

**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. Хижев

*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   | $\delta$                            | 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, $H_{п}/H_{тр}$                           | $\varphi$                           | 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 <sup>2</sup>      | f <sub>вод</sub>                    | 1,131 × 10 <sup>-4</sup> | 1,131 × 10 <sup>-4</sup> |
| 13    | Эквивалентный гидравлический диаметр модели, мм     | d <sub>эм</sub>                     | 12,08                    | 9,889                    |
| 14    | Полная поверхность оребрённой трубы, м <sup>2</sup> | F <sub>ор.тр.</sub>                 | 1,07                     | 1,482                    |

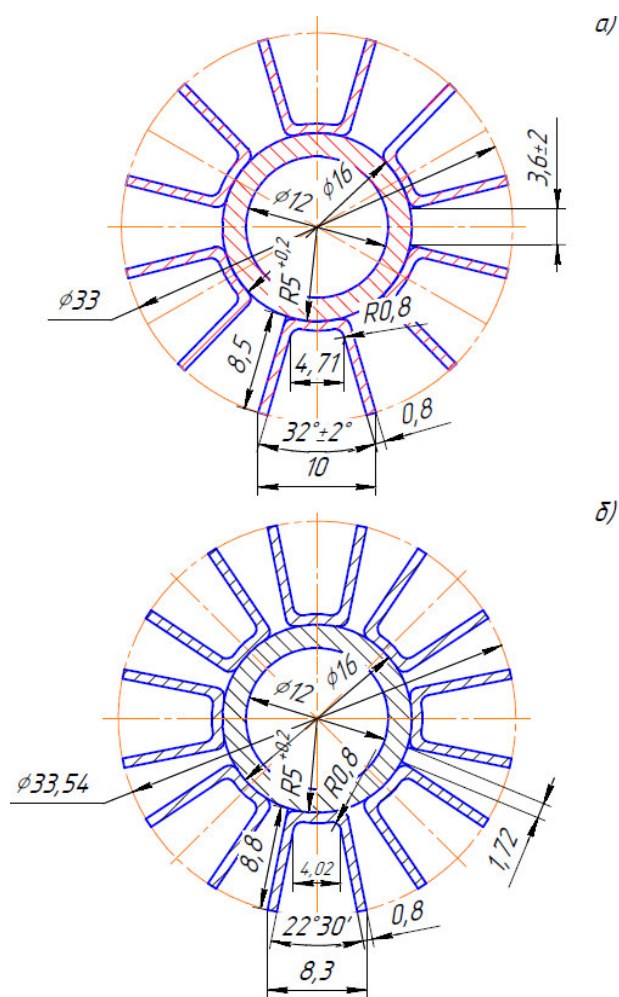


Рисунок 1 – Поперечное сечение теплообменных труб: а) с шестью двойными П-образными ребрами; б) с восьмью двойными П-образными ребрами [Cross section of heat exchange tubes: a) with six double U-shaped ribs; b) with eight double U-shaped ribs]

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;  $\delta_2$  – 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):

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

Следовательно, увеличение поверхности теплообмена в 1,38 раза превышает снижение коэффициента теплоотдачи  $\alpha_8$  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 натуральных 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 натурального 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      | $P_{ст.ш}$   | 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 <sup>2х</sup> с) |   |
| 5      | $t_{ш}$ ,<br>$t_{возд.}^{вх}$ ,<br>$t_{возд.}^{ср}$ ,<br>$t_{возд.}^{вых}$ | Температура сжатого воздуха на измерительной диафрагме, на входе, в середине и на выходе из трубы | Термопреобразователь сопротивления         | ТСПУ 0104 Pt 100     | $0 \div 100$ °C                        | $\pm 0,35$ °C   |
| 6      | $t_{вод.}^{вх}$ ,<br>$t_{вод.}^{вых}$                                      | Температура воды на входе и выходе из трубы технологической                                       | Термопреобразователь сопротивления         | ТСПУ 0104 Pt 100     | $0 \div 100$ °C                        | $\pm 0,35$ °C   |
| 7      | $t_{бак}$  | Температура воды в баке - барботёре   | Термометр контактный                       | ТК5-06               | $-99 \div 1300$ °C                     | $\pm 0,5$ °C  |
| 8      | $P_{возд.}^{вх}$   | 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.

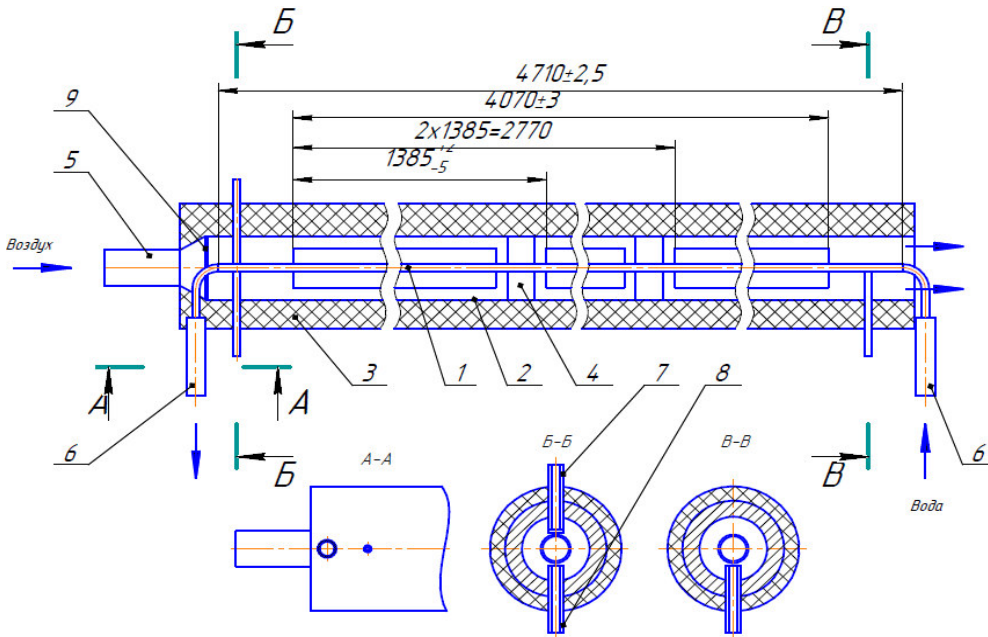


Рисунок 2 – Модель для теплогидравлических испытаний теплообменных труб: 1 – труба испытуемая; 2 – труба наружная технологическая; 3 – теплоизоляция; 4 – технологические проставки; 5 – штуцер воздуха; 6 – штуцер воды; 7 – штуцер датчика давления; 9 – входная шайба воздуха [Model for heat-hydraulic testing 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.

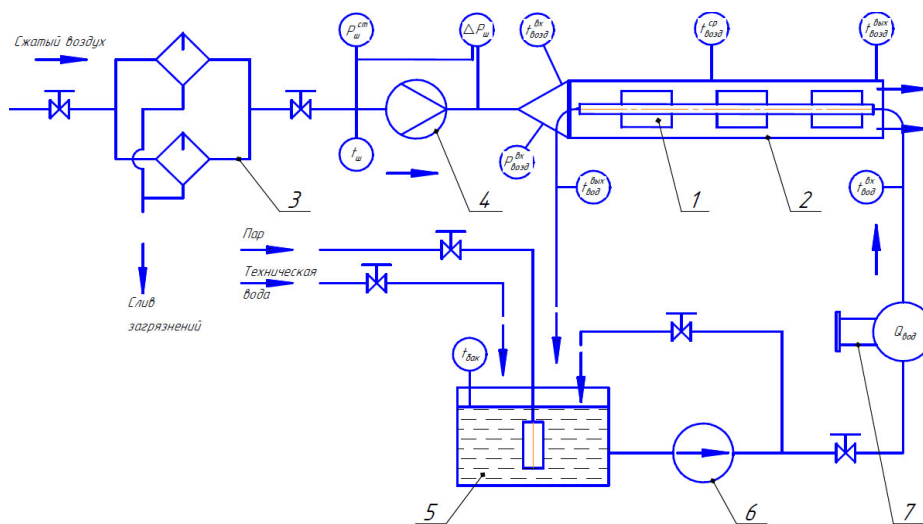


Рисунок 3 – Схема стенда и схема измерений теплогидравлических испытаний теплообменных труб: 1 – труба; 2 – труба технологическая наружная; 3 – сепаратор сжатого воздуха; 4 – измерительная диафрагма; 5 – бак-барбордер; 6 – насосный агрегат К100-65-200; 7 – электромагнитный расходомер «Метран-370» Ду15 [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 barborter; 6 – pump unit К100-65-200; 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  $t_{\text{возд}}^{\text{ВХ}}$ ;
- температура воздуха в середине оребренной трубы  $t_{\text{возд}}^{\text{СП}}$  (факультативно);
- температура воздуха на выходе из оребрения трубы  $t_{\text{возд}}^{\text{ВЫХ}}$ ;
- температура воды на входе в трубу греющего пара  $t_{\text{вод}}^{\text{ВХ}}$ ;
- 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  $P_{\text{ш}}^{\text{СТ}}$ ;
- давление воздуха на входе в оребрение трубы  $P_{\text{возд}}^{\text{ВХ}}$ ;
- 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 К100-65-200) 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  $P_{\text{ш}}^{\text{СТ}}$ , 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 rebristyh 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.