления за пучком, росту межреберного и обтекающего потока воздуха, увеличению теплоотдачи пучком.

На рис. 5 представлены зависимости числа Нуссельта от высоты вытяжной шахты  $H$  при различных поперечных шагах  $S_1$  (рис. 5, *a*) и числа Нуссельта от поперечного шага  $S_1$  при различных высотах вытяжной шахты  $H$  (рис. 5, *б*) при постоянном числе Грасгофа  $Gr = 10^5$ .

Как видно, наибольшее значение числа Нуссельта ( $Nu = 2,64$ ) достигается в пучке с поперечным шагом 58 мм и высотой вытяжной шахты 2,12 м. Причем увеличение теплоотдачи по сравнению с пучком с поперечным шагом 70 мм достигается в 2,43 раза (рис. 5, *a*), а со свободной конвекцией – в 4,4 раза. Однако следует отметить, что полученные зависимости существенно зависят от аэродинамического сопротивления вытяжной шахты (главным образом диаметра) и при других ее параметрах характер зависимостей может существенно измениться. Тем не менее, полученные экспериментальные данные позволили составить общую картину процессов, происходящих в однорядном пучке в условиях смешанной конвекции, созданной с помощью вытяжной шахты.

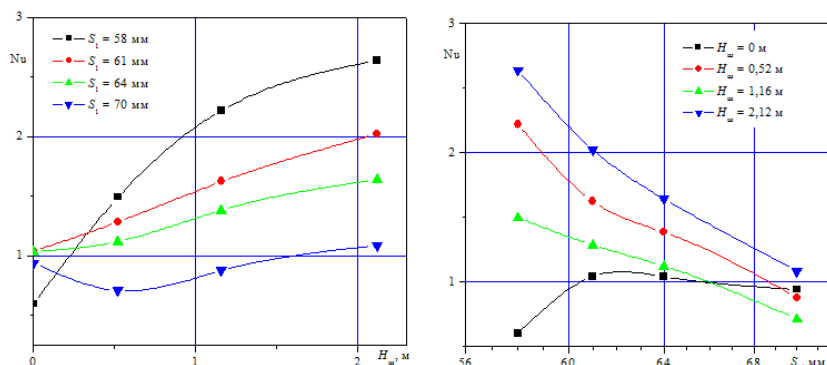


Рис. 5. Зависимости числа Нуссельта от высоты вытяжной шахты  $H$  при различных поперечных шагах  $S_1$  (а) и от поперечного шага  $S_1$  при различных высотах вытяжной шахты  $H$  (б) при постоянном числе Грасгофа  $Gr = 10^5$

### Литература

1. Кунтыш В. Б., Бессонный А. Н. Примеры расчетов нестандартизированных эффективных теплообменников. СПб.: Недра, 2000. 300 с.
2. Jaluria Y. Natural Convection: Heat and Mass Transfer. Oxford; New York: Pergamon Press, 1980, 326 p.
3. Gebhart V. Natural convection flows and stability. Advances in Heat Transfer, Academic Press. N.Y., Vol. 9, p. 273. 1973.
4. Кунтыш В.Б., Позднякова А.В., Третьяков П.А. Обобщение экспериментальных данных по свободной конвекции для трехрядных коридорных пучков из БРТ // Труды пятой Российской национальной конференции по теплообмену. Т.8, 2010 г. – С. 92–94.
5. 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.
6. Самородов А. В. Совершенствование методики теплового расчета и проектирования аппаратов воздушного охлаждения с шахматными оребренными пучками: Авторефдис. канд. техн. наук 05.14.14. 1999. С. 3–22.
7. Новожилова А. В. Анализ методик определения теплоотдачи воздуха на оребренных поверхностях нагрева при свободной конвекции // Проблемы теплоэнергетики Европейского севера: сб. науч. тр. – Архангельск: Северный (Арктический) федеральный университет, 2010. – С. 88–97.
8. Мартыненко О. Г., Сокоविшин Ю. А. Свободно-конвективный теплообмен: Справочник. – Мн.: Наука и техника, 1982. – 400 с.
9. Новожилова А. В., Марьина З. Г., Львов Е. А. К расчету теплообмена коридорных пучков из биметаллических ребристых труб при различных углах наклона труб в режиме свободной конвекции // Тез. докл. и сообщений XV Международного форума по тепло- и массообмену, Минск, 23 – 26 мая 2016 г., Минск, 2016 г. – С. 157 – 161.
10. Сухоцкий А. Б., Фарафонов В. Н., Филатов С. О., Сидорик Г. С. Разработка стенда и исследование свободной конвекции одиночной оребренной трубы при различных углах наклона // Труды БГТУ. Сер. I. Лесн. хоз-во, природопольз. и переработка возобн. рес. – 2017 г. Вып I. - Минск: БГТУ, 2017. – С. 169–175.
11. Сидорик Г. С. Экспериментальная установка для исследования свободноконвективного теплообмена ребристых труб воздухоохлаждаемых теплообменников // ЖУРНАЛ «ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ МОЛОДЕЖНЫЙ ЖУРНАЛ» МГТУ ИМ. Н.Э. БАУМАНА. - Москва: МГТУ ИМ. Н.Э. БАУМАНА, 2016. – С. 1–7.

12. Самородов А. В. К расчету теплообмена излучением круглоребристых труб и пучков // Тр. лесинженерного факультета Петрозаводского гос. ун-та. 1999. Вып. 2. С. 135–142.

#### **Авторы публикации**

**Сухоцкий Альберт Борисович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры энергосбережения, гидравлики и теплотехники. Белорусский государственный технологический университет. E-mail: alk2905@mail.ru.

**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. Тел. +375-29-797-47-00.

#### **References**

1. Kuntysch V. B. Bessonnyj A. N. Examples of calculations of non-standardized effective heat exchangers. SPb.: Nedra, 2000. 300 p.
2. Jaluria, Y., 1980. Natural Convection: Heat and Mass Transfer. Oxford: New York: Pergamon Press, p. 326.
3. Gebhart B., 1973. Natural convection flows and stability. Advances in Heat Transfer, Academic Press. N.Y., Vol. 9, p. 273.
4. Kuntysch V. B., Pozdnyakova A. V., Tretjakov P. A. Generalization of experimental data on free convection for three-row corridor bundles from bimetallic ribbed pipes / Proceedings of the Fifth Russian National Heat Transfer Conference. Vol. 8, 2010. P. 92–94.
5. Korolenko Ju. A. Heat transfer from a horizontal bundle of pipes to air under conditions of free convection // Izvestiya of the Tomsk Order of the Red Banner of Labor of the Polytechnic Institute named after SM. Kirov 1962. № 110. P. 26–33.
6. Samorodov A. V. Improvement of the method of thermal calculation and design of air cooling units with staggered finned beams: Avtoref dis. kand. tehn. nauk 05.14.14. 1999. P. 3–22.
7. Novozhilova A. V. Analysis of methods for determining the heat transfer of air on finned heating surfaces under free convection // Problems of heatpower engineering in the European North: Sat. Sci. Tr. – Arkhangelsk: Northern (Arctic) Federal University, 2010. – P. 88–97.
8. Martynenko O. G., Sokovishin Ju. A. Free-convective heat transfer: Handbook. - Mn.: Science and Technology, 1982. – 400 p.
9. Novozhilova A. V. To the calculation of the heat exchange of corridor bundles from bimetallic ribbed pipes at different tube angles in the free convection regime // Abstracts and reports of the XV International Forum on Heat and Mass Transfer, Minsk, May 23 – 26, 2016, Minsk, 2016. – P. 157 – 161.
10. Suhockij A. B., Farafontov V. N., Filatov S. O., Sidorik G. S. Development of the stand and investigation of free convection of a single finned tube at different angles of inclination // Proceedings of BSTU. Ser. I. Forestry, nature management and processing of renewable resources – 2017. Vol. I. – Minsk: BSTU, 2017. P. 169 – 175.
11. Sidorik G. S. Experimental installation for investigating the free convection heat exchange of finned tubes of air-cooled heat exchangers // JOURNAL "POLYTECHNICAL YOUTH MAGAZINE" MSTU IM. N.E. BAUMANA. – Moscow: MSTU IM. N.E. BAUMANA, 2016. – pp. 1–7.
12. Samorodov A. V. To the calculation of heat transfer by radiation of round-rimmed tubes and bundles, Tr. Forest Engineering Faculty of Petrozavodsk State University. University. 1999. V. 2. P. 135–142.

#### **Authors of the publication**

**Sukhotskii Albert Borisovicz** – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor in the Department of Energy Saving, Hydraulics and Heat Engineering, Belarusian State Technological University



© А.Б. Сухоцкий, Г.С. Сидорик

E-mail: alk2905@mail.ru. Tel.+375-29-570-81-47.

*Sidorik Galina Sergeevna* – PhD student in 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 в редакцию*

*24 мая 2017 г.*