



# Experimental Research Agency of Fouling on Heat Rating of the Tubular Ridge Convector

By Sukhotski Albert

*Belarussian State Technological University*

**Abstract-** 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.

It is revealed that at a free convection in tubes with a close arrangement of ribs of pollution of intercostal space at the basis **оробрения** does not lead to essential decrease in a heat rating (less than 10 %), and the decline to give heat properties of a tube occurs only at pollution of cops ribbed (on 20,5 %). The temperature on altitude of a lateral surface of a rib decreases slightly (less than 2 %), and on a rib cop in relation to the basis - for 6-9 %. Hence, at maintenance of ridge convectors of systems of heating their frequent and careful clearing of pollution is not obligatory.

**Keywords:** *bimetallic ribbed tube, convector, pollution, heat rating at air free convection.*

**GJRE-G Classification:** *FOR Code: 291899p*



*Strictly as per the compliance and regulations of:*



# Experimental Research Agency of Fouling on Heat Rating of the Tubular Ridge Convector

Экспериментальное исследование влияние внешнего загрязнения на тепловую мощность трубчатого ребристого конвектора

Sukhotski Albert

**Abstract-** 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.

It is revealed that at a free convection in tubes with a close arrangement of ribs of pollution of intercostal space at the basis **орребрения** does not lead to essential decrease in a heat rating (less than 10 %), and the decline to give heat properties of a tube occurs only at pollution of cops ribbed (on 20,5 %). The temperature on altitude of a lateral surface of a rib decreases slightly (less than 2 %), and on a rib cop in relation to the basis - for 6-9 %. Hence, at maintenance of ridge convectors of systems of heating their frequent and careful clearing of pollution is not obligatory.

**Keywords:** *bimetallic ribbed tube, convector, pollution, heat rating at air free convection.*

**Абстрактный-** Проведено экспериментальное исследование интенсивности теплового потока и распределение температуры на **орребренной** 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 **орребренной** трубы создавалось путем плотной намотки между ребрами льняного шнура или обертыванием трубы алюминиевой фольгой.

Обнаружено, что при естественной конвекции в трубах с тесным расположением ребер загрязнения межреберного пространства у основания **орребрения** не приводит к существенному снижению тепловой мощности (менее 10%), а ухудшение теплоотдающих свойств трубы происходит только при загрязнении верхушек **орребрения** (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.

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

**Author:** Assistant professor Sukhotski A. B., Ph. D. student E. S. Danil'chik, Belarussian state technological university.  
e-mail: alk2905@mail.ru

## I. Введение

Во многих странах, в том числе и России, расширяется применение в системах отопления трубчато-ребристых нагревательных приборов – конвекторов, которые характеризуются малой инерционностью и металлоемкостью, 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 придает отопительному прибору особую компактность. К недостаткам конвекторов относится трудоемкость очистки от пыли. При эксплуатации конвектора происходит снижение его тепловой мощности в результате загрязнения внутренней и наружной теплообменной поверхности.

Методики теплогидравлического расчета **орребренных** 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. Подходы к учету внешнего загрязнения представлены только для вынужденной конвекции и принципиально противоположные. По мнению [4, 5] влияние загрязнения с воздушной стороны можно не учитывать, так как коэффициент теплоотдачи от **орребрения** 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 ребрами указывают на уменьшение от внешнего загрязнения **орребрения** коэффициента теплопередачи до 12% при вынужденной конвекции.

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

Цель работы – экспериментальное исследование интенсивности теплового потока и распределение температур на оребренной чистой и загрязненной поверхности круглоребристой трубы при свободной конвекции воздуха.

## II. Основная Часть

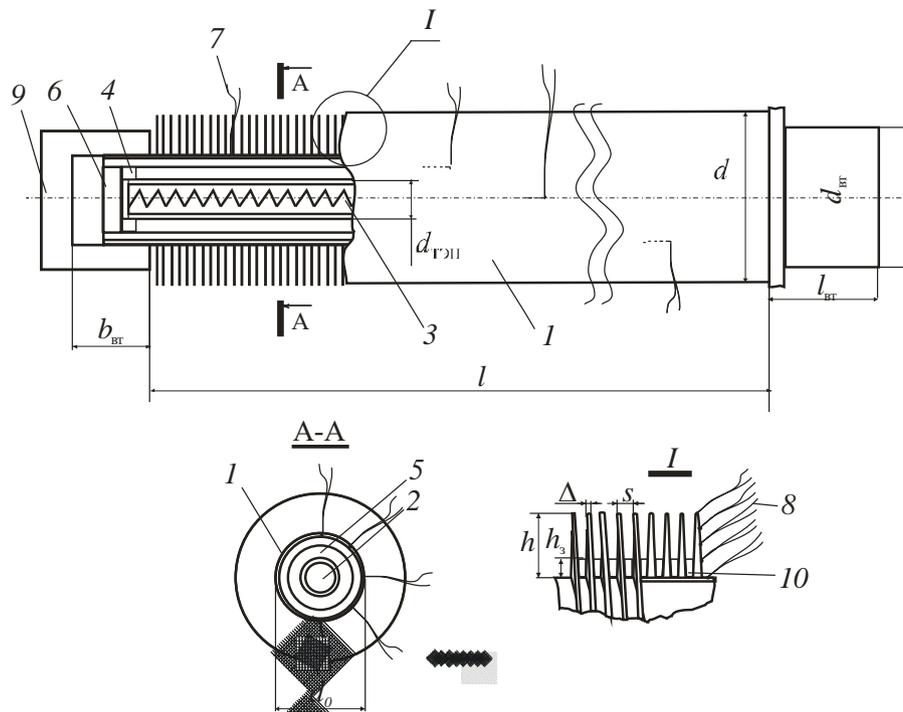
Объектом исследования являлась биметаллическая ребристая труба со спиральными накатными ребрами. Материал ребристой оболочки – алюминиевый сплав АД1М, материал несущей трубы – углеродистая сталь Ст10. Диаметр несущей трубы  $d_n = 25$  мм, толщина стенки  $\delta = 2$  мм. Геометрические параметры оребрения, мм: наружный диаметр ребра  $d = 56$  мм; высота ребра  $h = 14,6$  мм; диаметр по основанию ребра  $d_o = d - 2h = 26,8$  мм; шаг ребра  $s = 2,5$  мм; средняя толщина ребра  $\Delta = 0,5$  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  $0,8 \times 0,8 \times 1$  м размещалась исследуемая оребренная труба, которая являлась калориметром с установленными средствами измерения.

Конструкция опытной трубы-калориметра представлена на рис. 1. Внутри биметаллической ребристой трубы 1, указанной 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 обеспечивалась 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 ребер  $t_{осн}$  зачеканивалось свинцом пять медь-

константовых термопар 7 вдоль образующей трубы, сдвинутых относительно друг друга на угловое расстояние  $45^\circ$ . Термопары были заложены у основания ребер вдоль образующей трубы по винтовой линии на половине окружности трубы, считая, что вторая половина имеет симметричное поле температур. Также на поверхности ребра, размещенного в центре трубы, припаявались четыре медь-константовые термопары 8 (диаметр провода 0,2 мм) с шагом 3,65 мм от основания по высоте 3,65 мм и последней термопарой размещенной на верхушке ребра (рис. 1, сечение 1). Предварительно термопары были протарированы с точностью  $0,1^\circ\text{C}$ . Торцевые участки оребренной 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 4-спайной медь-константовой дифференциальной термобатареи.



**Рис. 1:** Общий вид calorиметрической 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 ребер; 8 – медь-константановые термопары по высоте ребра; 9 – фторопластовая втулка; 10 – льняной шнур

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

При исследовании кольцевое равномерное загрязнение оребренной трубы создавалось путем

плотной намотки между ребрами льняного шнура 10 диаметром 1,7–2,3 мм, средней теплопроводностью  $\lambda_3 = 0,05$  Вт / (м К). Таким образом, в межреберном пространстве создавался слой высотой  $h_3 = 3,3; 6,3; 8,7; 11,4; 16,1$  мм с неравномерностью  $\pm 0,4$  мм (рис 2, а).



а



б

**Рис. 2:** Исследование кольцевого равномерного загрязнения оребренной трубы путем намотки льняного шнура а и обматыванием фольги б

Также, для обеспечения максимального термического сопротивления межреберного пространства, чистая оребренная труба герметично обматывалась алюминиевой фольгой толщиной 0,3 мм (рис 2, б). Таким образом, достигалось заполнение межреберного 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 К 505 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 ее углах. Ртутные шарики термометров защищались от излучения пучка экранами из алюминиевой фольги.

Теплота от оребренной поверхности конвекцией и излучением передавалась атмосферному воздуху, который за счет 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  $W = 10,3 - 77,5$  Вт, температура стенки у основания ребер составляла  $t_{\text{осн}} = 80 - 94^\circ\text{C}$ , а температура окружающего воздуха в камере  $t_0 = 18,4 - 20,1^\circ\text{C}$ .

Удельный тепловой поток  $q$ , Вт/м, на 1 м погонной длины конвектора отведенный от трубы к воздуху конвекцией и излучением, рассчитывался из уравнения

$$q = (W - Q_n) / l,$$

где  $Q_n$  – 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, 4. На рис. 3 показана зависимость относительной тепловой мощности трубы  $q / \Delta t_{\text{осн}}$  от термического сопротивления загрязнения  $R_3 = h_3 / \lambda_3$ , где  $\Delta t_{\text{осн}} = t_{\text{осн}} - t_0$  – среднее увеличение температуры у основания оребрения над температурой окружающей среды. При размещении в межреберном пространстве неподвижного воздуха  $h_3 = h = 14,6$  мм, а коэффициент теплопроводности воздуха  $\lambda_3$  определялся в зависимости от средней температуре 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 ребер в межреберном пространстве у основания ребер воздух остается практически неподвижным и является естественным изолятором, а основной отвод теплового потока осуществляется с верхушек оребрения. Поэтому загрязнения межреберного пространства у основания оребрения не приводит к существенному снижению тепловой мощности, а

ухудшение теплоотдающих свойств трубы происходит только при загрязнении верхней части оребрения. При изоляции межреберного пространства неподвижным воздухом тепловая мощность снижается до 55%.

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

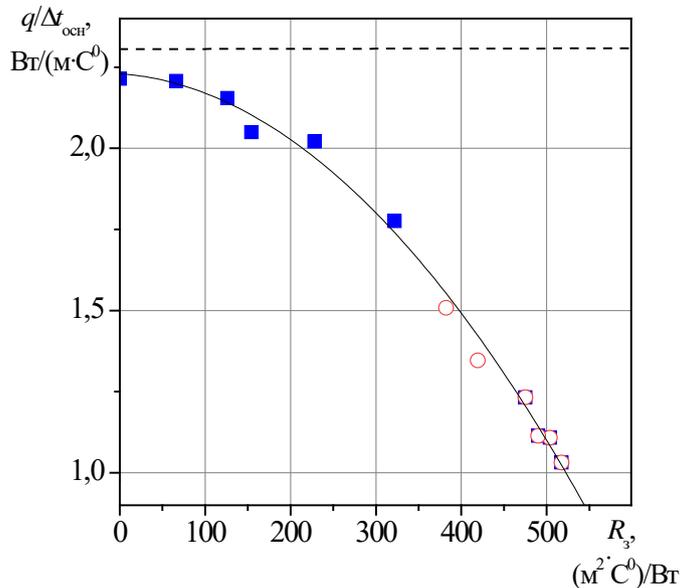


Рис. 3: Зависимость относительной тепловой мощности трубы  $q / \Delta t_{очн}$  от термического сопротивления загрязнения  $R_з = h_з / \lambda_з$ :  $\blacksquare$  – льняной шнур,  $\circ$  – воздух

На рис. 4 представлены зависимости относительного перепада температуры  $(t_p - t_0) / q$  по высоте ребра  $h$  для чистой и загрязненной оребренной трубы, где  $t_p$  температура на поверхности ребра определенная термопарами 8

(рис. 1, сечение I). Пунктирной линией на рисунке показана граница раздела чистой и загрязненных областей оребренной поверхности (выше пунктирной области температуры  $t_p$  определялись термопарами закрытыми загрязнением).

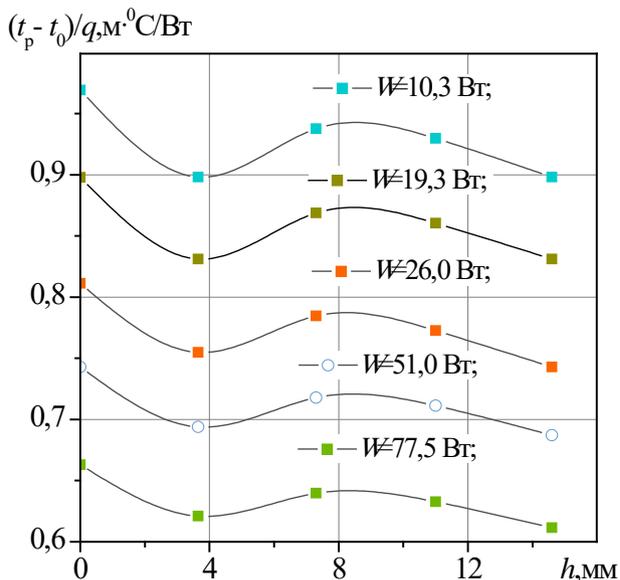
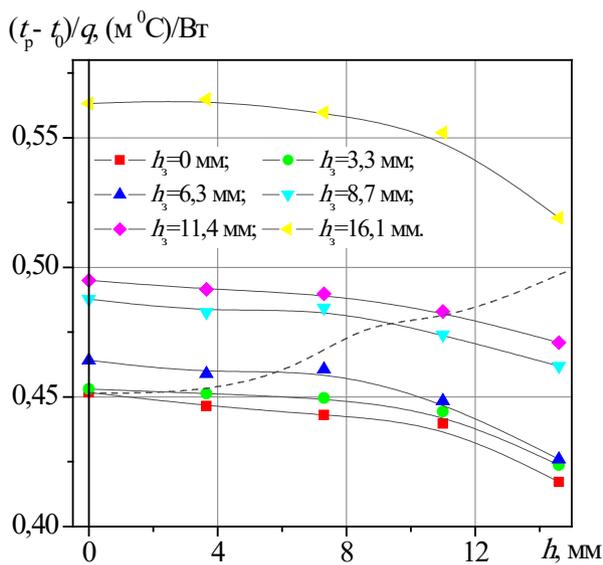


Рис. 4: Зависимости относительного перепада температуры  $(t_p - t_0) / q$  по высоте ребра  $h$  для чистой ( $h_з = 0$ ), загрязненной льняным шнуром а и неподвижным воздухом б оребренной трубы с высотой загрязнения  $h_з$  и тепловой мощностью  $W$ :  $\blacksquare$  –  $h_з = 0$  мм,  $\bullet$  –  $h_з = 3,3$  мм,  $\blacktriangle$  –  $h_з = 6,3$  мм,  $\blacktriangledown$  –  $h_з = 8,7$  мм,  $\blacklozenge$  –  $h_з = 11,4$  мм,  $\blacklozenge$  –  $h_з = 16,1$  мм;  $\blacksquare$  –  $W = 10,3$  Вт,  $\blacksquare$  –  $W = 19,3$  Вт,  $\blacksquare$  –  $W = 26,0$  Вт,  $\circ$  –  $W = 51,0$  Вт,  $\blacksquare$  –  $W = 77,5$  Вт

Как видно, температура по высоте боковой поверхности ребра уменьшается незначительно (менее 2%), а на верхушке ребра по отношению к основанию – на 6–9%.

### III. Заключение

Проведено экспериментальное исследование интенсивности теплового потока и распределение температур на оребренной чистой и загрязненной поверхности круглой трубы при свободной конвекции воздуха.

При загрязнении оребренной поверхности только у основания ребер тепловая мощность теплообменной трубы уменьшается менее чем на 10%. Предельное загрязнение межреберного 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 межреберных плотных загрязнений.

### Литература

1. Сканави А. Н., Махов Л. М. Отопление. М.: АСВ, 2008.
2. Тиатор И. Отопительные системы: перевод с немецкого. М.: Техносфера евроклимат, 2006.
3. Кунтыш, В. Б. Тепловой и аэродинамический расчеты оребренных теплообменников воздушного охлаждения / В. Б. Кунтыш, Н. М. Кузнецов. СПб.: Энергоатомиздат, 1992.
4. Машины и аппараты химических производств: примеры и задачи / И. В. Доманский [и др.]. Л.: Машиностроение, 1982.
5. Bott, T. R. Fouling of Heat Exchangers / T. R. Bott. Amsterdam: Elsevier, 1995.
6. Müller-Steinhagen, H. Heat Exchanger Fouling. Mitigation and Cleaning Technologies / H. Müller-Steinhagen. Essen: PUBLICO Publications, 2000.
7. Анализ методик расчета теплопередачи аппаратов воздушного охлаждения / В. Б. Кунтыш [и др.] // Химическая техника. 2015. No 4. С. 7-13.
8. Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения: Справочник / Под общ. ред. В.Б.Кунтыша, А.Н.Бессонного. СПб.: Недра, 1996.
9. Керн, Д. Развитие поверхности теплообмена / Д. Керн, А. Краус. М.: Энергия, 1977.
10. Камалетдинов И. М. Энергосбережение при эксплуатации аппаратов воздушного охлаждения на магистральных газопроводах. Автореферат канд. диссертации. Уфа, 2002.
11. Беркутов Р. А. Повышение энергоэффективности систем охлаждения газа на компрессорных станциях. Автореферат канд. диссертации. Уфа, 2010.
12. Володин В.И., Кунтыш В.Б., Петреева Н.Г., Бессонный А.Н., Бессонный Е.А. Влияние внешнего загрязнения на эффективность теплообменных аппаратов воздушного охлаждения / Володин В. И. [и др.] // XIV Минский международный форум по тепло- и массообмену: тез. докл. и сообщ., Минск, 10–13 сентября 2012. Минск: ИТМО имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, 2012. Т. 3. С. 315–317.
13. Дифференцированный учет термического сопротивления внешнего загрязнения оребрения труб шахматных пучков в тепловом расчете воздухоохлаждаемых теплообменников / А. Б. Сухоцкий [и др.] // XV Минский междунар. форум по тепло- и массообмену: тез. докл. и сообщ., Минск, 23–26 мая 2016 г. Минск: ИТМО имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, 2016. Т. 3. С. 424–426.
14. Карлович Т.Б. Теплопередача круглых ребристых труб при неравномерном эксплуатационном загрязнении межреберного пространства // Инженерно-физический журнал. 2018. Т. 91. № 5. С. 1278-1286.
15. Дударев В.В., Филатов С.О., Карлович Т.Б. Методика расчета и анализ коэффициента теплопередачи биметаллических ребристых труб аппаратов воздушного охлаждения с неравномерным внешним загрязнением // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2017. Т. 60. № 3. С. 237-255.
16. Сидорик Г. С. Экспериментальный стенд для исследования тепловых и аэродинамических процессов смешанно-конвективного теплообмена круглоребристых труб и пучков / Г. С. Сидорик // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. Минск: БГТУ, 2018. № 1. С. 85–93.
17. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1973.