

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ВВОД
В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ОБОРУДОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**
DESIGN, MANUFACTURE AND COMMISSIONING
COMMISSIONING OF EQUIPMENT
NUCLEAR INDUSTRY FACILITIES

<https://doi.org/10.26583/gns-2025-04-04>

УДК 621.1:536.24

EDN DDYEFW

Оригинальная статья / Original paper



**Технические решения и технологические методы повышения
эффективности сепараторов-пароперегревателей в составе оборудования
АЭС с ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200**

В.М. Терехов¹, Л.И. Миронова²  , М.Ю. Хижов³

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация

²Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва,
Российская Федерация

³АО Опытное конструкторское бюро «ГИДРОПРЕСС», г. Подольск, Московская обл., Российская Федерация
 mironova_lub@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены конструкции теплообменных кассет сепараторов-пароперегревателей повышенной эффективности в составе оборудования АЭС с ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200. Одной из основных проблем в турбинах АЭС, работающих на насыщенном паре, является уменьшение влагосодержания в проточной части турбины и дефицит температуры греющего пара, что приводит к необходимости модернизации существующих конструкций сепараторов-пароперегревателей и увеличения их теплоотдачи. Некоторые предложенные технические решения и технологические методы повышения эффективности теплообменных аппаратов заключаются в увеличении поверхностей теплоотдачи с применением более разветвленной поверхности теплообменных труб. Такими конструкциями являются теплообменные кассеты пароперегревателей, состоящие из большого числа теплообменных труб с шестью и восемью П-образными продольными ребрами, проекты СПП-1000 и СПП-1200 соответственно. Отмечено, что кассеты с шестью П-образными продольными ребрами не обеспечивают дефицит температуры греющего пара в 6°C для более мощных установок энергоблоков АЭС с ВВЭР-1200. Вполне приемлемым техническим решением в выполнении такого требования является применение в кассетах теплообменных труб с восемью П-образными продольными ребрами. Приведены достоинства и недостатки рассматриваемой конструкции продольно оребренных труб. Основными недостатками труб с восемью П-образными ребрами являются повышенная металлоемкость теплообменных кассет и отсутствие условий массового производства труб такого класса. Рассмотрено техническое решение, заключающееся в применении теплообменных кассет пароперегревателя с низкопрофильными монометаллическими трубами и позволяющего сохранить модульный принцип построения всех блоков в существующих ранее конструкциях. Изложены подходы к выбору заготовок теплообменных труб с учетом выпускаемого сортамента мировых и отечественных фирм-производителей. Приведены некоторые результаты исследований структуры и физико-механических свойств теплообменных труб с целью оптимального выбора теплообменных труб для СПП повышенной эффективности, что целесообразность предлагаемых технических решений по модернизации СПП должна быть обоснована результатами тепло-гидравлических расчетов, а также сравнением технических характеристик конструкций до и после модернизации.

Ключевые слова: водо-водяной энергетический реактор, сепаратор-пароперегреватель, теплообменные трубы, коэффициент теплоотдачи, поверхность теплообмена.

Для цитирования: Терехов В.М., Миронова Л.И., Хижов М.Ю. Технические решения и технологические методы повышения эффективности сепараторов-пароперегревателей в составе оборудования АЭС с ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200. Глобальная ядерная безопасность. 2025;15(4):37–47. <https://doi.org/10.26583/gns-2025-04-04>

For citation: Terekhov V.M., Mironova L.I., Khizhov M.Yu. Engineering solutions and process methods to increase the efficiency of moisture separator-reheaters being an equipment part of NPPs with VVER-1000 and VVER-1200. Nuclear Safety. 2025;15(4):37–47. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2025-04-04>

Engineering solutions and process methods to increase the efficiency of moisture separator-reheaters being an equipment part of NPPs with VVER-1000 and VVER-1200

Viktor M. Terekhov¹, Lyubov I. Mironova²  , Mikhail Yu. Khizhov³

¹*Moscow Engineering Physics Institute «MEPhI», Moscow, Russian Federation*

²*Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation*

³*JSC ECB «GIDROPRESS», Podolsk, Moscow region, Russian Federation*

 mironova_lub@mail.ru

Abstract. The article considers the designs of heat-exchanging cartridges of moisture separator-reheaters (MSRs) of increased efficiency being a part of the equipment of NPPs with VVER-1000 and VVER-1200. One of the main problems of NPP saturated steam turbines is the reduced moisture content in the turbine flow part and the deficiency in the heating steam temperature resulting in the need to modify the existing designs of moisture separator-reheaters and increase their heat transfer. Some proposed engineering solutions and process methods for improving the efficiency of heat-exchangers lie in increasing the heat transfer surfaces using a more branched surface of heat-exchanging tubes. Such designs are heat-exchanging cartridges of reheaters, consisting of a large number of heat-exchanging tubes with six and eight longitudinal U-fins, MSR designs SPP-1000 and SPP-1200, respectively. It is noted that cartridges with six longitudinal U-fins do not provide the heating steam temperature deficiency of 6 °C for more powerful facilities of NPP Power Units with VVER-1200. An appropriate engineering solution for meeting this requirement is the application of heat-exchanging tubes with eight longitudinal U-fins in the cartridges. The article contains advantages and disadvantages of the considered design of longitudinally finned tubes. The main disadvantages of tubes with eight U-fins are the increased metal consumption per heat-exchanging cartridges and the lack of conditions for large-scale production of tubes of such class. We considered the engineering solution to apply the reheat heat-exchanging cartridges with low-profile monometallic tubes, allowing keeping the modular principle of construction of all units in previously existing designs. The article states approaches to the selection of heat-exchanging tube blanks subject to the range of products manufactured by global and domestic manufacturers. Some results of studies of the structure and physical and mechanical properties of the heat-exchanging tubes are shown for optimal selection of heat-exchanging tubes for MSR SPP-1200. It is noted that the feasibility of the proposed engineering solutions for modification of MSRs should be supported by the results of thermal and hydraulic calculations as well as a comparison of the technical characteristics of the designs before and after the modification.

Keywords: water-moderated water-cooled power reactor, moisture separator-reheater, heat exchange tubes, heat transfer coefficient, heat exchange surface.

Введение

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. Так, например, на мировых площадках функционируют 450 энергоблоков в 30 странах, суммарная установленная мощность которых составляет около 400 ГВт. Специалисты отмечают, что глобальные ядерные энергетические мощности будут расти в период до 2040-х гг. более быстрыми темпами по сравнению с нулевыми годами двадцать первого века. Прогнозируется увеличение мощности до 569 ГВт к 2040 году¹.

В ближайшее время будут введены в эксплуатацию новые АЭС: «Ханхикиви» (Финляндия), «Аккую» (Турция), «Эль-Дабаа» (Египет), «Руппур» (Бангладеш) и др., а также новые энергоблоки на действующих станциях: «Пакш» (Венгрия), «Бушер» (Иран), «Куданкулам» (Индия), «Тяньвань» (Китай), Белорусская АЭС и другие, действующие на территории Российской Федерации.

Новые перспективные проекты АЭС ориентированы на увеличение мощности, как единичных агрегатов, так и мощности энергоблоков в целом, что возможно осуществить не только за счет проектирования и строительства новых, но и модернизации отдельных агрегатов в цепочке АЭС. При этом, некоторые новые проекты реакторных установок предусматривают увеличение установленной мощности более 1200 МВт. Здесь весьма важным является повышение

¹World Nuclear Association – Режим доступа: <https://world-nuclear.org/our-association/publications/global-trends-reports/nuclear-fuel-report> (дата обращения: 07.07.2025).

эффективности работы оборудования за счет внедрения новых технических решений применительно, как к конструкции теплоэнергетических агрегатов, так и технологическим методам их изготовления.

Известно, что на Российских АЭС широко применяются двухконтурные энергоблоки с водо-водяными реакторами. В активной зоне реактора происходит нагрев теплоносителя (воды) до температуры насыщения и его частичное испарение. Далее происходит разделение насыщенной воды и пара, сепарация влаги из насыщенного пара. Затем пар поступает в турбоустановку, где осуществляет работу, генерируя ее в электроэнергию.

Одной из основных проблем в турбинах АЭС, работающих на насыщенном паре, является уменьшение влагосодержания в проточной части турбины и дефицит температуры греющего пара. Пар, поступающий в турбину, уже содержит около 0,3% влажности. При отсутствии влагоотделителей в турбоустановке, влажность в последних ступенях турбины может достигнуть 24%. Это в значительной степени отражается на снижении внутреннего КПД турбины, и приводит к недопустимому уровню эрозии лопаток турбины [1]. Кроме этого, возникает проблема дефицита температуры греющего пара.

Для предотвращения эрозии турбинных лопаток применяются различные методы, к числу которых относится отвод влаги при помощи различных сепарационных устройств, например, сепараторов-пароперегревателей (СПП).

Анализу конструкций сепараторов-пароперегревателей (СПП-220М, СПП 1000 и др.) посвящено немало работ [1–5], где отмечены их достоинства и недостатки. Большое внимание уделяется кассетам пароперегревателя, состоящих из большого числа теплообменных оребренных труб различного вида: продольного и поперечного оребрения [4]. Повышение эффективности теплоотдачи таких устройств в большинстве случаев связано с увеличением площади поверхности теплообменных труб, достигаемым различными технологическими методами (шайбованием, приваркой ребер, спи-

ральным оребрением труб токами высокой частоты, получением ребер на поверхности трубы методом пластического обжима и т.д.). При этом зачастую не рассматриваются проблемы технологического характера, связанные с изготовлением теплообменных аппаратов, решение которых имеет первостепенное значение в повышении конкурентоспособности отечественного энергетического оборудования и обеспечении импортозамещения товаров российского производства. Также следует отметить, что детальное сравнение существующих конструктивных исполнений теплообменных кассет с учетом мирового опыта лидеров-производителей в настоящий момент проведено в недостаточной степени. Целью статьи является проведение анализа технических решений и технологических методов повышения эффективности сепарационных устройств в составе оборудования АЭС с ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200.

Конструкторско-технологические решения в повышении эффективности СПП-1000 и СПП-1200

Модели сепараторов-пароперегревателей СПП-1000, СПП-1200 разрабатывались и изготавливались в настоящее время на АО «ЗиО-Подольск». С точки зрения конструктивного исполнения они характеризуются модульным построением, состоящим из набора унифицированных сепарационных блоков и пароперегревательных модулей (кассет).

Существующие сепарационные устройства для АЭС с ВВЭР-1000 предусматривают применение теплообменных труб, состоящих из матричной трубы с приваренными к ней продольными П-образными ребрами в количестве шести штук [6], что недостаточно для преодоления дефицита температуры греющего пара в 6°C и для работы в условиях АЭС с ВВЭР-1200. Для повышения температуры греющего пара самым простым решением было бы увеличение поверхности теплообмена аппарата путем увеличения длины кассет. Однако такой подход несет за собой ряд трудностей, главная из которых – увеличение габаритов аппарата, что, соответственно, приведет к его удоро-

жанию, проблемам транспортировки и монтажа.

Одним из технических решений в модернизации СПП-1000 было предложение ввода кассеты нового поколения с повышенным количеством продольных ребер до восьми штук. Такое решение нашло применение в проекте СПП-1200 в составе оборудования для АЭС с ВВЭР-1200.

Для успешной реализации данного проекта было разработано и изготовлено уникальное технологическое оборудование с воз-

можностью мониторинга качества приварки П-образных ребер к матричной трубе [7,8].

С целью проведения анализа эффективности теплообменных поверхностей в рассматриваемых оребренных трубах введем следующие обозначения. Трубу с шестью П-образными ребрами будем обозначать как модель 1, трубу с восемью П-образными ребрами – модель 2. На рисунке 1 показаны поперечные сечения рассматриваемых моделей, в таблице 1 приведены их исходные геометрические параметры.

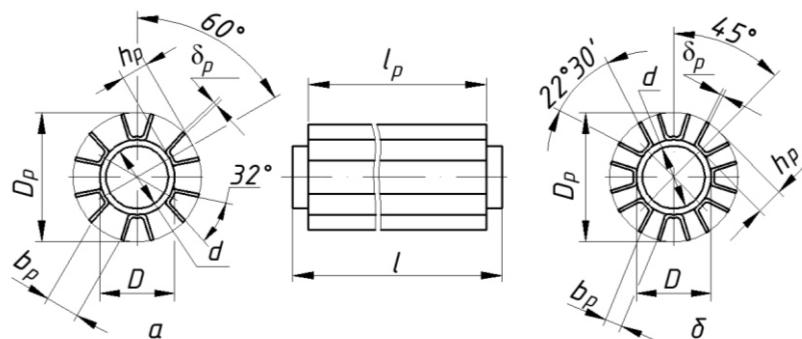


Рисунок 1. Конструктивные исполнения моделей: а – модель 1 с шестью П-образными ребрами, б – модель 2 с восемью П-образными ребрами [составлено авторами]

Figure 1. Design versions of models: a – model 1 with six U-shaped ribs, b – model 2 with eight double U-shaped edges [compiled by the authors]

Таблица 1. Исходные геометрические параметры моделей [составлено авторами]
Table 1. Initial geometric parameters of the models [compiled by the authors]

Исполнение	<i>n</i>	<i>d</i> , мм	<i>D</i> , мм	<i>D_p</i> , мм	<i>h_p</i> / <i>b_p</i>	<i>δ_p</i> / <i>h_p</i>	<i>l_p</i> / <i>l</i>	$\varphi = H_p / H_0$
Модель 1	6	12	16	33	3,211	0,0941	0,828	0,546
Модель 2	8	12	16	34	4,56	0,0912	0,828	0,757

Здесь приняты следующие обозначения: φ – коэффициент оребрения; H_p – поверхность ребер; H_0 – условная поверхность несущей трубы.

Основными отличиями конструкции трубы с восемью ребрами является их больший диаметр по оребренной части – 33,54 мм, большая высота ребра – 8,8 мм, меньший угол раскрытия двойного ребра 22°30' и меньший шаг приварки двойных (П-образных) ребер на несущую (матричную) трубу – 1,72 мм.

Сравнительные параметры теплообменных труб с шестью и восемью двойными П-образными ребрами с точки зрения оценки теплообменных поверхностей приведены в таблице 2.

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

При расчете конвективного теплообмена используются зависимости для определения чисел Нуссельта и коэффициентов теплоотдачи, формула (1) [9]

$$\alpha = \text{Nu} \frac{\lambda}{d_s}, \quad (1)$$

где Nu – число Нуссельта;

λ – коэффициент теплопроводности теплоносителя при средней температуре потока;

d_s – характерный размер, соответствующий данной конфигурации канала.

Таблица 2. Сравнительные параметры теплообменных труб с шестью и восемью двойными П-образными ребрами [составлено авторами]

Table 2. Comparative parameters of pipe models with six and eight double U-shaped edges [compiled by the authors]

№ п/п	Характеристики труб	Труба из шести ребер (модель 1)	Труба из восьми ребер (модель 2)
1	Длина трубы модели, мм	4710	4710
2	Длина оребренной части, мм	3900	3900
3	Количество одиночных ребер, шт	12	16
4	Высота ребра, мм	8,5	8,8
5	Толщина ребра, мм	0,8	0,8
6	Развёрнутая длина корыта, образованного двумя ребрами, мм	20	20
7	Диаметр по вершинам ребер, мм	33	33,54
8	Отношение поверхности ребер к полной поверхности трубы	0,793	0,84
9	Отношение поверхности трубы, не занятой ребрами, к полной поверхности трубы	0,207	0,16
10	Коэффициент оребрения	0,546	0,757
11	Живое сечение для прохода воздуха, м ²	$1,155 \times 10^{-3}$	$1,123 \times 10^{-3}$
12	Живое сечение для прохода воды, м ²	$1,131 \times 10^{-4}$	$1,131 \times 10^{-4}$
13	Эквивалентный гидравлический диаметр модели, мм	13,31	10,05
14	Полная поверхность оребренной трубы, м ²	1,07	1,482

Следует отметить, что специфичность процесса теплообмена ребристых поверхностей вызывает необходимость учитывать не только конвективную теплоотдачу, но и учитывать теплопроводность ребер².

Конвективная теплоотдача продольно обтекаемых пучков из труб с продольными ребрами при течении перегретого водяного пара для $Re=2 \times 10^3 \div 2 \times 10^5$ и равномерном заполнении сечения теплообменными трубами описывается формулой (2)³:

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

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 (3):

$$b_2 = \frac{\pi D_p}{n_p} - \delta_2, \quad (3)$$

где D_p – диаметр оребренной части, м;

n_p – количество единичных ребер;

δ_2 – толщина ребер у вершины, м.

Расчеты по формулам (2) и (3) показали, что для трубы с шестью двойными (двенадцатью единичными) ребрами зависимость (2) имеет вид выражения (4):

$$Nu_6 = 0,034 Re^{0,75} P_r^{0,33}. \quad (4)$$

Для трубы с восемью двойными (шестнадцатью единичными) ребрами имеем выражение (5):

$$Nu_8 = 0,0239 Re^{0,75} P_r^{0,33}. \quad (5)$$

Сравнивая величины критерия Нуссельта из выражений (4) и (5) для труб с различными числами продольных ребер, отметим, что увеличение числа ребер не приводит к более интенсивному конвективному теплообмену свободной от ребер внешней поверхности, поскольку определяющим параметром

² РТМ 24.031.05-72. Методика и зависимости для теоретического расчета теплообмена и гидравлического сопротивления теплообменного оборудования АЭС. – Ленинград: НПО ЦКТИ им. И.И. Ползунова; Москва: Министерство тяжелого, энергетического и транспортного машиностроения, 1974. – 124 с. – Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293764/4293764047.pdf?ysclid=mi4olmozg2386107533> (дата обращения: 07.07.2025).

³ Отчет НИОКР №ЭЦР-0613. Термогидравлические испытания продольно-ребристых труб пароперегревателя СПП-1000-1. – Подольск: ПАО «ЗиО-Подольск», 2017. – 51 с. – Режим доступа: по запросу.

в этих формулах является величина зазора между ребрами. Очевидно, что с увеличением числа ребер при всех других равных параметрах, величина зазора между ребрами уменьшается. Это следует из формулы (1) и наглядно подтверждается соотношением коэффициентов теплоотдачи рассматриваемых конструкций в выражении (6):

$$\frac{\alpha_6}{\alpha_8} = \frac{\text{Nu}_6}{\text{Nu}_8} \frac{d_{r6}}{d_{r8}} = 1,074, \quad (6)$$

где d_{r6} и d_{r8} – эквивалентный гидравлический диаметр трубного пучка пароперегревателя с двенадцатью и шестнадцатью единичными ребрами.

Эквивалентный гидравлический диаметр трубного пучка пароперегревателя СПП с двенадцатью единичными ребрами равен $d_{r6} = 13,31$ мм, с шестнадцатью единичными ребрами – $d_{r8} = 10,05$ мм (см. табл. 2). Поэтому в теплообменных трубах таких конструкций интенсивность теплоотдачи реализуется за счет эффективности дополнительных ребристых поверхностей, которые характеризуется вспомогательными параметрами, в частности, коэффициентом оребрения и соответствующим отношением поверхности ребер к полной поверхности трубы.

Оценка эффективности труб с продольным внешним оребрением при продольном обтекании перегретым паром проводится по приведенному коэффициенту эффективности⁴ α^{np} , формула (7):

$$\alpha^{np} = \left[\frac{H_p}{H_n} E + \frac{H_{mp}}{H_n} \right] \psi \alpha, \quad (7)$$

где H_p / H_n – отношение поверхности ребер к полной поверхности трубы;

H_{mp} / H_n – отношение поверхности трубы, не занятой ребрами, к полной поверхности трубы; E – коэффициент интенсивности ребра, зависящий от коэффициента теплопроводности ребра и от его толщины;

ψ – коэффициент оребрения.

⁴ РТМ 108.020.107-76. Тепловой и гидравлический расчет промежуточных сепараторов-пароперегревателей турбин насыщенного пара АЭС. – Ленинград: НПО ЦКТИ им. И.И. Ползунова, 1978. – Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293768/4293768751.pdf?ysclid=mi4pyuq8gy569546332> (дата обращения: 26.05.2025).

Принимая во внимание, что величины E , α для труб с шестью и восемью двойными П-образными ребрами одинаковы, а выражение в квадратной скобке формулы (7) отличается незначительно, то оценку эффективности рассматриваемых продольно оребренных труб проведем по соотношению коэффициентов оребрения. Тогда получаем выражение (8):

$$\frac{\alpha_8^{np}}{\alpha_6^{np}} = 1,38. \quad (8)$$

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

Таким образом, конструкция СПП-1200 является проектом повышенной эффективности по сравнению с проектом СПП-1000 в составе оборудования для АЭС с ВВЭР 1000. Для сравнения приведем основные конструктивные показатели рассматриваемых сепарационных устройств, таблица 3.

Очевидно, что проект СПП-1200, несмотря на повышенную эффективность при равных условиях размещения труб в кассетах пароперегревателей, имеет более высокую металлоемкость по сравнению с СПП-1000. Кроме этого, массовое производство теплообменных труб такого класса отсутствует в мировой и отечественной промышленности. Отсюда возникает потребность в поиске новых технических решений, направленных на повышение эффективности теплообменных кассет пароперегревателя и снижение габаритно-весовых характеристик с соблюдением модульного принципа размещения всех блоков конструкции.

Технические решения по созданию перспективных конструкций теплообменных кассет в СПП нового поколения

Одним из перспективных направлений увеличения поверхности теплоотдачи, как уже было ранее сказано, является создание прогрессивных кассетных блоков сепараторов-пароперегревателей с применением более разветвленной поверхности теплообменных труб.

Таблица 3. Конструктивное исполнение сепараторов-перегревателей в составе оборудования ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 [составлено авторами]

Table 3. Design of moisture separator-reheaters being a part of VVER-1000 and VVER-1200 equipment [compiled by the authors]

Проект	Число кассет на ступени, шт	Число оребренных труб в кассете, шт.	Тип продольного оребрения	Диаметр матричной трубы, мм	Длина оребренной части, мм	Число оребренных труб на один аппарат, шт.
ВВЭР-1000 СПП-1000	187	37	с шестью П-образными ребрами	16	3900	6919
ВВЭР-1200 СПП-1200	222	37	с восемью П-образными ребрами	16	3355	8214

При создании компактного сепаратора пароперегревателя повышенной эффективности, следует выделить новое техническое решение: разработка и изготовление кассетного блока с низкопрофильными монометаллическими трубами.

Предложения о применении труб с низким оребрением в отечественной практике производства теплообменных аппаратов не вляются новыми. Так, например, в статье [4] изложены технические решения и обсужден проект модернизации конструкций СПП-220М и СПП-1000, эксплуатируемых на действующих энергоблоках АЭС соответственно с реакторами ВВЭР-440 и ВВЭР-1000. В частности, было предложено использовать в пароперегревателе трубы с низким оребрением из эрозионных материалов, например, стали X3CrTi17, которая характеризуется высокой термоэластичностью и устойчивостью к тепловому растрескиванию. Однако, не следует забывать, что применение труб из новых материалов требует разработки не только технологических методов их получения в заготовительном переделе, но и технологии закрепления труб в трубных досках. Последняя является определяющей технологической операцией в обеспечении эксплуатационной надежности теплоэнергетических аппаратов.

В таком случае существенно увеличиваются сроки внедрения проектных предложений, связанные, прежде всего, с решением вопросов производственного характера (поставкой требуемого объема заготовок, размещением и переналадкой оборудования производственных площадок, техническим оснащением и т.д.).

С точки зрения заготовительного производства низкопрофильные монометаллические трубы могут быть получены методом экструзии или профилированием методом пластической деформации (накаткой роликами при условии вращения трубы или блоков роликов). Процесс оребрения труб накаткой выполняется путем продавливания металла трубы роликами с последующими технологическими переделами: безокислительной термической обработкой токами высокой частоты оребренной части и токовихревым контролем.

В качестве заготовок для профилирования труб используют бесшовные холоднокатаные или горячекатаные трубы и сварные трубы. При равной толщине стенок бесшовные трубы прочнее, поскольку шов является потенциально слабым местом. В таблице 4 приведены основные характеристики низкопрофильных труб.

Таблица 4. Основные характеристики низкопрофильных труб [составлено авторами]

Table 4. Main characteristics of low-profile tubes equipment [compiled by the authors]

Заготовка трубы	Материал	Размеры монотрубы, мм	Высота ребра, мм	Толщина стенки после оребрения, мм	Количество ребер	Коэффициент оребренности
Сварная труба (электросварные прямошовные трубы)	TP439	Ø19,05x1,65	1,3	0,8	27 ^{±2} ребер /1"	1,49
Бесшовная холоднокатаная труба	08Х14МФ	Ø19x1,5	1,5	0,8	27 ^{±2} ребер /1"	1,49

Модель низкопрофильной трубы Ø19x1,65 мм с поперечным однозаходным винтовым оребрением приведен на рисунке 2.



Рисунок 2. Низкопрофильная труба Ø19x1,65 мм.

Модель [составлено авторами]

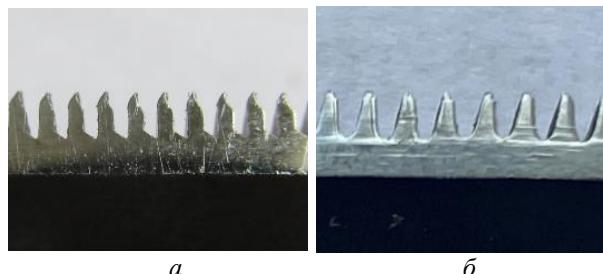
Figure 2. Ø19x1.65 mm low-profile tube. Model equipment [compiled by the authors]

Основной проблемой в изготовлении конструкции сепаратора-пароперегревателя повышенной эффективности является обеспечение производства сепарационных устройств большим количеством труб с заданными параметрами теплообменной поверхности, что требует тщательного анализа в выборе фирмы производителя.

Анализ литературных источников, а также патентных исследований [10,11] показал, что в мире существует всего несколько фирм, производящих монометаллическую низкопрофильную теплообменную трубу, в числе которых: «Schmole GmbH» (Германия), «Wieland» (Германия), «Wieland Thermal Solutions» (Португалия), «Neotiss» (Vallourec) (Франция).

Среди Российских разработок известен только один метод формирования профиля теплообменной трубы – механический метод профилирования затылованной частью режущего инструмента – резца (технология МВТУ им. Баумана). Однако этот метод является низкоэффективным из-за его малой производительности и ряда других факторов, например, большого количества концентраторов напряжения, образующихся во впадинах профиля, что снижает прочность теплообменных труб. Профиль теплообменной трубы в зависимости от метода изготовления ее рабочей части приведен на рисунке 3.

Следует отметить, что в опубликованных литературных источниках практически отсутствует информация о формировании рабочего профиля теплообменной трубы методом поверхностно-пластического деформирования: профилирующих станах, накатном



a

b

Рисунок 3. Профиль теплообменной трубы в зависимости от метода изготовления ее рабочей части:

a – метод нарезки резцом (технология МВТУ им. Баумана, Россия), б – метод накатки (технология фирмы «Schmole GmbH», Германия)

[составлено авторами]

Figure 3. Heat-exchanging tube profile depending on the manufacturing method of its operating part: a – cutting method (procedure of Bauman Moscow State Technical University, Russia), b – rolling method (procedure of Schmole GmbH, Germany) [compiled by the authors]

инструменте (его геометрии и материале) и режимах накатки, термическом оборудовании и режимах безокислительной термической обработки, оборудовании и методике вихревокового контроля. Все это является предметом углубленного анализа эксплуатационных параметров низкопрофильных теплообменных труб в зависимости от технологии их изготовления, сборки и монтажа теплообменных кассет, а также проведения комплексных испытаний (теплоаэродинамических, испытаний на циклическую и термоциклическую прочность).

В силу краткости изложения приведем выборочные результаты исследования геометрических параметров и физико-механических свойств монометаллических низкопрофильных теплообменных труб, на основе которых был сделан выбор заготовки. Рассматривалась продукция ведущих иностранных фирм: «Schmole GmbH», «Wieland» (Германия); «Wieland Thermal Solutions» (Португалия); «Neotiss» (Vallourec) (Франция) и отечественных производителей АО «Дипем-Я», МВТУ им. Баумана Н.Э. Разработанная методика проведения исследований заключалась в следующем. Были отобраны образцы труб указанных производителей. Исследования структуры и микротвердости рабочей поверхности теплообменных труб

Таблица 5. Результаты измерений геометрических параметров оребренной части трубы. Средние значения [составлено авторами]

Table 5. Measurement results of tube finned section geometry. Average values [compiled by the authors]

Фирма	Высота ребра, мм	Ширина ребра в средней части, мм	Ширина ребра в вершине, мм	Толщина стенки, мм
Schmole Gmbh	1,472	0,294	0,196	1,198
Wieland	1,421	0,378	0,1	0,915
Wieland Thermal Solutions	1,619	0,218	0,021	0,678
Neotiss	1,126	0,576	0,206	0,91
Дипем-Я	1,195	0,472	0,119	1,218

Таблица 6. Результаты замера микротвердости. Средние значения [составлено авторами]

Table 6. Microhardness measurement results. Average values [compiled by the authors]

Фирма	Продольное сечение	
	Значение твердости под ребром, HV5	Значение твердости между ребрами, HV5
Schmole Gmbh	215-221; 216-223; 213-214; 216-221	212-225; 215-217; 214-215; 215-218
Wieland	197-202; 201-203; 207-208; 199-208	200-218; 199-208; 203-217; 197-208
Wieland Thermal Solutions	179-183; 173-176; 172-180; 171-186	176-182; 172-184; 168-174; 169-178
Neotiss	175-204-208; 181-209-208; 176-206-211	169-209; 179-208; 178-214
Дипем-Я	176-185; 179-181; 178-192; 186-195	181-189; 184-190; 175-187; 185-191

проводились после профилирования и ее термической обработки на аттестованных контрольно-измерительных комплексах АО «ЗиО-Подольск».

Исходной заготовкой является холодно-деформированная труба 19x1,75 из стали марки 08Х14МФ. Результаты измерений приведены в таблицах 5 и 6.

Полученные результаты показали, что структура и микротвердость рабочей поверхности теплообменных труб после профилирования и ее термической обработки всех производителей, в основном, мало отличаются друг от друга. Следовательно, выбор заготовки целесообразно производить исходя из экономической целесообразности и требований выполнения постановления Правительства РФ об импортозамещении отечественных товаров с учетом результатов проведения указанных выше испытаний.

В заключении отметим, что проведенные в рамках НИОКР комплексные изыскания теоретического и экспериментального характера показали, что применение указанных труб в конструкциях компактных сепараторов-пароперегревателей позволило преодолеть дефицит температуры греющего пара в 6°C и существенно снизить металлоемкость сепаратора-перегревателя СПП-1200.

Выводы

Рассмотрены технические решения и технологические методы повышения эффективности сепараторов-пароперегревателей в составе оборудования АЭС с ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200.

Даны сравнительные характеристики теплообменных поверхностей для кассет с трубами продольного и поперечного оребрения.

Изложены преимущества и недостатки применения теплообменных труб с шестью и 8 восемью П-образными продольными ребрами в конструкциях теплообменных кассет СПП-1000 и СПП-1200.

Рассмотрено техническое решение, заключающееся в разработке и изготовлении кассетного блока с применением низкопропилевых монометаллических труб. Проанализированы некоторые проблемы, связанные с выбором заготовок теплообменных труб такого класса, фирм-изготовителей, а также технологий сборки и монтажа теплообменных кассет.

Целесообразность предлагаемых технических решений по модернизации СПП должна быть обоснована результатами тепло-гидравлических расчетов, а также сравнением технических характеристик конструкций до и после модернизации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Егоров М.Ю., Готовский М.А., Федорович Е.Д. Повышение эффективности систем сепарации и перегрева пара в турбинах АЭС. *Надежность и безопасность энергетики*. 2011;3(14):57–64. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?edn=oigxdf&ysclid=mcvdbzv4x632112608> (дата обращения: 09.07.2025).
Egorov M.Yu., Gotovsky M.A., Fedorovich E.D. Increasing the efficiency of steam separation and superheating systems in nuclear power plant turbines. *Safety and reliability of power industry*. 2011;3(14):52–64. (In Russ.). Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?edn=oigxdf&ysclid=mcvdbzv4x632112608> (accessed: 09.07.2025).
2. Мухачев В.Л., Пикус В.Ю., Назаров О.И. и др.. Исследование работы сепаратора-пароперегревателя СПП-1000 на блоке № 1 Запорожской АЭС. *Теплоэнергетика*. 1991;4:43–46. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46559990&ysclid=mck5p7vnke437766966> (дата обращения: 09.07.2025).
Muhachev V.L., Pikus V.YU., Nazarov O.I. et al. Issledovanie raboty separatora-paroperegrevatelya SPP-1000 na bloke № 1 Zaporozhskoj AES. *Thermal engineering*. 1991;4:43–46. (In Russ.). Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46559990&ysclid=mck5p7vnke437766966> (accessed: 09.07.2025).
3. Трифонов Н.Н., Коваленко Е.В., Николаенкова Е.К., Тренькин В.Б. Разработка технических решений по обеспечению устойчивой работы системы промежуточной сепарации и перегрева пара для турбоустановки К-1000-60/3000. *Теплоэнергетика*. 2012;9:17–21. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?edn=panjtn> (дата обращения: 09.07.2025).
Trifonov N.N., Kovalenko E.V., Nikolaenkova E.K., Tren'Kin V.B. Development of technical solutions for securing stable operation of the intermediate separation and steam reheating system for the K-1000-60/3000 turbine unit. *Thermal engineering*. 2012;59(9):661–666. (In Russ.). Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?edn=panjtn> (accessed: 09.07.2025).
4. Легкоступова В.В., Судаков А.В. Модернизация сепараторов-пароперегревателей энергоблоков АЭС с реакторами ВВЭР-440 и ВВЭР-1000. *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Естественные и инженерные науки*. 2017;3(23):61–73. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30561962> (дата обращения: 09.07.2025).
Legkostupova V.V., Sudakov A.V. Modernization of separators-steam reheaters of nuclear power units with VVER reactors. *ST. Petersburg state polytechnic university journal of engineering science and technology*. 2017;3(23):61–73. (In Russ.). Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30561962> (accessed: 09.07.2025).
5. Кулаков Е.Н., Гаев В.Д., Казаров Г.И., Сухоруков Ю.Г., Попов А.В. Повышение эффективности использования тепла конденсата пароперегревателей турбоустановок новых и действующих АЭС. *Теплоэнергетика*. 2023;1:30–39. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50182955> (дата обращения: 09.07.2025).
Kulakov E.N., Gaev V.D., Kazarov G.I., Sukhorukov Yu.G., Popov A.V. More efficient heat recovery from the condensate of reheaters at new and operating nuclear power plants (NPPS). *Thermal engineering*. 2023;1:30–39. (In Russ.). Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50182955> (accessed: 09.07.2025).
6. Хижов М.Ю. Методика теплогидравлических испытаний продольно-оребренных труб сепараторов – пароперегревателей для АЭС с водо-водяными энергетическими реакторами. *Глобальная ядерная безопасность*. 2019;2(31):59–66. Режим доступа: <http://gns.mephi.ru/ru/issues/2019-2-31?art=535> (дата обращения: 09.07.2025).
Khizhov M.Yu. Method of heat-hydraulic tests of long-relied pipes of separators – vapor heaters for NPP with water-water energy reactors. *Global nuclear safety*. 2019;2(31):59–66. (In Russ.). Available at: <http://gns.mephi.ru/ru/issues/2019-2-31?art=535> (accessed: 09.07.2025).
7. Смирнов А.М., Хижов М.Ю., Лексиков В.И. Оценка качества оребренных теплообменных труб сепаратора-пароперегревателя. *Проблемы машиностроения и автоматизации*. 2018;4:135–141. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36533250&ysclid=mcvf23ly9z138166090> (дата обращения: 09.07.2025).
Smirnov A.M., Hizhov M.Yu., Leksikov V.I. Estimation of quality of heat exchange pipes with external ribs for the separator-superheater. *Engineering & automation problems*. 2018;4:135–141. (In Russ.). Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36533250&ysclid=mcvf23ly9z138166090> (accessed: 09.07.2025).
8. Терехов В., Хижов М., Миронова Л. Quality assessment of pressed joints of heat-exchanger tube-tube sheets. *Materials Today: Proceedings*. 2021;38:1348–1350. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.099>
9. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод). Под ред. Н.В. Кузнецова и др.. Москва: Энергия, 1973. 299 с. Режим доступа: <https://djvu.online/file/nZxw1DRXovtW4?ysclid=mgymdkxcsd703029079> (дата обращения: 09.07.2025).
Teplovoj raschet kotel'nyh agregatov (normativnyj metod). Pod red. N.V. Kuznecova et al. Moscow: Energiya, 1973. 299 p. (In Russ.). Available at: <https://djvu.online/file/nZxw1DRXovtW4?ysclid=mgymdkxcsd703029079> (accessed: 09.07.2025).
10. Судаков А.В., Легкоступова В.В. Сепараторы-пароперегреватели зарубежных фирм. Санкт-Петербург: Издательство Политехнического университета, 2015. 103 с. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25714324&ysclid=mcvftsonju370378339> (дата обращения: 09.07.2025).
Sudakov A.V., Legkostupova V.V. Separatory-paroperegrevateli zarubezhnyh firm. Sankt-Peterburg: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2015. 103 p. (In Russ.). Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25714324&ysclid=mcvftsonju370378339> (accessed: 09.07.2025).

11. Судаков А.В, Силин В.В., Маринич А.М. и др. Сепаратор-пароперегреватель для перспективных блоков АЭС с ВВЭР. *Надежность и безопасность энергетики*. 2011;1(11):66–70. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16044069&ysclid=mcvg9pvo3y257792206> (дата обращения: 09.07.2025).

Sudakov A.V, Silin V.V., Marinich A.M. et al. Separator-paroperegrevatel' dlya perspektivnyh blokov AES s VVER. *Safety and reliability of power industry*. 2011;1(11):66–70. (In Russ.). Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16044069&ysclid=mcvg9pvo3y257792206> (accessed: 09.07.2025).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Терехов В.М. – разработка плана мероприятий по отработке технологии изготовления теплообменных кассет пароперегревателя с низкопрофильными монометаллическими трубами;

Миронова Л.И. – теоретическое обоснование выбора конструктивного исполнения труб продольного и поперечного оребрения по прочности труб в соединениях с натягом;

Хижов М.Ю. – анализ компоновки конструктивного исполнения сепараторов-пароперегревателей европейского и отечественного дизайнов (с горизонтальным и вертикальным расположением трубных пучков), разработка технического задания на проведение экспериментальных работ по исследованию эксплуатационных характеристик теплообменных труб различного вида оребрения, расчет и обработка экспериментальных данных.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без внешних источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Виктор Михайлович Терехов – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Энергетическое машиностроение» Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация.

e-mail: v.terehov@eatom.ru

Любовь Ивановна Миронова – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Проектирование сложных технических систем» Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), г. Москва, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0002-0927-4679>

e-mail: mironova_lub@mail.ru

Хижов Михаил Юрьевич – АО ОКБ «Гидропресс», г. Подольск, Московская область, Российская Федерация.

e-mail: m.khizhov@eatom.ru

Поступила в редакцию / Received 21.07.2025

После доработки / Revision 06.10.2025

Принята к публикации / Accepted 09.10.2025

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Terekhov V.M. – development of an action plan to test the technology of manufacturing heat exchange cassettes for a superheater with low-profile monometallic tubes;

Mironova L.I. – theoretical justification for the choice of the design of longitudinal and transverse finned tubes based on the strength of tubes in tension joints;

Khizhov M.Yu. – analysis of the design layout moisture separator-reheater of European and domestic designs (with horizontal and vertical arrangement of tube bundles), development of technical specifications for conducting experimental work to study the operational characteristics of heat exchange tubes with various types of finning, calculation and processing of experimental data.

FUNDING:

The authors state that there are no sources of funding.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Viktor M. Terekhov – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Moscow Engineering Physics Institute «MEPhI», Moscow, Russian Federation.

e-mail: v.terehov@eatom.ru

Lyubov' I. Mironova – Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Moscow Aviation Institute (State National Research University), Moscow, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0002-0927-4679>

e-mail: mironova_lub@mail.ru

Mikhail Yu. Khizhov – JSC ECB «Gidropress», Podolsk, Moscow region, Russian Federation.

e-mail: m.khizhov@eatom.ru