



Экспериментальное исследование влияния внешнего загрязнения на тепловую мощность трубчатого ребристого конвектора

В ходе исследования авторами обнаружено, что при естественной конвекции в трубах с тесным расположением рёбер загрязнение межрёберного пространства у основания оребрения не приводит к существенному снижению тепловой мощности (менее 10%), а ухудшение теплоотдающих свойств трубы происходит только при загрязнении верхушек оребрения (на 20,5%). Температура по высоте боковой поверхности ребра уменьшается незначительно (менее 2%), а на верхушке ребра по отношению к основанию — на 6–9%. Следовательно, при эксплуатации ребристых конвекторов систем отопления не обязательна их частая и тщательная очистка от загрязнений.

Введение

Во многих странах, в том числе и в России, расширяется применение в системах отопления трубчатого-ребристых нагревательных приборов — конвекторов, которые характеризуются малой инерционностью и металлоёмкостью, простотой изготовления, возможностью механизировать и автоматизировать их производство [1, 2]. Одним из видов конструктивного исполнения конвектора является биметаллическая труба с круглыми алюминиевыми рёбрами. Площадь внешней поверхности ребристой трубы во много раз больше, чем площадь поверхности

гладкой трубы того же диаметра и длины, что придаёт отопительному прибору особую компактность.

К недостаткам конвекторов относится трудоёмкость очистки от пыли. При эксплуатации конвектора происходит снижение его тепловой мощности в результате загрязнения внутренней и наружной теплообменной поверхности.

Во многих странах расширяется применение в системах отопления трубчатого-ребристых нагревательных приборов — конвекторов, которые характеризуются малой инерционностью и металлоёмкостью, простотой изготовления, возможностью механизировать и автоматизировать их производство

Методики теплогидравлического расчёта оребренных биметаллических труб для вынужденной и свободной конвекции приведены во многих источниках [3–9]. В справочной литературе [3, 4] имеется достаточно большое количество проверенных практикой данных по величине термического сопротивления движущихся внутри трубы различных охлаждаемых технологических энергоносителей.

Рецензия эксперта на статью получена 26.06.2019 [Expert review on the article received on June 26, 2019].

УДК 536.24:66.045. Научная специальность: 05.14.04.

Экспериментальное исследование влияния внешнего загрязнения на тепловую мощность трубчатого ребристого конвектора

Альберт Б. Сухоцкий, к.т.н., доцент; Екатерина С. Данильчик, аспирант, Белорусский государственный технологический университет (БГТУ, г. Минск, Республика Беларусь)

Проведено экспериментальное исследование интенсивности теплового потока и распределение температур на оребренной чистой и загрязненной поверхности трубчатого ребристого конвектора со спиральными алюминиевыми ребрами при свободной конвекции воздуха. Исследования проводились методом полного теплового моделирования на специально разработанном экспериментальном стенде, а кольцевое равномерное загрязнение оребренной трубы создавалось путём плотной намотки между ребрами льняного шнура или обёртыванием трубы алюминиевой фольгой.

Ключевые слова: биметаллическая ребристая труба, конвектор, загрязнение, тепловая мощность при естественной конвекции воздуха.

UDC 536.24:66.045. The number of scientific speciality: 05.14.04.

An experimental study of the influence of external impurity on the thermal rating of a tubular ribbed convector

Albert B. Sukhotski, PhD, Assistant Professor; Catherine S. Danil'chik, postgraduate student, Belarusian State Technological University (BSTU, Minsk city, Republic of Belarus)

The experimental research of intensity of a thermal stream and distribution of temperatures on ribbed pure and low-purity surface of the tubular ridge convector with spiral aluminium ribs is spent at air free convection. Researches were spent by a method of full thermal model testing at specially developed experimental stand, and ring uniform pollution ribbed tubes was created by dense winding between ribs of a linen cord or wrapping of tube by an aluminium foil.

Key words: bimetallic ribbed tube, convector, impurity, heat rating with natural convection.

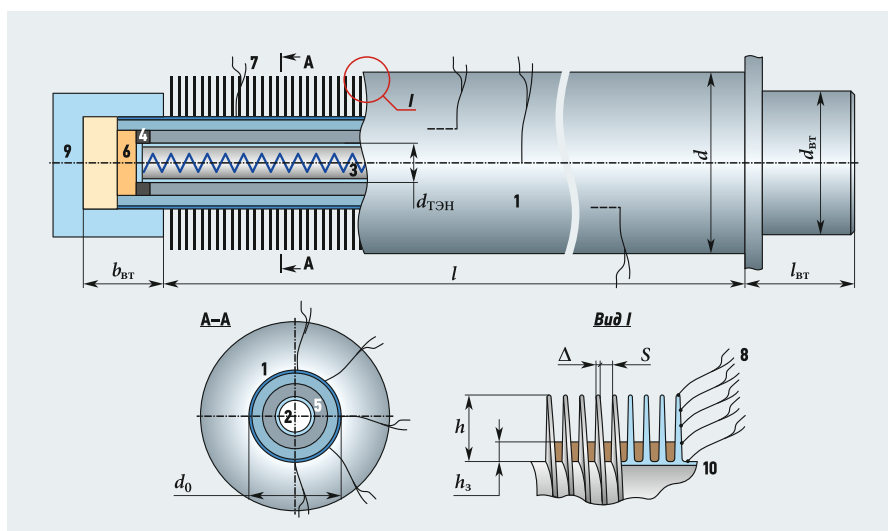


Рис. 1. Общий вид калориметрической трубы [1 — биметаллическая ребристая труба; 2 — трубчатый электронагреватель (ТЭН); 3 — спираль ТЭНа; 4 — центровочное кольцо; 5 — кварцевый песок; 6 — высокотемпературная силиконовая замазка; 7 — медь-константановые термодатчики у основания рёбер; 8 — медь-константановые термодатчики по высоте ребра; 9 — фторопластовая втулка; 10 — льняная верёвка]

Подходы к учёту внешнего загрязнения представлены только для вынужденной конвекции и принципиально противоположны. По мнению специалистов [4, 5], влияние загрязнения с воздушной стороны можно не учитывать, так как коэффициент теплоотдачи от оребрения к охлаждающему воздуху низок, и поэтому термическое сопротивление теплоотдачи с внешней стороны является определяющим в общем термическом сопротивлении теплопередачи. Однако натурные экспериментальные исследования [10, 11] теплопередачи аппаратов воздушного охлаждения из биметаллических ребристых труб с накатанными алюминиевыми рёбрами указывают на уменьшение коэффициента теплопередачи от внешнего загрязнения оребрения до 12% при вынужденной конвекции.

Разработаны также теоретические модели расчёта коэффициента теплопередачи оребрённой биметаллической трубы с кольцевым равномерным загрязнением [12–15] для разреженных круглых рёбер, которые, однако, не подтверждены экспериментальными данными.

Цель работы — экспериментальное исследование интенсивности теплового потока и распределение температур на оребрённой чистой и загрязнённой поверхности кругло-ребристой трубы при свободной конвекции воздуха.

Основная часть

Объектом исследования являлась биметаллическая ребристая труба со спиральными накатными рёбрами.

Материал ребристой оболочки — алюминиевый сплав АД1М, материал несущей



щей трубы — углеродистая сталь Ст10. Диаметр несущей трубы — $d_n = 25$ мм, толщина стенки — $\delta = 2$ мм. Геометрические параметры оребрения: наружный диаметр ребра — $d = 56$ мм; высота ребра — $h = 14,6$ мм; диаметр по основанию ребра $d_0 = d - 2h = 26,8$ мм; шаг ребра — $s = 2,5$ мм; средняя толщина ребра — $D = 0,5$ мм; коэффициент оребрения трубы — $\phi = 19,26$. Полная длина биметаллической трубы с торцевыми участками 330 мм, теплоотдающая длина $l = 300$ мм.

Исследования проводились методом полного теплового моделирования на специально разработанном в [16] экспериментальном стенде для исследования свободно-конвективного теплообмена.

В центре стендовой камеры размера $0,8 \times 0,8 \times 1,0$ м размещалась исследуемая оребрённая труба, которая являлась калориметром с установленными средствами измерения.

Конструкция опытной трубы-калориметра представлена на рис. 1. Внутри биметаллической ребристой трубы 1, указан-

ной выше, установлен трубчатый электронагреватель (ТЭН) 2 со следующими параметрами: диаметр — 12,5 мм, длина — 320 мм, мощность — 320 Вт. Внутри оболочки ТЭНа, выполненного из углеродистой стали, размещена спираль 3 из проволоки с высоким омическим сопротивлением и наполнитель (электротехнический периклаз марки ППЭ). С помощью центровочного кольца 4 обеспечивалось центральное расположение ТЭНа в трубе. С целью устранения внутренних конвективных токов воздуха и равномерного прогрева ребристой трубы между ТЭНом и стальной стенкой трубы засыпался кварцевый песок 5 дисперсным составом 0,16–0,32 мм. Торцы трубок герметизировались высокотемпературной силиконовой замазкой 6.

Для измерения средней температуры поверхности калориметра у основания рёбер $t_{осн}$ зачеканивались свинцом пять медь-константановых термодатчиков 7 вдоль образующей трубы, сдвинутых относительно друг друга на угловое расстояние 45° . Термодатчики были заложены у основания рёбер вдоль образующей трубы по винтовой линии на половине окружности трубы, при допущении, что вторая половина имеет симметричное поле температур. Также на поверхности ребра, размещённого в центре трубы, припаивались четыре медь-константановых термодатчика 8 (диаметр провода 0,2 мм) с шагом 3,65 мм от основания по высоте 3,65 мм и последней термодатчиком, размещённой на верхушке ребра (рис. 1, сечение I). Предварительно термодатчики были протарированы с точностью $0,1^\circ\text{C}$. Торцевые участки оребрённой трубы защищены фторопластовыми втулками 9 наружным диаметром $d_{вт} = 45$ мм, длиной $l_{вт} = 35$ мм, глубиной $b_{вт} = 25$ мм. С целью измерения торцевых потоков тепла на поверхности обеих втулок с противоположных сторон закреплялось по два спаянной общей четырёхсторонней медь-константановой дифференциальной термобатарей.

Показания медь-константановых термодатчиков 7 и 8 фиксировались с помощью вольтметра (модель GDM-78341 класса точности 0,25), подключённого через переключатель. Холодный спай всех термодатчиков помещался в сосуд Дьюара.

При исследовании кольцевое равномерное загрязнение оребрённой трубы создавалось путём плотной намотки между рёбрами льняного шнура 10 диаметром 1,7–2,3 мм и средней теплопроводностью $\lambda_3 = 0,05$ Вт/(м·К). То есть в межрёберном пространстве создавался слой высотой $h_3 = 3,3; 6,3; 8,7; 11,4$ и $16,1$ мм с неравномерностью $\pm 0,4$ мм (рис. 2а).

Показания медь-константановых термопар 7 и 8 фиксировались с помощью вольтметра (модель GDM-78341), подключённого через переключатель. Холодный спай всех термопар помещался в сосуд Дьюара

Также для обеспечения максимального термического сопротивления межрёберного пространства чистая оребрённая труба герметично обматывалась алюминиевой фольгой толщиной 0,3 мм (рис. 26). Таким образом, достигалось заполнение межрёберного пространства неподвижным воздухом и обеспечивалось максимальное снижение тепловой эффективности ребристой трубы.

Подвод теплового потока к оребренным поверхностям обеспечивался ТЭНом, который подключался к регулируемому масляному трансформатору (модель АОМН-40-220-75). Мощность, подводимая к оребренной трубе, измерялась ваттметром (модель K505 класса точности 0,5). Температура воздуха t_0 внутри камеры измерялась двумя ртутными лабораторными термометрами со шкалой 0–50°C и ценой деления 0,1°C, расположенными в диагонально противоположных её углах. Ртутные шарики термометров защищались от излучения пучка экранами из алюминиевой фольги.

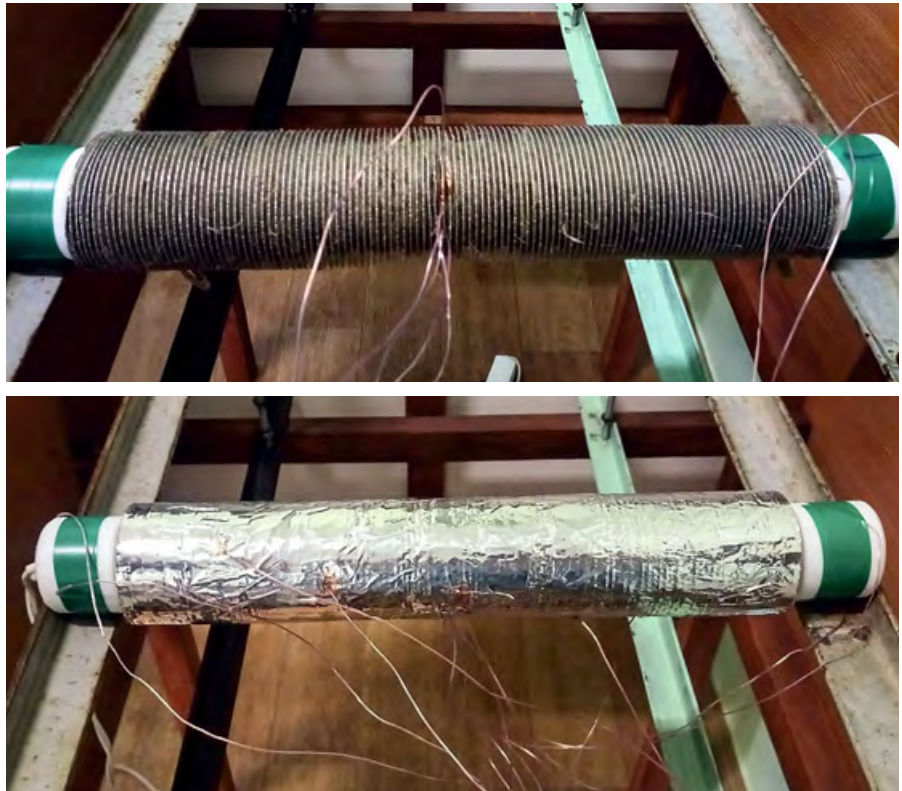
Теплота от оребренной поверхности конвекцией и излучением передавалась атмосферному воздуху, который за счёт разности плотностей нагретого и холодного воздуха поднимался вверх в окружающую среду. Во время экспериментального исследования оребренной трубы электрическая мощность, подводимая к трубе, поддерживалась постоянной для льняного шнура $W = 40 \pm 2$ Вт и изменялась для воздуха W в пределах от 10,3 до 77,5 Вт, температура стенки у основания рёбер составляла $t_{\text{осн}} = 80\text{--}94^\circ\text{C}$, а температура окружающего воздуха в камере $t_0 = 18,4\text{--}20,1^\circ\text{C}$.

Удельный тепловой поток q [Вт/м] (на 1 п.м. длины конвектора) отведённый от трубы к воздуху конвекцией и излучением, рассчитывался из уравнения:

$$q = \frac{W - Q_{\text{п}}}{l},$$

где $Q_{\text{п}}$ — тепловые потери через торцы труб и токоподводы (рассчитывались через ранее полученную экспериментальную зависимость по средней температуре на поверхности втулок), Вт.

Результаты экспериментов представлены на рис. 3 и 4.



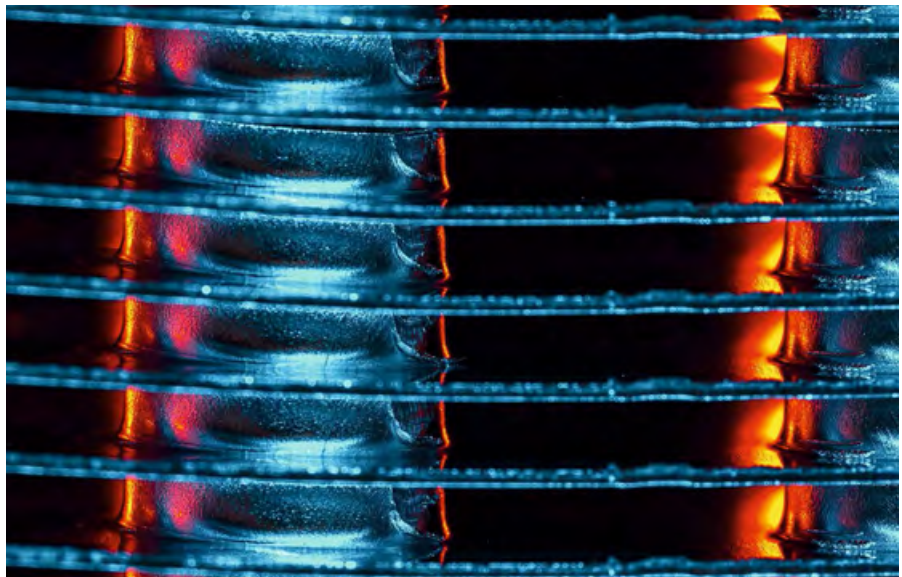
.. Рис. 2. Исследование кольцевого равномерного загрязнения оребренной трубы путём намотки льняного шнура (а) и обматыванием фольги (б)

На рис. 3 показана зависимость относительной тепловой мощности трубы $q/\Delta t_{\text{осн}}$ от термического сопротивления загрязнения $R_3 = h_3/l_3$, где $\Delta t_{\text{осн}} = t_{\text{осн}} - t_0$ — среднее превышение температуры у основания оребрения над температурой окружающей среды. При размещении в межрёберном пространстве неподвижного воздуха $h_3 = h = 14,6$ мм, а коэффициент теплопроводности воздуха l_3 определялся в зависимости от средней температуры по поверхности ребра.

Как видно, при высоте загрязнения меньше высоты ребра ($h_3 < h = 14,6$ мм) тепловая мощность трубы уменьшается незначительно (менее 10%). При полном закрытии оребрения слоем загрязнения

из льняного шнура ($h_3 = 16,1$ мм) тепловая мощность уменьшается на 20,5%. По-видимому, это обусловлено тем, что при естественной конвекции в трубах с тесным расположением рёбер в межрёберном пространстве у основания рёбер воздух остаётся практически неподвижным и является естественным изолятором, а основной отвод теплового потока осуществляется с верхушек оребрения.

Поэтому загрязнение межрёберного пространства у основания оребрения не приводит к существенному снижению тепловой мощности, а ухудшение теплоотдающих свойств трубы происходит только при загрязнении непосредственно верхней части оребрения.



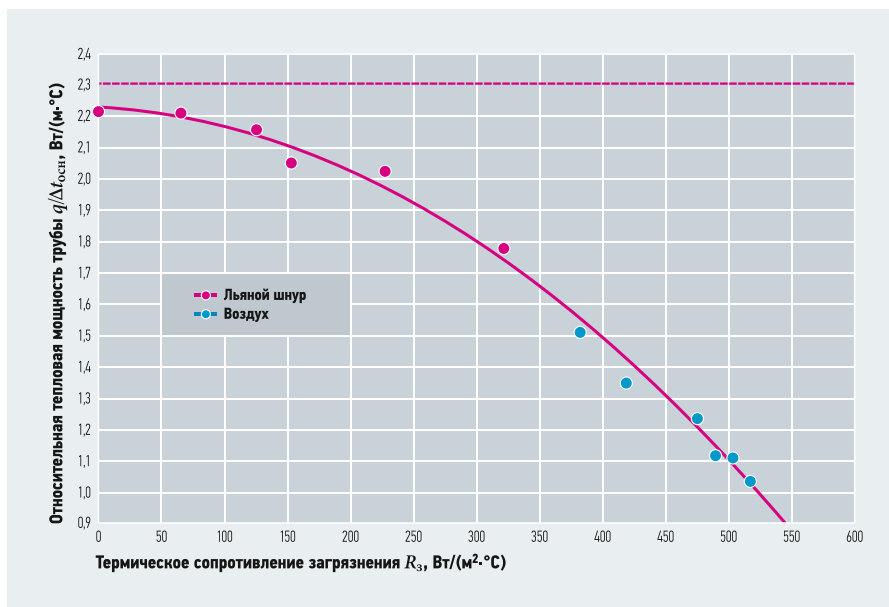


Рис. 3. Зависимость относительной тепловой мощности трубы $q/\Delta t_{\text{очн}}$ от термического сопротивления загрязнения $R_3 = h_3/l_3$

При изоляции межрёберного пространства неподвижным воздухом тепловая мощность снижается до 55 %.

Это предположение косвенно подтверждается путём сравнения относительной тепловой мощности оребрённой трубы с тепловой мощностью гладкой трубы диаметром, равным диаметру оребрения $d = 56$ мм (на рис. 3 представлена в виде пунктирной линии), рассчитанной по [17]. Как видно, тепловые мощности чистой оребрённой трубы и гладкой трубы сопоставимы, что подтверждает представление об интенсивном отводе тепла с вершущек рёбер.

На рис. 4 представлены зависимости относительного перепада температуры $(t_p - t_0)/q$ по высоте ребра h для чистой и загрязнённой оребрённой трубы, где t_p — температура на поверхности ребра

определённая термодарами 8 (рис. 1, сечение I). Пунктирной линией на рисунке показана граница раздела чистой и загрязнённых областей оребрённой поверхности (выше пунктирной области температуры t_p определялись термодарами, закрытыми загрязнением). Как видно, температура по высоте боковой поверхности ребра уменьшается незначительно (менее 2 %), а на вершущке ребра по отношению к основанию — на 6–9 %.

Закключение

Проведено экспериментальное исследование интенсивности теплового потока и распределение температур на оребрённой чистой и загрязнённой поверхности круглой трубы при свободной конвекции воздуха. При загрязнении оребрённой поверхности только у основания рёбер

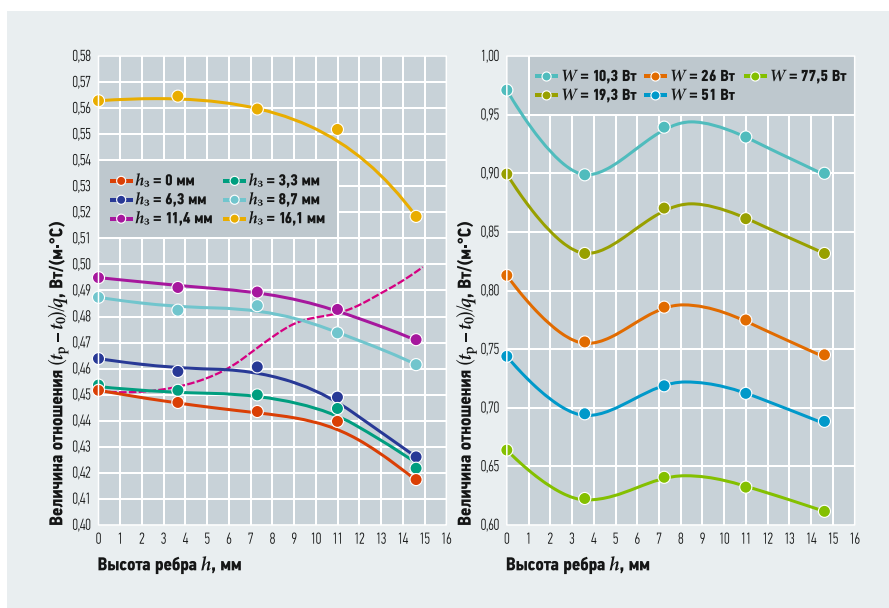


Рис. 4. Зависимости относительного перепада температуры $(t_p - t_0)/q$ по высоте ребра h для чистой ($h_3 = 0$), загрязнённой льняным шнуром (а) и неподвижным воздухом (б) оребрённой трубы с высотой загрязнения h_3 и тепловой мощностью W

тепловая мощность теплообменной трубы уменьшается менее чем на 10%. Предельное загрязнение межрёберного пространства неподвижным воздухом уменьшило тепловую мощность более чем в два раза. Следовательно, при эксплуатации трубчатых ребристых конвекторов не обязательна их частая и тщательная очистка от глубоких межрёберных плотных загрязнений. ●

1. Скани А.Н., Махов Л.М. Отопление. — М.: Изд-во АСВ, 2008. 576 с.
2. Тиатор И. Отопительные системы / Пер. с нем. Т.Н. Зазаевой; под ред. Н.Д. Маловой. — М.: ЗАО «РИЦ «Техносфера», ЗАО «Евроклимат», 2006. 271 с.
3. Кунтыш В.Б., Кузнецов Н.М. Тепловой и аэродинамический расчёты оребрённых теплообменников воздушного охлаждения. — СПб.: Энергоатомиздат, 1992. 280 с.
4. Машины и аппараты химических производств: примеры и задачи / И.В. Доманский, В.П. Исаков, Г.М. Островский и др.; под общ. ред. В.Н. Соколова. — Л.: Машиностроение, 1982. 384 с.
5. Bott T.R. Fouling of Heat Exchangers. Amsterdam. Elsevier Science. 1995. 546 p.
6. Müller-Steinhagen H. Heat Exchanger Fouling. Mitigation and Cleaning Technologies. Essen. Publico Publications. 2000. 382 p.
7. Кунтыш В.Б. и др. Анализ методик расчёта теплопередачи аппаратов воздушного охлаждения // Химическая техника, 2015. №4. С. 7–13.
8. Основы расчёта и проектирования теплообменников воздушного охлаждения: справ. / А.Н. Бессонный, Г.Л. Дрейцер, В.Б. Кунтыш и др.; под ред. В.Б. Кунтыша, А.Н. Бессонного. — СПб.: Недра, 1996. 512 с.
9. Керн Д., Краус А. Развитие поверхности теплообмена. — М.: Энергия, 1977. 464 с.
10. Камалетдинов И.М. Энергосбережение при эксплуатации аппаратов воздушного охлаждения на магистральных газопроводах: автореф. дисс. канд. техн. наук. по спец. 25.00.19. — Уфа, 2002. 24 с.
11. Беркутов Р.А. Повышение энергоэффективности систем охлаждения газа на компрессорных станциях: автореф. дисс. канд. техн. наук. по спец. 25.00.19. — Уфа, 2010. 26 с.
12. Володин В.И., Кунтыш В.Б., Петреева Н.Г. и др. Влияние внешнего загрязнения на эффективность теплообменных аппаратов воздушного охлаждения / XIV Минский межд. форум по тепло- и массообмену: тез. докл. и сообщ. 10–13 сентября, 2012. — Минск: ИТМО имени А.В. Лыкова НАН Беларуси, 2012. Т. 3. С. 315–317.
13. Сухоцкий А.Б. и др. Дифференцированный учёт термического сопротивления внешнего загрязнения оребрения труб шахматных пучков в тепловом расчёте воздухоохлаждаемых теплообменников / XV Минский межд. форум по тепло- и массообмену: тез. докл. и сообщ. 23–26 мая, 2016. — Минск: ИТМО им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, 2016. Т. 3. С. 424–426.
14. Карлович Т.Б. Теплопередача круглых ребристых труб при неравномерном эксплуатационном загрязнении межрёберного пространства // Инженерно-физический журнал, 2018. Т. 91. №5. С. 1278–1286.
15. Дударев В.В., Филатов С.О., Карлович Т.Б. Методика расчёта и анализ коэффициента теплопередачи биметаллических ребристых труб аппаратов воздушного охлаждения с неравномерным внешним загрязнением // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Серия: Энергетика, 2017. Т. 60. №3. С. 237–255.
16. Сидорик Г.С. Экспериментальный стенд для исследования тепловых и аэродинамических процессов смешанно-конвективного теплообмена кругло-ребристых труб и пучков // Труды БГТУ. Серия: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов, 2018. №1. С. 85–93.
17. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. Изд. 2-е, стер. — М.: Энергия, 1973. 344 с.

References — see page 94.

An experimental study of the influence of external impurity on the thermal rating of a tubular ribbed convector. Pp. 24–28.

Albert B. Sukhotskiy, PhD, Assistant Professor; **Catherine S. Danil'chik**, postgraduate student, Belarusian State Technological University (BSTU, Minsk city, Republic of Belarus)

1. Skanavi A.N., Mahov L.M. *Otoplenie* [Heating]. Moscow. Izd-vo ASV [Publishing House of the Association of Construction Universities]. 2008. 576 p. [In Russian]
2. Tiator I. *Otopitel'nye sistemy* [Heating systems]. Transl. from German by T.N. Zazaevoy. Edited by N.D. Malovoj. Moscow. ZAO "RIC "Tekhnosfera", ZAO "Evroklimat" ["RIC "Tekhnosfera", CJSC. "Euroclimate", CJSC]. 2006. 271 p. [In Russian]
3. Kuntyshev V.B., Kuznetsov N.M. *Teplovoj i aerodinamicheskij raschet otrebnykh teploobmennikov vozdušnogo ohlazhdenija* [Thermal and aerodynamic calculations of finned air-cooled heat exchangers]. St. Petersburg. *Jenergoatomizdat* [Publishing House of Energy and Nuclear Industry]. 1992. 280 p. [In Russian]
4. Domanskij I.V. et al. *Mashiny i apparaty himicheskikh proizvodstv: primery i zadachi* [Machines and equipment for chemical production: examples and tasks]. Leningrad. *Mashinostroenie* ["Engineering Industry" Publishers]. 1982. 384 p. [In Russian]
5. Bott T.R. Fouling of Heat Exchangers. Amsterdam. Elsevier Science. 1995. 546 p.
6. Müller-Steinhagen H. Heat Exchanger Fouling, Mitigation and Cleaning Technologies. Essen. Publico Publications. 2000. 382 p.
7. Kuntyshev V.B. et al. *Analiz metodik rascheta teploperedachi apparatov vozdušnogo ohlazhdenija* [Analysis of methods for calculating the heat transfer air coolers]. *Himicheskaja tehnika* ["Chemical technology" Magazine]. 2015. No. 4. Pp. 7–13. [In Russian]
8. Bessonnyj A.N., Drejser G.L., Kuntyshev V.B. et al. *Osnovy rascheta i proektirovaniya teploobmennikov vozdušnogo ohlazhdenija: sprav. / Pod obshh. red. V.B. Kuntysheva, A.N. Bessonnygo* [Fundamentals of calculation and design of air-cooled heat exchangers: A textbook. Edited by V.B. Kuntyshev, A.N. Bessonnyj]. St. Petersburg. *Nedra* ["Bowels of the Earth" Publishers]. 1996. 512 p. [In Russian]
9. Kern D., Kraus A. *Razvitye poverhnosti teploobmena* [Developed heat transfer surfaces]. Moscow. *Jenergiya* ["Energy" Publishers]. 1977. 464 p. [In Russian]
10. Kamaletdinov I.M. *Jenergosberezhenie pri jekspluatacii apparatov vozdušnogo ohlazhdenija na magistral'nykh gazoprovodakh: avtoref. diss. kand. tehn. nauk. po spec. 25.00.19* [Energy saving in the operation of air coolers on main gas pipelines. The abstract of the thesis of the PhD in the specialty No. 25.00.19]. Ufa. 2002. 24 p. [In Russian]
11. Berkutov R.A. *Povyshenie jenergojeffektivnosti sistem ohlazhdenija gaza na kompressornykh stancijah: avtoref. diss. kand. tehn. nauk. po spec. 25.00.19* [Improving the energy efficiency of gas cooling systems at compressor stations. The abstract of the thesis of the PhD in the specialty No. 25.00.19]. Ufa. 2010. 26 p. [In Russian]
12. Volodin V.I., Kuntyshev V.B., Petreeva N.G. et al. *Vlijanie vneshnego zagryaznenija na jeffektivnost' teploobmennikov apparatov vozdušnogo ohlazhdenija* [The effect of external pollution on the efficiency of heat exchangers for air cooling]. *XIV Minskij mezhd. forum po teplo- i massoobmenu: tez. dokl. i soobshh.* [XIV Minsk International Forum on Heat and Mass Transfer: Abstracts of reports and messages]. September 10–13, 2012. Minsk. *ITMO imeni A.V. Lykova NAN Belarusi* [Lykov Institute of Heat and Mass Transfer of the National Academy of Sciences of the Republic of Belarus]. 2012. Vol. 3. Pp. 315–317. [In Belarussian]
13. Suhockij A.B. et al. *Differencirovannyj uchet termicheskogo soprotivlenija vneshnego zagryaznenija orebrenija trub shahmatnykh puchkov v teplovom raschete vozduhoohlazhdaemykh teploobmennikov* [Differentiated consideration of the thermal resistance of external contamination of the finned tubes of chess beams in the thermal calculation of air-cooled heat exchangers]. *XV Minskij mezhd. forum po teplo- i massoobmenu: tez. dokl. i soobshh.* [XIV Minsk International Forum on Heat and Mass Transfer: Abstracts of reports and messages]. May 23–26, 2016. Minsk. *ITMO im. A.V. Lykova NAN Belarusi* [Lykov Institute of Heat and Mass Transfer of the National Academy of Sciences of the Republic of Belarus]. 2016. Vol. 3. Pp. 424–426. [In Belarussian]
14. Karlovich T.B. *Teploperedacha kruglykh rebristyh trub pri neravnomernom jekspluatsionnom zagryaznenii mezhdurebrennogo prostranstva* [Heat transfer of round finned tubes with uneven operational pollution of the intercostal space]. *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal* [Engineering and Physics Journal]. 2018. Vol. 91. No. 5. Pp. 1278–1286. [In Russian]
15. Dudarev V.V., Filatov S.O., Karlovich T.B. *Metodika rascheta i analiz koeficienta teploperedachi bimetallicheskih rebristyh trub apparatov vozdušnogo ohlazhdenija s neravnomernym vneshnim zagryazneniem* [The method of calculation and analysis of the heat transfer coefficient of bimetallic finned tubes of air-cooled apparatus with uneven external contamination]. *Izvestija vysshih uchebnykh zavedenij i jenergeticheskikh ob#edinenij SNG. Serija: Jenergetika* [News of higher educational institutions and energy associations of the Commonwealth of Independent States. Series: Energy]. 2017. Vol. 60. No. 3. Pp. 237–255. [In Russian]
16. Sidorik G.S. *Jeksperimental'nyj stend dlja issledovanija teplovyh i aerodinamicheskikh processov smeshanno-konvektivnogo teploobmena kruglorebristyh trub i puchkov* [Experimental stand for the study of thermal and aerodynamic processes of mixed-convective heat exchange of circular ridge pipes and beams]. *Trudy BGTU. Serija: Lesnoe hozjajstvo, prirodopol'zovanie i pererabotka vozobnovljajemykh resursov* [Papers of Belarusian State Technological University. Series: Forestry, environmental management and processing of renewable resources]. 2018. No. 1. Pp. 85–93. [In Belarussian]
17. Miheev M.A., Miheeva I.M. *Osnovy teploperedachi* [Basics of heat transfer]. Moscow. *Jenergiya* ["Energy" Publishers]. 1973. 344 p. [In Russian]