



## Экспериментальное исследование влияние внешнего загрязнения на тепловую мощность трубчатого ребристого конвектора

В ходе исследования авторами обнаружено, что при естественной конвекции в трубах с тесным расположением ребер загрязнения межреберного 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 загрязнения.

### Введение

Во многих странах, в том числе и в России, расширяется применение в системах отопления трубчатых 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 ребрами. 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 трубчатых 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 проведенных практикой данных по величине термического сопротивления движущихся внутри трубы различных охлаждаемых технологических энергоносителей.

Рецензия эксперта на статью получена XX.07.2019 [Expert review on the article received on July XX, 2019].

УДК 536.24:66.045. Научная специальность: 05.14.04.

### Экспериментальное исследование влияние внешнего загрязнения на тепловую мощность трубчатого ребристого конвектора

Альберт Б. Сухоцкий, к.т.н., доцент; Евгений 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 обертыванием трубы алюминиевой фольгой.

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

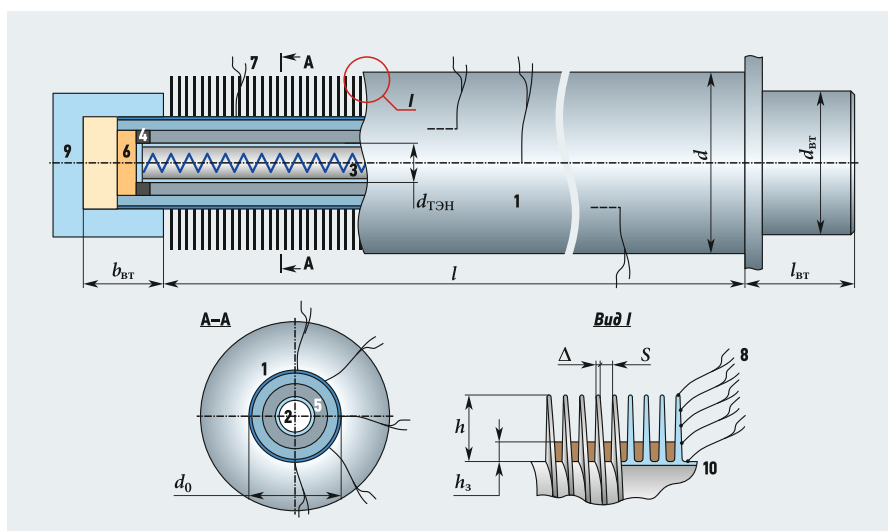
UDC 536.24:66.045. The number of scientific speciality: 05.14.04.

### Experimental research agency of fouling on heat rating of the tubular ridge convector

Albert B. Sukhotski, PhD, Assistant Professor; Eugene 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, pollution, heat rating at air free 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 термопары у основания рёбер; 8 — медь-константановые термопары по высоте ребра; 9 — фторопластовая втулка; 10 — льняная верёвка]

Подходы к учёту внешнего загрязнения представлены только для вынужденной конвекции и принципиально противоположные. 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 круло-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 трубы — уг-



леродистая 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 размером  $0,8 \times 0,8 \times 1,0$  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, ука-

занной 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 центрального кольца 4 обеспечилось центральное расположение ТЭНа в трубе. А 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 термопар 7 вдоль образующей трубы, сдвинутых относительно друг друга на угловое расстояние  $45^\circ$ . Термопары 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, припаялись четыре медь-константановых термопары 8 (диаметр провода 0,2 мм) с шагом 3,65 мм от основания по высоте 3,65 мм и последней термопарой, размещённой на верхушке ребра (рис. 1, сечение I). Предварительно термопары 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 спая общей четырёхспайной медь-константановой дифференциальной термобатарей.

Показания медь-константановых термопар 7 и 8 фиксировались с помощью вольтметра (модель GDM-78341 класса точности 0,25), подключённого через переключатель. Холодный спай всех термопар 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  $l_3 = 0,05$  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. 2б). Таким образом, достигалось заполнение межрёберного пространства неподвижным воздухом и обеспечивалось максимальное снижение тепловой эффективности рёбристой трубы.

Подвод теплового потока к оребрённым поверхностям обеспечивался ТЭНом, который подключался к регулируемому масляному трансформатору (модель АОМН-40-220-75). Мощность, подводимая к оребрённой 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.

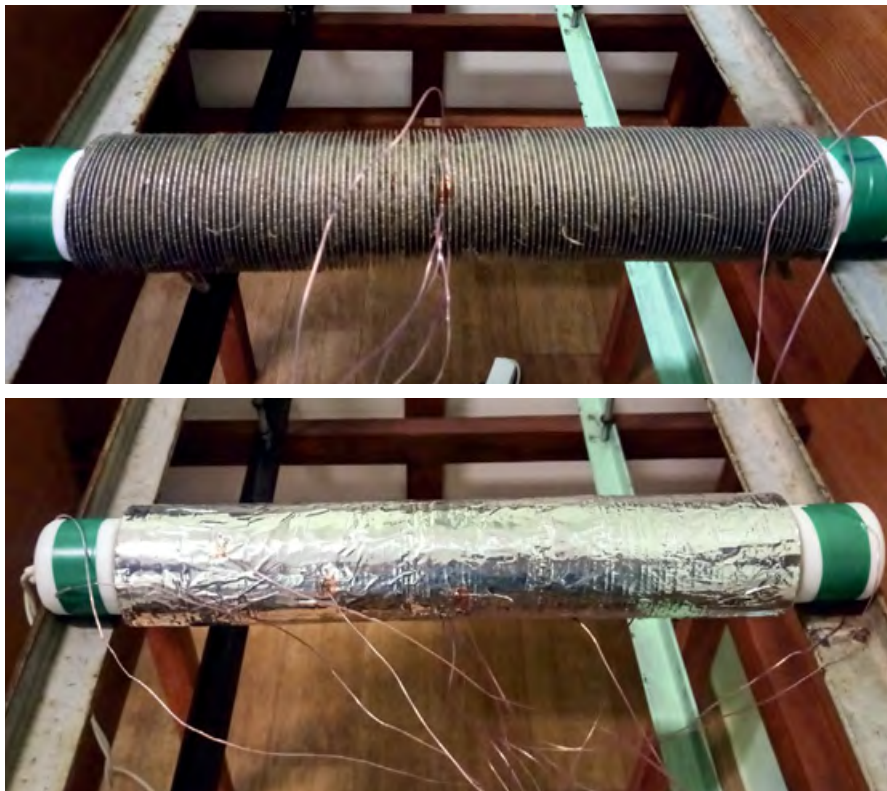
Теплота от оребрённой поверхности конвекцией и излучением передавалась атмосферному воздуху, который за счёт разности плотностей нагретого и холодного воздуха поднимался вверх в окружающую среду. Во время экспериментального исследования оребрённой трубы электрическая мощность, подводимая к трубе, поддерживалась 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  $t_{\text{очн}} = 80\text{--}94$ °C, а температура окружающего воздуха в камере  $t_0 = 18,4\text{--}20,1$ °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.

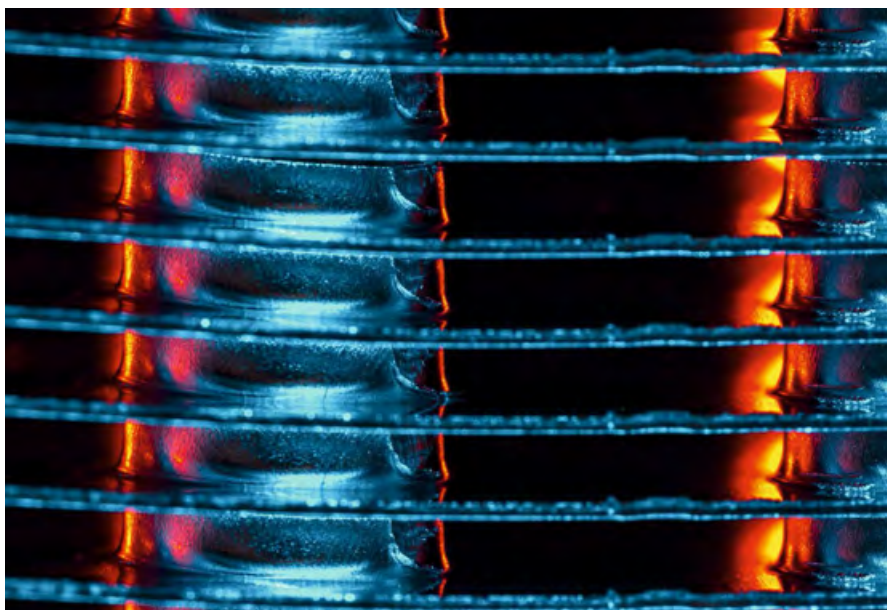


•• Рис. 2. Исследование кольцевого равномерного загрязнения оребрённой трубы путём намотки льняного шнура (а) и обматыванием фольги (б)

На рис. 3 показана зависимость относительной тепловой мощности трубы  $q/\Delta t_{\text{очн}}$  от термического сопротивления загрязнения  $R_3 = h_3/l_3$ , где  $\Delta t_{\text{очн}} = t_{\text{очн}} - t_0$  — среднее увеличение 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 загрязнения межрёберного пространства у основания оребрения не приводит к существенному снижению тепловой мощности, а ухудшение теплоотдающих свойств трубы происходит только



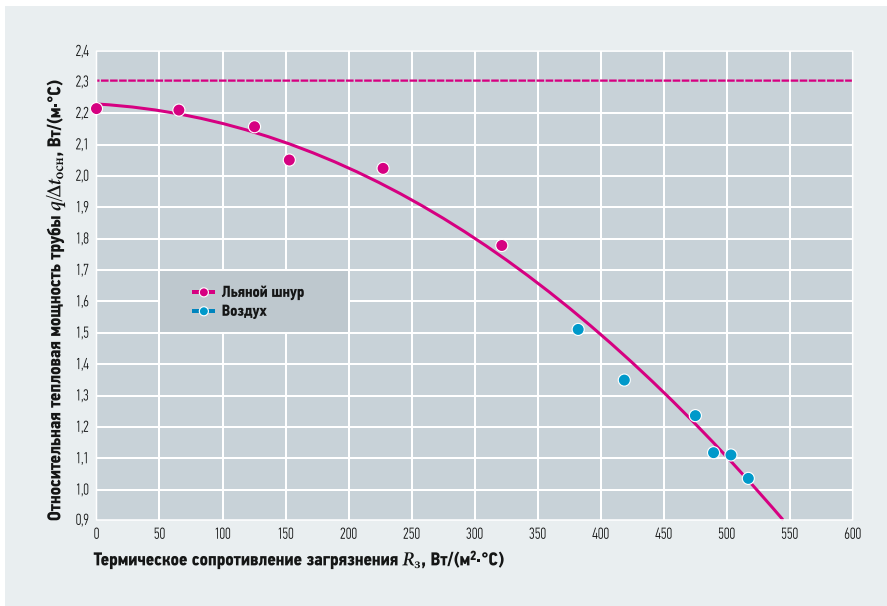


Рис. 3. Зависимость относительной тепловой мощности трубы  $q/\Delta t_{\text{очн}}$  от термического сопротивления загрязнения  $R_3 = h_3/l_3$

при загрязнении верхней части оребрения. 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 верхушек рёбер.

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

$t_p$  — температура на поверхности ребра определённая термопарами 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 термопарами, закрытыми загрязнением). Как видно, температура по высоте боковой поверхности ребра уменьшается незначительно (менее 2%), а на верхушке ребра по отношению к основанию — на 6–9%.

### Заключение

Проведено экспериментальное исследование интенсивности теплового потока и распределение температур на оребрённой чистой и загрязнённой поверхности круглой трубы при свободной конвекции воздуха. При загрязнении оребрён-

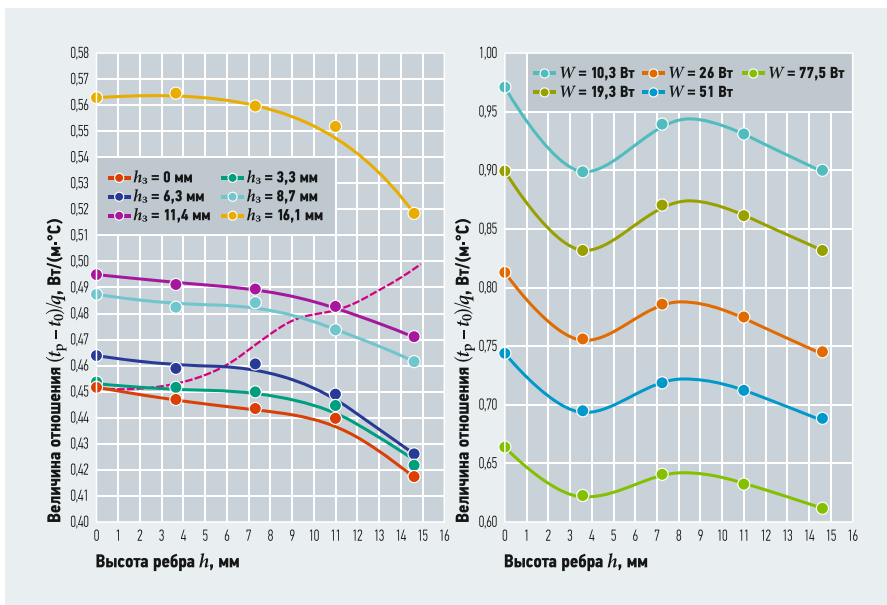


Рис. 4. Зависимости относительного перепада температуры  $(t_p - t_0)/q$  по высоте ребра  $h$  для чистой ( $h_3 = 0$ ), загрязнённой льяным шнуром (а) и неподвижным воздухом (б) оребрённой трубы с высотой загрязнения  $h_3$  и тепловой мощностью  $W$

ной поверхности только у основания рёбер 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. ●

- Сканави А.Н., Махов Л.М. Отопление. — М.: Изд-во АСВ, 2008. 576 с.
- Тиатор И. Отопительные системы / Пер. с нем. Т.Н. Зазаевой; под ред. Н.Д. Маловой. — М.: ЗАО «РИЦ «Техносфера», ЗАО «Евроклимат», 2006. 271 с.
- Кунтыш В.Б., Кузнецов Н.М. Тепловой и аэродинамический расчёты оребрённых теплообменников воздушного охлаждения. — СПб.: Энергоатомиздат, 1992. 280 с.
- 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.
- Bott T.R. Fouling of Heat Exchangers. Amsterdam. Elsevier Science. 1995. 546 p.
- Müller-Steinhagen H. Heat Exchanger Fouling. Mitigation and Cleaning Technologies. Essen. Publico Publications. 2000. 382 p.
- Кунтыш В.Б. и др. Анализ методик расчёта теплопередачи аппаратов воздушного охлаждения // Химическая техника, 2015. №4. С. 7–13.
- 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.
- Керн Д., Краус А. Развитие поверхности теплообмена. — М.: Энергия, 1977. 464 с.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Карлович Т.Б. Теплопередача круглых ребристых труб при неравномерном эксплуатационном загрязнении межрёберного пространства // Инженерно-физический журнал, 2018. Т. 91. №5. С. 1278–1286.
- 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.
- Сидорик Г.С. Экспериментальный стенд для исследования тепловых и аэродинамических процессов смешанно-конвективного теплообмена кругло-ребристых труб и пучков // Труды БГУ. Серия: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов, 2018. №1. С. 85–93.
- Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. Изд. 2-е, стер. — М.: Энергия, 1973. 344 с.