
**ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

УДК 621.039

**МЕТОДИКА ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ
ПРОДОЛЬНО-ОРЕБРЕННЫХ ТРУБ СЕПАРАТОРОВ –
ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЕЙ ДЛЯ АЭС С ВОДО-ВОДЯНЫМИ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ РЕАКТОРАМИ**

© 2019 М. Ю. Хижов

АО Опытное конструкторское бюро «ГИДРОПРЕСС», Подольск, Россия

Предложена методика и конструкция стенда, позволившие провести теплогидравлические испытания продольно-оребранных труб сепараторов-пароперегревателей для АЭС с водоводяными энергетическими реакторами повышенной эффективности. По результатам проведенных испытаний продольно-оребранных труб с количеством П-образных ребер, равных шести и восьми, проведен сравнительный анализ. Показано, что для таких конструкций увеличение поверхности теплообмена превышает снижение коэффициента теплоотдачи

Ключевые слова: теплообменные трубы, сепаратор-пароперегреватель, теплогидравлические испытания, коэффициент теплоотдачи, поверхность теплообмена.

Поступила в редакцию 23.04.2019

После доработки 27.05.2019

Принята к публикации 31.05.2019

За короткий исторический промежуток времени ядерная энергетика стала частью мирового энергетического баланса. При этом с каждым годом доля атомных электростанций в мировом производстве электроэнергии возрастает. В ближайшие 8-10 лет будут введены в эксплуатацию новые АЭС: «Ханхикиви» (Финляндия), «Аккую» (Турция), «Эль-Дабаа» (Египет), «Руппур» (Бангладеш) и др. Новые перспективные проекты АЭС ориентированы на увеличение мощности, как единичных агрегатов, так и мощности энергоблоков в целом, что возможно как за счет проектирования и строительства новых, так и модернизации отдельных агрегатов в цепочке АЭС, при этом важная роль отводится увеличению их надежности и ресурса. Одним из узких звеньев в цепочке АЭС с ВВЭР-1200 (проект АЭС-2006) является сепаратор-пароперегреватель (СПП), предусматривающий применение теплообменных труб, включая матричную трубу с приваренными на нее продольными П-образными ребрами в количестве шести штук.

В работе [1] изложен метод оценки качества приварки П-образных ребер к матричной трубе, который может быть использован в производстве аппаратов СПП для ВВЭР-1200. Это технологический аспект обеспечения качества, а значит и прочностной надежности данных агрегатов. Изложим проблему касаясь конструктивного исполнения сепаратора-пароперегревателя, позволяющего повысить коэффициент теплоотдачи и, соответственно, эффективность аппарата. Известно, что для увеличения надежности и ресурса турбины необходимо повысить температуру пара, выдаваемого СПП. Самым простым решением было бы увеличить длину кассет, что несет за собой

ряд проблем, главная из которых – увеличение габаритов аппарата, что, соответственно, усложнит их транспортировку и монтаж. Кроме этого, увеличение длины пролета теплообменных труб приводит к значительным динамическим явлениям, поскольку теплообменные процессы в аппаратах сопровождаются колебаниями нагрузки и температуры, выпадением осадка. На трубы в поперечном и осевом направлениях действуют переменные силы. Сочетание колебаний силовых факторов, наличие или образование между контактирующими поверхностями щелей, в которые проникает осадок, либо приводит к щелевой коррозии с последующей разгерметизацией теплообменных контуров, либо к быстрой потере плотности и прочности узла крепления труб [2, 3]. Поэтому техническое решение об увеличении теплообменной поверхности путем увеличения количества ребер является наиболее технологичным и экономичным.

В данной работе проведена методика сравнительных теплогидравлических испытаний продольно-оребрённых труб СПП с количеством П-образных ребер, равных шести и восьми.

В таблице 1 и на рисунке 1 представлены геометрические параметры моделей труб с шестью и восемью ребрами, на рисунке 1 показаны их поперечные сечения. Основными отличиями конструкции трубы с восемью ребрами является их больший диаметр по оребрённой части – 33,54 мм, большая высота ребра – 8,8 мм, меньший угол раскрытия двойного ребра $22^{\circ}30'$ и меньший шаг приварки двойных (П-образных) ребер на несущую (матричную) трубу – 1,72 мм.

Таблица 1 – Геометрические параметры моделей труб с шестью и восемью двойными П-образными рёбрами [Geometric parameters of pipe models with six and eight double U-shaped edges]

№ п/п	Характеристики труб	Буквенные обозначения характеристик	Величина	
			Труба из шести рёбер	Труба из восьми рёбер
1	Длина трубы модели, мм	l	4710	4710
2	Длина оребрённой части, мм	l_p	3900	3900
3	Количество одиночных рёбер	n	12	16
4	Высота ребра, мм	$h_{реб}$	8,5	8,8
5	Толщина ребра, мм	δ	0,8	0,8
6	Развёрнутая длина корыта, образованного двумя рёбрами, мм	$l_{кор}$	20	20
7	Диаметр по вершинам рёбер, мм	d_p	33	34
8	Отношение поверхности рёбер H_p к полной поверхности $H_{п}$	$H_p/H_{п}$	0,793	0,84
9	Отношение поверхности, не занятой рёбрами, к полной поверхности	$H_{тр}/H_{п}$	0,207	0,16
10	Коэффициент оребрения, $H_{п}/H_{тр}$	φ	4,84	6,259
11	Живое сечение для прохода воздуха, m^2	$f_{воз}$	$1,155 \times 10^{-3}$	$1,123 \times 10^{-3}$

Продолжение таблицы 1

№ п/п	Характеристики труб	Буквенные обозначения характеристик	Величина	
			Труба из шести рёбер	Труба из восьми рёбер
12	Живое сечение для прохода воды, м ²	$f_{\text{вод}}$	$1,131 \times 10^{-4}$	$1,131 \times 10^{-4}$
13	Эквивалентный гидравлический диаметр модели, мм	$d_{\text{эм}}$	12,08	9,889
14	Полная поверхность оребрённой трубы, м ²	$F_{\text{ор.тр.}}$	1,07	1,482

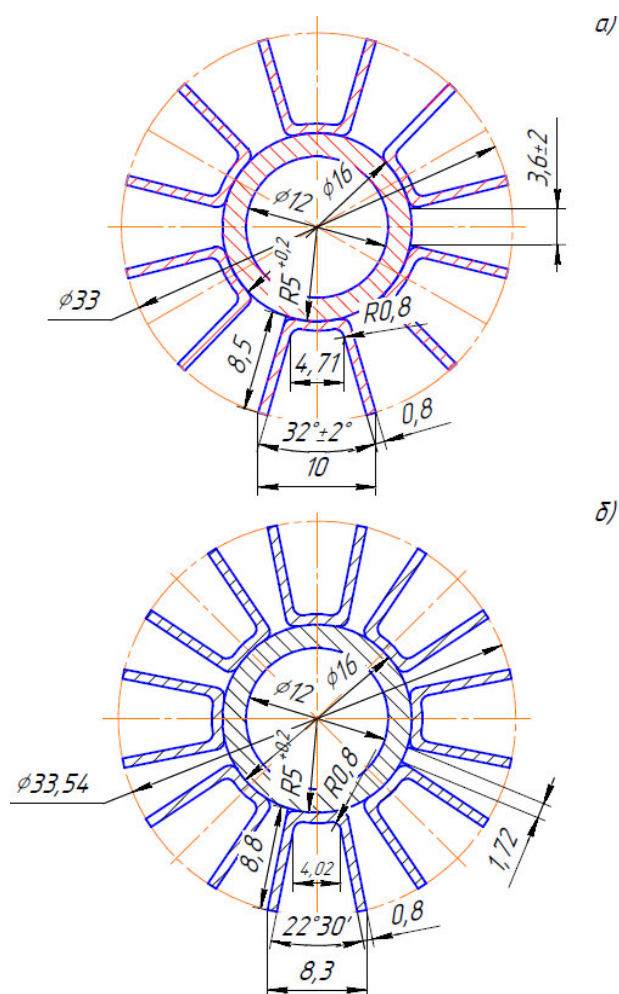


Рисунок 1 – Поперечное сечение теплообменных труб: а) с шестью двойными П-образными ребрами; б) с восьмью двойными П-образными ребрами [Cross section of heat exchange tubes: a) with six double U-shaped ribs; b) with eight double U-shaped ribs]

Из приведенных данных следует, что увеличение площади поверхности ребер пропорционально произведению отношения высот ребер и числа ребер и соответствует 1,38.

Теплоотдача продольно обтекаемых пучков из труб с продольными ребрами при $Re=2 \times 10^3 \div 2 \times 10^5$ и равномерном заполнении сечения теплообменными трубами описывается формулой [4]:

$$Nu = 0,332 Re^{0,75} Pr^{0,33} \left(0,2 + \frac{1}{1 + 0,167 (h_p / b_2)^3} \right), \quad (1)$$

где Nu – величина критерия Нуссельта нагреваемого пара; Re – величина критерия Рейнольдса нагреваемого пара; Pr – величина критерия Прандтля нагреваемого пара;

h_p – высота ребра, м; b_2 – ширина зазора между вершинами ребер, м.

Ширину зазора между вершинами ребер определим по формуле (2):

$$b_2 = \frac{\pi D_p}{n_p} - \delta_2, \quad (2)$$

где D_p – диаметр оребренной части, м; n_p – количество единичных ребер; δ_2 – толщина ребер у вершины, м.

Расчеты по формулам (1) и (2) показали, что для трубы с 6 двойными (12 единичными) ребрами зависимость (1) имеет вид формулы (3):

$$Nu_6 = 0,034 Re^{0,75} Pr^{0,33}. \quad (3)$$

Для трубы с 8 двойными (16 единичными) ребрами имеем, формулы (4):

$$Nu_8 = 0,0239 Re^{0,75} Pr^{0,33}. \quad (4)$$

Эквивалентный гидравлический диаметр трубного пучка пароперегревателя СПП-1000-1 с 12 единичными ребрами равен $d_{r6} = 13,31$ мм, с 16 единичными ребрами $d_{r8} = 10,05$ мм [5]. В этом случае имеем следующее соотношение коэффициентов теплоотдачи, формула (5):

$$\frac{\alpha_6}{\alpha_8} = \frac{Nu_6}{Nu_8} \frac{d_{r8}}{d_6} = 1,074. \quad (5)$$

Следовательно, увеличение поверхности теплообмена в 1,38 раза превышает снижение коэффициента теплоотдачи α_8 в 1,074 раз при равных числах Re и Pr .

Идеология сравнительных испытаний труб с 6 и 8 двойными ребрами изложена в отчете о НИОКР [5]. Сравнение результатов экспериментов должно проходить при одинаковых расходах воздуха, моделирующего нагреваемый пар, поскольку у труб разные эквивалентные гидравлические диаметры. Эксперименты предполагалось проводить на единичных оребренных трубах натурных размеров, расположенных внутри цилиндрической трубы. При тепловых испытаниях в трубу греющего пара подавалась горячая вода, в канал нагреваемого пара – воздух. Внутренний диаметр цилиндрической технологической трубы подбирался из максимального приближения эквивалентного гидравлического диаметра модели к эквивалентному гидравлическому диаметру натурального аппарата.

В таблице 2 приведены технические характеристики использованных приборов. По расчетам, приведенным в таблице 2 [5], для трубы $\varnothing 57 \times 7$ мм отличия вышеупомянутых диаметров для трубы с 6 двойными ребрами на 9,2% меньше натурального, для трубы с 8 двойными ребрами – на 1,6% так же меньше натурального. По

расчетам, приведённым в таблице 3 [5], число Рейнольдса трубного пучка натурного пароперегревателя СПП на номинальном режиме $Re = 28000$.

Таблица 2 – Измерительные приборы стенда теплогидравлических испытаний продольного оребрения трубы [Measuring instruments for the stand of thermohydraulic testing of pipe longitudinal finning]

№ п.п.	Обозначение на схеме	Наименование измерения	Название прибора	Марка прибора	Диапазон измерений	Предел относительной / абсолютной погрешности и измерений
1	$P_{бар}$	Атмосферное давление	Преобразователь абсолютного давления	АИР-30ДА, модель ТА8	$10 \div 110$ кПа	0,2%
2	$P_{стш}$	Давление сжатого воздуха перед измерительной диафрагмой	Манометр	ОБМВ-140	$0 \div 4$ атм	1,5%
3	$\Delta P_{ш}$	Перепад давления сжатого воздуха на измерительной диафрагме	Преобразователь дифференциального давления	АИР-30ДД, модель CD4	$0 \div 10$ кПа	0,2%
4	Поз.4	Расход сжатого воздуха	Измерительная диафрагма	$D_{отв} = 35$ мм	$C_{ид} = 0,03$ кг/(м ² ·с)	
5	$t_{ш},$ $t_{вх}^{возд},$ $t_{ср}^{возд},$ $t_{вых}^{возд}$	Температура сжатого воздуха на измерительной диафрагме, на входе, в середине и на выходе из трубы	Термопреобразователь сопротивления	ТСПУ 0104 Pt 100	$0 \div 100^{\circ}\text{C}$	$\pm 0,35^{\circ}\text{C}$
6	$t_{вх}^{вод},$ $t_{вых}^{вод}$	Температура воды на входе и выходе из трубы технологической	Термопреобразователь сопротивления	ТСПУ 0104 Pt 100	$0 \div 100^{\circ}\text{C}$	$\pm 0,35^{\circ}\text{C}$
7	$t_{бак}$	Температура воды в баке - барботёре	Термометр контактный	ТК5-06	$-99 \div 1300^{\circ}\text{C}$	$\pm 0,5^{\circ}\text{C}$
8	$P_{вх}^{возд}$	Давление сжатого воздуха на входе трубы технологической	Манометр	МП4-У	$0 \div 1$ ати	1,5%
9	$Q_{вод}$	Объёмный расход воды	Расходомер электромагнитный	МЕТРАН-370 Ду15	$0,06 \div 1,792$ л/с	0,5%

Однако существенным недостатком такой схемы испытаний является наличие шунтирующего потока воздуха между внутренней поверхностью цилиндрической технологической трубы и вершинами ребер. Для трубы $\varnothing 57 \times 7$ мм расчетная ширина шунта равна 5 мм для трубы с 6 двойными ребрами и 4,5 мм с 8 двойными ребрами. Для теплообменной трубы с 6 двойными ребрами площадь поперечного сечения шунта составляет 52,2% от площади сечения для прохода воздуха, а для трубы с 8 двойными ребрами – 51,5%.

Поскольку поток воздуха через шунт на оребренном участке идет практически без теплообмена с поверхностью испытуемой трубы [6, 7, 8], эксперименты носят только сравнительный характер.

Схема модели для испытания представлена на рисунке 2. Схема течения воздуха и воды – противоток.

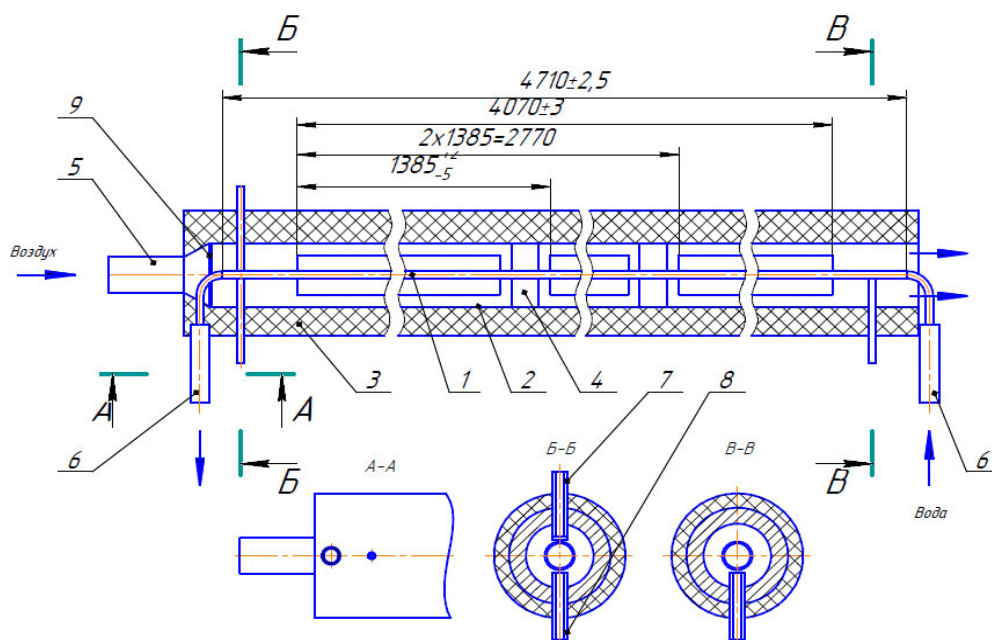


Рисунок 2 – Модель для теплогидравлических испытаний теплообменных труб: 1 – труба испытуемая; 2 – труба наружная технологическая; 3 – теплоизоляция; 4 – технологические проставки; 5 – штуцер воздуха; 6 – штуцер воды; 7 – штуцер датчика давления; 9 – входная шайба воздуха [Model for heat-hydraulic testing of heat exchange tubes: 1 – test tube; 2 – external technological pipe; 3 – heat insulation; 4 – technological spacers; 5 – air fitting; 6 – water fitting; 7 – pressure sensor fitting; 9 – air inlet washer]

На рисунке 3 приведена схема стенда и схема измерений теплофизических испытаний оребренных труб. Сжатый воздух из заводской магистрали, очищенный и осушенный в сепараторе 3, через измерительную диафрагму 4 подается в испытуемую трубу 1, размещённую в цилиндрической технологической трубе 2, и проходит по оребренной ее части и выхлопывается в атмосферу. Вода, нагретая в баке – барботере 5 паром от заводской магистрали, насосом К100-65-200 6 подается в трубу греющего пара и сливается из нее в бак 5. Труба 2 теплоизолирована.

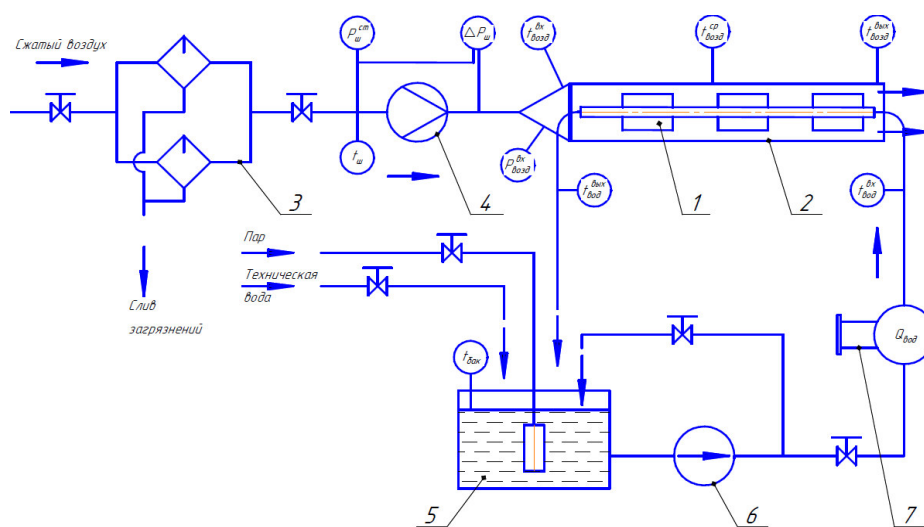


Рисунок 3 – Схема стенда и схема измерений теплогидравлических испытаний теплообменных труб: 1 – труба; 2 – труба технологическая наружная; 3 – сепаратор сжатого воздуха; 4 – измерительная диафрагма; 5 – бак-барботер; 6 – насосный агрегат К100-65-200; 7 – электромагнитный расходомер «Метран-370» Ду15 [Stand scheme and measurement scheme of heat-hydraulic tests of heat exchange pipes: 1 – pipe; 2 – external technological pipe; 3 – compressed air separator; 4 – measuring diaphragm; 5 – tank barbort; 6 – pump unit K100-65-200; 7 – «Metran-370» DN15 electromagnetic flow meter]

В процессе эксперимента измеряются с записью на персональный компьютер стенда:

- атмосферное давление $P_{\text{бар}}$;
- воздуха перед измерительной диафрагмой $t_{\text{ш}}$;
- перепад давления на измерительной диафрагме $\Delta P_{\text{ш}}$;
- температура воздуха на входе в оребрение трубы $t_{\text{возд}}^{\text{BX}}$;
- температура воздуха в середине оребренной трубы $t_{\text{возд}}^{\text{CP}}$ (факультативно);
- температура воздуха на выходе из оребрения трубы $t_{\text{возд}}^{\text{ВЫХ}}$;
- температура воды на входе в трубу греющего пара $t_{\text{вод}}^{\text{BX}}$;
- температура воды на выходе из трубы греющего пара $t_{\text{вод}}^{\text{ВЫХ}}$;
- объемный расход горячей воды $Q_{\text{вод}}$.

С записью в ручном режиме измерялись:

- давление воздуха перед измерительной диафрагмой $P_{\text{ш}}^{\text{CT}}$;
- давление воздуха на входе в оребрение трубы $P_{\text{возд}}^{\text{BX}}$;
- температура воды в баке – барботере $t_{\text{бак}}$.

Эксперимент проводился следующим образом. Вода в баке – барботере нагревалась паром до $\approx 75\div 85^\circ\text{C}$ (больше нельзя по правилам эксплуатации насосного агрегата K100-65-200) и удерживалась на выбранном уровне. Затем запускался насосный агрегат, и подавался расход воды от 0,080 л/с до 0,13 л/с и удерживался на выбранном уровне. Столь небольшой расход греющего теплоносителя требовался для увеличения разности температур его на входе и выходе из испытуемой трубы для повышения точности расчета баланса тепла.

Далее подавался требуемый расход воздуха. Для этого на манометре, измеряющем давление перед измерительной диафрагмой $P_{\text{ш}}^{\text{CT}}$, выставлялось давление от 0,75 ати до 3,75 ати. Фактический расход воздуха в автоматическом режиме вычислял персональный компьютер стенда. Баланс тепла производился так же расчетом на компьютере стенда. По достижении небаланса $\leq 5\%$ производилась запись показаний приборов на компьютере стенда и бумажный протокол испытаний.

Предложенная методика позволила эффективно осуществить теплогидравлические испытания продольно-оребрённых труб сепараторов-пароперегревателей для АЭС с водоводяными энергетическими реакторами повышенной эффективности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Смирнов, А.М.* Оценка качества оребренных теплообменных труб сепаратора-пароперегревателя [Текст] / М.Ю. Хижов, В.И. Лексиков // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2018. – № 4. – С. 135-141.
2. *Кондратенко, Л.А.* К вопросу о влиянии динамики роликового вальцевания на качество изготовления теплообменных аппаратов в атомных энергетических установках [Текст] / Л.А. Кондратенко, В.М. Терехов, Л.И. Миронова // Тяжелое машиностроение. – 2016. – № 10. – С. 10-14.
3. *Смирнов, А.М.* Особенности технологии раздачи теплообменных труб достаточной толщины и оценка качества прессовых соединений [Текст] / А.М. Смирнов, В.М. Терехов, А.С. Аверин // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2019. – № 1. – С. 150-155.
4. Отчет НИОКР №ЭЦР-0613. Теплогидравлические испытания продольно-оребрённых труб пароперегревателя СПП-1000-1 [Текст]. – Подольск : ПАО «ЗиО-Подольск», 2017 – 51 с.
5. *Аверьянов, И.Д.* Экспериментальные исследования теплообмена и аэродинамики штатной кассеты из ребристых труб сепаратора-пароперегревателя СПП-220М [Текст] / А.И. Бакин, В.В. Богданов, В.К. Буров. – Отчет НИОКР №ФР 00698. – Подольск : «ЗиО-Подольск», 1977. – 74 с.
6. *Горобец, В.Г.* Сравнительный анализ теплоотдачи и гидравлического сопротивления пучков труб с оребрением разменного типа [Текст] / сб. трудов IV Российской национальной конф. по теплообмену. – Москва : Московский энергетический институт, 2006. – С. 182-186.

7. Сепараторы – пароперегреватели турбин АЭС. Расчет и проектирование. РТМ 108.020.107-84 [Текст]. – Ленинград : ЦКТИ, 1986. – 15 с.
8. Легкоступова, В.В. Расчетное обоснование модернизации сепараторов-пароперегревателей энергоблоков АЭС [Текст] : дисс. канд. техн. наук. – Санкт-Петербург : ОАО «НПО ЦКТИ», 2018. – 172 с.
9. Терехов, В.М. Технологические основы обеспечения качества глубоких отверстий и соединений теплообменных труб с трубными решетками и коллекторами аппаратов атомных энергоустановок: дис. докт. техн. наук [Текст] / В.М. Терехов. – Москва, 2006. – 476 с.
10. Кондратенко, Л.А. Расчетно-экспериментальные методы исследования технологических напряжений и деформаций в неразъемных трубных соединениях энергоустановок: автореф. докт. техн. наук [Текст] / Л.А. Кондратенко. – Москва, 2017. – 48 с.

REFERENCES

- [1] Smirnov A.M., Hizhov M.YU., Leksikov V.I. Ocenka kachestva orebrennyh teploobmennyyh trub separatora-paroperegrevatelya [Estimation of Quality of Heat Exchange Pipes with External Ribs for the Separator-Superheater]. Engineering & Automation Problems. 2018. №. 4. P. 135-141 (in Russian).
- [2] Kondratenko L.A., Terekhov V.M., Mironova L.I. K voprosu o vliyaniy dinamiki rolikovogo val'cevaniya na kachestvo izgotovleniya teploobmennyyh apparatov v atomnyh ehnergeticheskikh ustanovkakh [Effect of the Dynamics of the Rolling on the Quality of Manufacture of Heat Exchangers of Nuclear Power Units] Heavy engineering construction. 2016. № 3. P. 10-14 (in Russian).
- [3] Smirnov A.M., Terekhov V.M., Averin A.S. Osobennosti tekhnologii razdachi teploobmennyyh trub dostatochnoj tolshchiny i ocenka kachestva pressovyh soedinenij [Features of Radial Deformation Technology of Heat-Exchanging Pipes of Sufficient Thickness and Assessment of Quality of Press Connections]. Engineering & Automation Problems. 2019. №. 1. P. 150-155 (in Russian).
- [4] Otchyot NIOKR №EHCR-0613. Teplogidravlicheskie ispytaniya prodol'no-orebrennyh trub paroperegrevatelya SPP-1000-1 [Report NIOKR №EHCR-0613. Thermohydraulic Testing of Longitudinally Finned Tubes of the SPP-1000-1 Superheater]. Podol'sk. PAO «ZiO-Podol'sk». 2017. 51 p. (in Russian).
- [5] Aver'yanov I.D., Bakin A.I., Bogdanov V.V., Burov V.K. EHksperimental'nye issledovaniya teploobmena i aehrodinamiki shtatnoj kassety iz rebristyyh trub separatora-paroperegrevatelya SPP-220M. [Experimental Studies of Heat Transfer and Aerodynamics of a Standard Cassette Made of Finned Tubes of a SPP-220M Separator-Superheater] Otchyot NIOKR №FR 00698. Podol'sk. PAO «ZiO-Podol'sk». 2017. 74 p. (in Russian).
- [6] Gorobec V.G. Sravnitel'nyj analiz teplootdachi i gidravlicheskogo soprotivleniya puchkov trub s orebreniem razmennogo tipa [Comparative Analysis of Heat Transfer and Hydraulic Resistance of Bundles of Tubes with Barreled Fins]. Proceedings of the St. Moscow. Moscow Power Engineering Institute. 2006. P. 182-186 (in Russian).
- [7] Separatory – paroperegrevately turbin AEHS. Raschyot i proektirovanie. RTM 108.020.107-84 [Separators - Steam Superheaters of NPP Turbines. Calculation and Design. RTM 108.020.107-84]. Leningrad : CKTI. 1986. 15 p. (in Russian).
- [8] Legkostupova V.V. Raschyotnoe obosnovanie modernizacii separatorov-paroperegrevatelej ehnergoblokov AEHS : – diss. kand. tekhn. nauk. [Estimated Justification for the Modernization of Separators-Superheaters of NPP Power Units]. St. Petersburg. ОАО «НПО ЦКТИ». 2018. 172 p. (in Russian).
- [9] Terekhov V.M. Tekhnologicheskie osnovy obespecheniya kachestva glubokih otverstij i soedinenij teploobmennyyh trub s trubnymi reshetkami i kollektorami apparatov atomnyh ehnergoustanovok: dis. dokt. tekhn. nauk [Technological Basis for Quality Assurance of Deep Holes and Heat Exchanger Tube Connections with Tube Sheets and Collectors of Nuclear Power Plants. Thesis]. Moscow. 2006 (in Russian).
- [10] Kondratenko L.A. Raschetno-ehksperimental'nye metody issledovaniya tekhnologicheskikh napryazhenij i deformacij v neraz'emnyh trubnyh soedineniyah ehnergoustanovok: avtoref. dokt. tekhn. nauk [Computational and Experimental Methods for Studying Technological Stresses and Deformations in Permanent Pipe Joints of Power Plants: Thesis abstract]. Moscow. 2017 (in Russian).

Method of Heat-Hydraulic Tests of Long-Relined Pipes of Separator – Vapor Heaters for NPP with Water-Water Energy Reactors

M.YU. Khizhov

*ОА ОКБ «GIDROPRESS», Podol'sk, Russia
e-mail: grpress@grpress.podolsk.ru*

Abstract – The paper proposes methodology and design of the stand which allowed to conduct thermal tests of longitudinally-finned tubes of separators-superheaters for nuclear power plants with water-water power reactors of high efficiency. According to the results of tests of longitudinally ribbed pipes with the number of U-shaped ribs equal to six and eight, a comparative analysis is conducted. It is shown that the increase in heat transfer surface exceeds the decrease in heat transfer coefficient for such structures.

Keywords: heat exchange tubes, separator-superheater, thermal hydraulic tests, heat transfer coefficient, heat exchange surface.