

УДК 621.181

DOI: 10.46960/1810-210X\_2020\_4\_81

А.В. Шилов<sup>1</sup>, М.И. Ершова<sup>2</sup>

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИМИЗИРОВАННОГО  
ТЕПЛООБМЕННОГО ЭЛЕМЕНТА ДЛЯ ВОДО-ВОДЯНЫХ РЕАКТОРНЫХ  
УСТАНОВОК АЭС МАЛОЙ МОЩНОСТИ**

<sup>1</sup>Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова

<sup>2</sup>Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Исследуется оптимизированный вариант конструктивного исполнения теплообменного элемента с двусторонним обогревом с целью получения в проектируемых реакторных установках заданных параметров теплоносителей при минимально возможном гидравлическом сопротивлении теплообменного оборудования. Оптимизация конструкции теплообменного элемента заключается в уменьшении толщины стенки теплообменных трубок и увеличении шага их взаимного расположения в кожухе парогенератора за счет увеличения высоты ребер наружной трубы. Проведен расчетный анализ стандартного и оптимизированного теплообменного элемента, дана оценка эффективности предлагаемой конструкции. С целью экспериментального исследования теплогидравлических характеристик конструкции в АО «ОКБМ Африкантов» была разработана и испытана экспериментальная модель оптимизированного теплообменного элемента. Выполнен анализ результатов расчетно-экспериментальных исследований теплогидравлических характеристик рассматриваемой конструкции. Сделана оценка возможности использования нового теплообменного элемента в парогенераторах перспективных водо-водяных реакторных установках наземного исполнения для АЭС малой мощности.

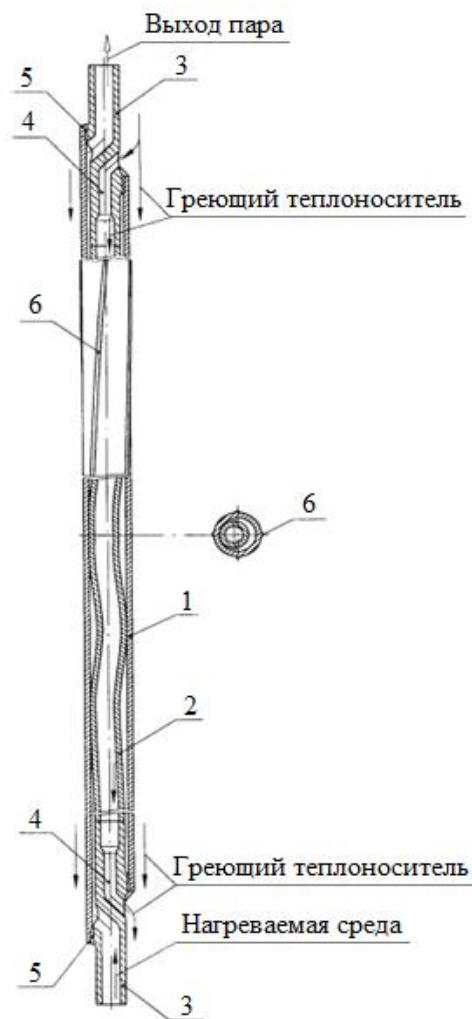
*Ключевые слова:* теплообменный элемент, парогенератор, реакторная установка, теплогидравлические характеристики, АЭС малой мощности.

### Введение

В настоящее время в атомном машиностроении активно используется многолетний опыт проектирования реакторных установок с интегральным парогенерирующим блоком при создании реакторных установок для атомных станций малой мощности наземного исполнения. Данный процесс непосредственно связан с проблемой совершенствования используемого в составе реакторной установки теплообменного оборудования, а именно парогенераторов, при помощи внедрения эффективных способов интенсификации теплообмена. Исследованию данного вопроса посвящен ряд известных изданий [1-4]. Однако интенсификация теплообмена в парогенераторах, как правило, связана с ростом их гидравлического сопротивления и, как следствие – с ростом гидравлического сопротивления контура теплоносителя. Для установок с естественной циркуляцией теплоносителя это ограничивает максимальную мощность, для установок с принудительной циркуляцией теплоносителя – приводит к увеличению габаритов и мощности насосов, что противоречит требованиям создания атомных станций малой мощности наземного исполнения [5]. Следовательно, актуальным направлением оптимизации параметров реакторной установки является снижение гидравлического сопротивления парогенераторов при обеспечении необходимой тепловой эффективности.

В настоящее время наиболее перспективным способом интенсификации теплообмена считается двусторонний обогрев с закруткой греющей и нагреваемой среды. Примером теплообменного аппарата с двусторонним обогревом и закруткой потока является теплообменник, элементы которого выполнены в виде каналов типа «труба в трубе» с внутренней трубой в виде змеевика, имеющего радиусгиба меньше половины наружного диаметра внутренней трубы. Наружная труба теплообменного элемента выполнена ребристой с 4 ребрами по винтовой линии. Данный способ интенсификации теплообмена (патент на изобретение

№2125695 от 04.07.1996 [6]) получил широкое применение в парогенераторах водо-водяных реакторных установках (рис .1).



**Рис. 1. Теплообменный элемент**

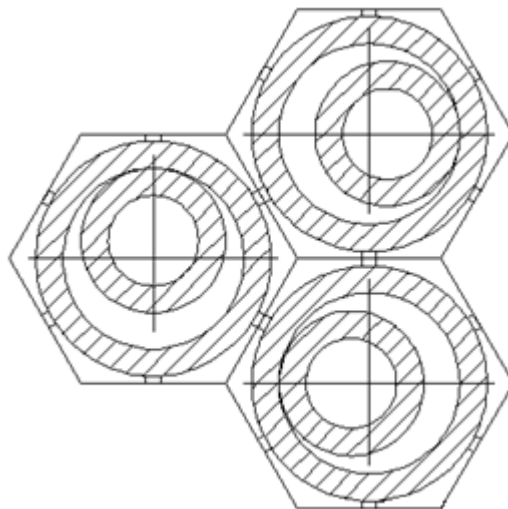
1 – наружная труба; 2 – внутренняя труба; 3 – переходник двухканальный;  
4 – канал с меньшим диаметром; 5 – сварной шов; 6 – ребро

Процесс теплообмена осуществляется по противоточной схеме циркуляции сред. Греющий теплоноситель, двигаясь сверху вниз, омывает внешнюю поверхность наружной трубы и внутреннюю поверхность внутренней трубы. Нагреваемая среда подается в нижнюю часть теплообменного элемента, поступает в кольцевую полость между наружной трубой и внутренней трубой и, двигаясь вверх по кольцевой полости, нагревается, испаряется и в виде перегретого пара отводится в коллектор [6].

Цель исследования – проведение расчетной оценки эффективности предлагаемой конструкции теплообменного элемента и осуществление сравнительного анализа результатов экспериментального и расчетного исследования теплогидравлических характеристик рассматриваемой конструкции. Для использования в перспективных малогабаритных установках наземного назначения конструкция стандартного теплообменного элемента, рассмотренная в патенте [6], была оптимизирована с целью получения в проектируемых реакторных установках заданных параметров теплоносителей при минимально возможном гидравлическом сопротивлении оборудования.

Конструктивными отличиями предлагаемого оптимизированного варианта теплообменного элемента являются уменьшенная толщина стенки внутренней теплообменной трубки на 20 %, уменьшенная толщина стенки наружной теплообменной трубки на 7 % и увели-

чение шага их взаимного расположения в кожухе парогенератора за счет увеличения высоты ребер наружной трубы на 50 % по сравнению со стандартным применяемым теплообменным элементом. Конструкция оптимизированного варианта теплообменного элемента удовлетворяет предъявляемым к ней требованиям прочности. Парогенерирующая ячейка с оптимизированной конструкцией теплообменного элемента представлена на рис. 2.



**Рис. 2. Парогенерирующая ячейка с оптимизированной конструкцией теплообменного элемента**

### **Сравнительный расчетный анализ эффективности стандартного и оптимизированного теплообменного элемента**

При проведении расчетного анализа стандартного и оптимизированного теплообменного элемента были приняты значения параметров греющей и нагреваемой сред, соответствующие номинальному режиму работы, проектируемой реакторной установки. Расчеты проводились при условии одинакового расхода теплоносителя на один теплообменный элемент. Полученные результаты расчетов коэффициента теплопередачи стандартного и оптимизированного теплообменного элемента представлены в табл. 1.

*Таблица 1*

#### **Коэффициент теплопередачи стандартного и оптимизированного теплообменного элемента**

Участок парогенератора	Коэффициент теплопередачи для наружной полости 1 контура, Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	
	Стандартный теплообменный элемент (наружная/внутренняя полость)	Оптимизированный теплообменный элемент (наружная/внутренняя полость)
Экономайзерный	1749/2605	1418/2310
Испарительный	3357/5053	3309/4943
Перегревательный	946/1753	882/1500

Уменьшение термического сопротивления теплообменных трубок, вследствие уменьшения их толщины, оказывает положительное влияние на величину коэффициента теплопередачи. Но, вследствие уменьшения скорости и соответственно чисел Re, наблюдается снижение коэффициентов теплоотдачи теплоносителя, которое перекрывает положительный эффект от изменения толщины. Таким образом, изменение коэффициента теплопередачи на наружной и внутренней полости элемента соответственно составляет: на экономайзерном участке -19 % / -11 %; на испарительном участке -1 % / -2 %; на перегревательном участке –

7 % / -14 %. Полученные результаты расчетов логарифмического температурного напора стандартного и оптимизированного теплообменного элемента представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Логарифмический температурный напор стандартного и оптимизированного теплообменного элемента**

Участок парогенератора	Логарифмический температурный напор, °С	
	Стандартный теплообменный элемент (наружная/внутренняя полость)	Оптимизированный теплообменный элемент (наружная/внутренняя полость)
Экономайзерный	46,77/47,03	46,86/47,03
Испарительный	51,10/59,41	52,92/57,98
Перегревательный	91,18/107,87	94,66/104,84

Полученные результаты расчетов длины экономайзерных, испарительных и перегревательных участков парогенератора со стандартным и оптимизированным теплообменным элементом представлены в табл. 3.

Таблица 3

**Относительные длины участков парогенератора со стандартным и оптимизированным теплообменным элементом**

Участок парогенератора	Длина участка, %	
	Стандартный теплообменный элемент	Оптимизированный теплообменный элемент
Экономайзерный	29,0	29,7
Испарительный	51,2	49,2
Перегревательный	19,8	21,1

Анализ результатов расчетов приводит к следующим выводам: несмотря на снижение коэффициента теплопередачи, перераспределение расходов по полостям теплообменного элемента приводит к увеличению длины перегревательного участка и увеличению логарифмического напора на наружной полости перегревательного участка. Так как наружная полость вносит более существенный вклад в теплообмен, чем внутренняя, то увеличение поверхности теплообмена в результате изменения конструкции позволяет получить пар на выходе из активной части предлагаемого теплообменного элемента с параметрами идентичными параметрам пара на выходе из активной части стандартного теплообменного элемента.

Несмотря на различную площадь поверхности теплообмена рассматриваемых элементов, результатом теплового расчета являются одинаковые температуры среды (пара) на выходе из теплообменного элемента стандартной и оптимизированной конструкции. При этом гидравлическое сопротивление по контуру греющей среды активной части теплообменного элемента оптимизированной конструкции примерно в два раза меньше, что оказывает существенное влияние на гидравлические характеристики всего первого контура реакторной установки. В связи с этим имеется возможность уменьшения мощности и габаритов насосов первого контура. Гидравлическое сопротивление по контуру нагреваемой среды нового теплообменного элемента на 24 % ниже, чем стандартного теплообменного элемента. Однако основной вклад в сопротивление парогенератора по второму контуру вносят дроссели.

По результатам сравнительного расчётного анализа, при идентичных исходных данных, влияние на тепловую эффективность оказывают следующие конструктивные особенности нового элемента:

- увеличение поверхности теплообмена;

- уменьшение толщины стенок внутренней и наружной трубы, которое приводит к уменьшению их термического сопротивления;
- увеличение проходного сечения полостей первого и второго контуров, приводящее к снижению скоростей теплоносителей, перераспределению расхода первого контура по полостям теплообменного элемента, изменению логарифмических температурных напоров и смещению границ экономайзерного, испарительного и перегревательного участков.

Таким образом, проведенный расчетный анализ подтверждает целесообразность использования в теплообменном оборудовании перспективных реакторных установок оптимизированного теплообменного элемента, который позволяет существенно уменьшить гидравлическое сопротивление парогенератора при сохранении его тепловой эффективности.

### Экспериментальные исследования оптимизированного теплообменного элемента

В соответствии с указанной целью для исследования теплогидравлических характеристик оптимизированного теплообменного элемента была создана экспериментальная модель и комплекс экспериментальных исследований. Исследования выполнялись на стенде, разработанном в АО «ОКБМ Африкантов». Схема стенда представлена на рис. 3.

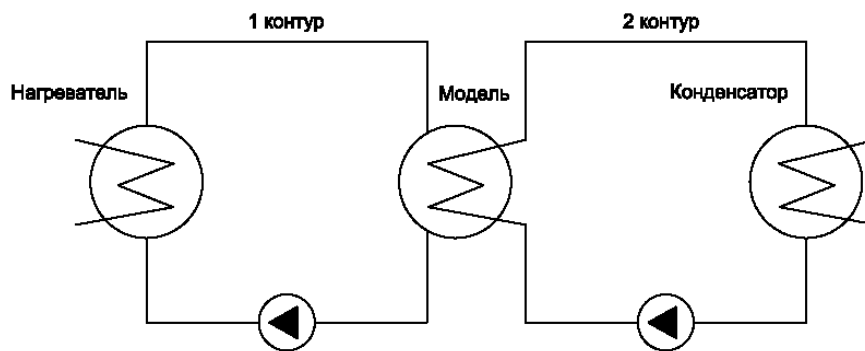


Рис. 3. Упрощенная гидравлическая схема экспериментального стенда

Стенд предназначен для проведения испытаний по исследованию теплогидравлических и гидродинамических характеристик парогенераторов. Для обеспечения испытаний на стенде предусмотрены система высокого давления (первый контур) и система среднего давления (второй контур). Система высокого давления служит для транспортирования теплоносителя заданных параметров (температура, давление, расход) от нагревательных колонок к испытуемой модели по замкнутому контуру. Система высокого давления включает в себя: нагревательные колонки (4 шт.); два циркуляционных электронасоса с системой трубопроводов, соединяющих их с нагревательными колонками стенда; трубопроводы с арматурой, соединяющие нагревательные колонки с трубопроводами системы высокого давления; систему компенсации объема и подпитки стенда. Подпитка системы высокого давления осуществляется электронасосом.

Нагревательные колонки на выходе греющего теплоносителя объединены попарно трубопроводами. Объединенные пары соединяются трубопроводом, и по нему теплоноситель поступает к трубопроводам высокого давления. Пройдя по трубопроводам высокого давления, теплоноситель поступает в модель парогенератора. Из модели парогенератора охлажденный теплоноситель по трубопроводу поступает в теплообменник. Из теплообменника теплоноситель возвращается на «всас» насоса. Циркуляционным насосом вода подается на подогрев к нагревательным колонкам.

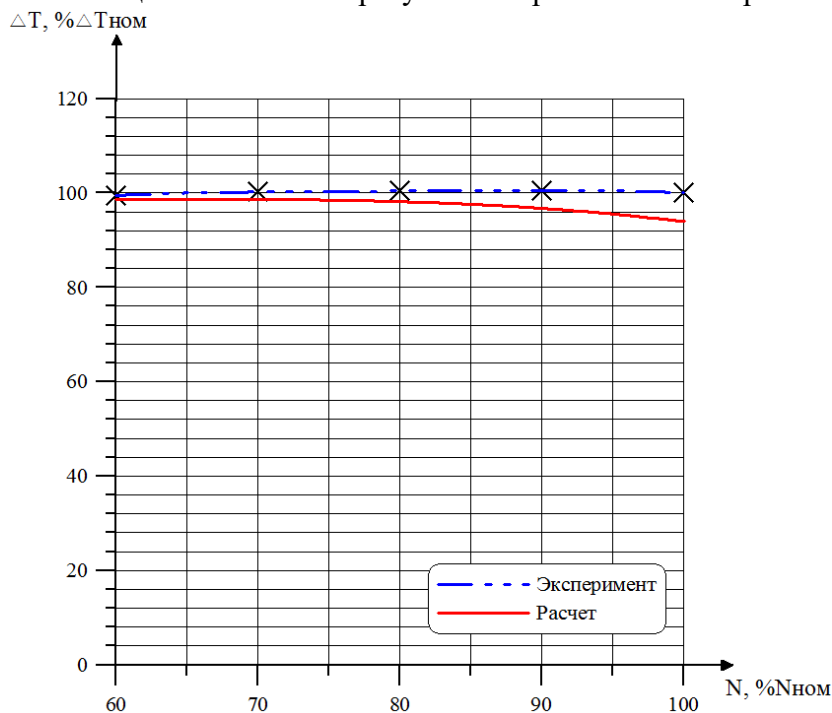
Система среднего давления служит для подачи в модель парогенератора питательной воды заданных параметров (температура, давление, расход) и отвода образующегося пара

(пароводяной смеси) из модели парогенератора в конденсационную установку. Второй контур включает: систему охлаждения (оборотный контур); систему дренажа и аварийного слива; систему воздухоотведения; измерительную систему и другое оборудование. Циркуляция воды в контурах осуществляется при помощи электронасосов. Влияние отличий в элементах конструкции модели и штатного парогенератора, обусловленных масштабным фактором, учитывается при помощи расчетных методик, разработанных на основании многолетнего опыта проведения подобных испытаний, что позволяет в конечном итоге получить представительные результаты.

### Анализ результатов расчетно-экспериментальных исследований

По результатам теплотехнических испытаний определена температура нагреваемого теплоносителя на выходе из модели парогенератора, а также гидравлическое сопротивление модели по контуру греющей среды в диапазоне изменения паропроизводительности от 60 до 100 % номинальной мощности, характерном для АЭС.

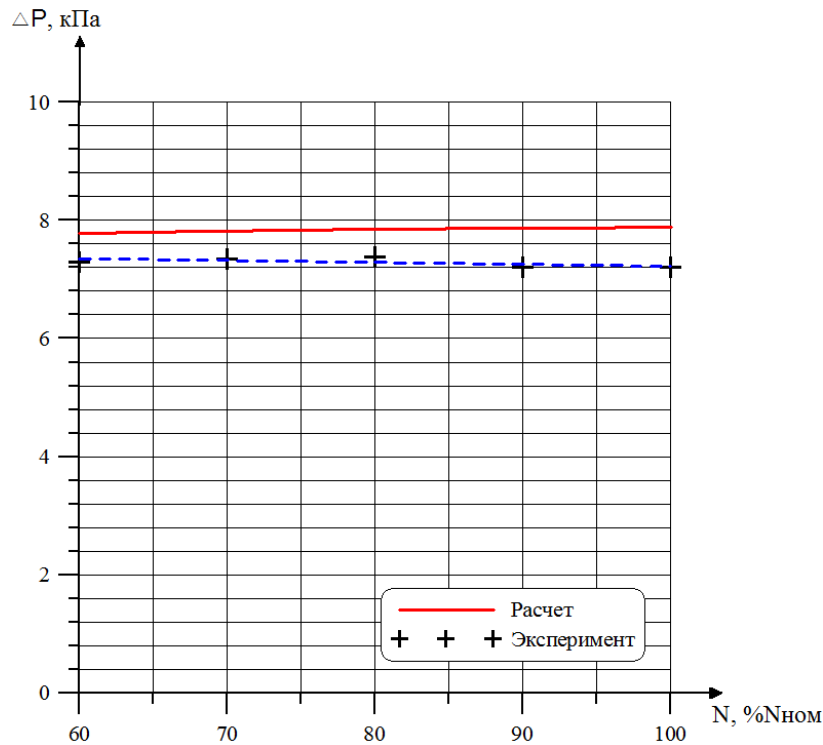
На рис. 4 представлены зависимости изменения температуры нагреваемой среды в оптимизированном теплообменном элементе (в % от номинального экспериментального значения) от уровня тепловой мощности согласно результатам расчета и эксперимента.



**Рис. 4. Сравнение экспериментальной и расчетной зависимостей изменения температуры нагреваемой среды в оптимизированном теплообменном элементе от уровня тепловой мощности**

Как видно из графика, представленного на рис. 4, по результатам эксперимента увеличение температуры нагреваемой среды в оптимизированном теплообменном элементе для режима, соответствующего номинальной мощности реакторной установки, превышает расчетное значение на ~ 6 %. Следовательно, характеристики исследуемой модели отвечают предъявляемым требованиям.

На рис. 5 показана зависимость гидравлического сопротивления экспериментальной модели по контуру греющей среды от уровня тепловой мощности согласно результатам расчета и эксперимента.



**Рис. 5. Сравнение экспериментальной и расчетной зависимостей гидравлического сопротивления экспериментальной модели по контуру греющей среды от уровня тепловой мощности**

Как видно из графика, представленного на рис. 5, по результатам эксперимента гидравлическое сопротивление модели по контуру греющей среды для всего исследуемого диапазона мощности не превышает расчетных значений. Таким образом, подтверждается возможность обеспечения заданных параметров теплоносителя в оптимизированном теплообменном элементе в рабочем диапазоне изменения паропроизводительности от 60 до 100 % номинальной мощности, характерном для АЭС.

### Заключение

Выполнен сравнительный расчетный анализ тепловой эффективности и гидравлического сопротивления теплообменного элемента стандартной и оптимизированной конструкции. Проведен комплекс экспериментов, по результатам которых выполнен анализ теплогидравлических характеристик оптимизированного теплообменного элемента. Получены следующие результаты:

- гидравлическое сопротивление по контуру греющей среды активной части теплообменного элемента оптимизированной конструкции приблизительно в два раза меньше, чем у стандартной конструкции, что оказывает существенное влияние на гидродинамические характеристики всего первого контура реакторной установки;
- гидравлическое сопротивление по контуру нагреваемой среды нового теплообменного элемента на 24 % ниже, чем стандартного теплообменного элемента;
- увеличение проходного сечения полостей первого и второго контуров в оптимизированной конструкции теплообменного элемента, привело к снижению скоростей теплоносителя, перераспределению расхода первого контура по полостям теплообменного элемента, изменению логарифмических температурных

напоров и смещению границ экономайзерного, испарительного и перегревательного участков.

- по результатам экспериментального исследования увеличение температуры нагреваемой среды в оптимизированном теплообменном элементе для режима, соответствующего номинальной мощности реакторной установки, превышает расчетное значение на ~ 6 %. Следовательно, характеристики исследуемой модели отвечают предъявляемым требованиям.
- по результатам экспериментального исследования гидравлическое сопротивление модели по контуру греющей среды для всего исследуемого диапазона мощности не превышает расчетных значений.

Сравнительный расчетный анализ подтвердил целесообразность использования в теплообменном оборудовании перспективных реакторных установках оптимизированного теплообменного элемента. Предлагаемый теплообменный элемент позволяет существенно уменьшить гидравлическое сопротивление парогенератора при сохранении его тепловой эффективности.

По результатам проведенного анализа расчетных и экспериментальных исследований подтверждена возможность обеспечения заданных параметров теплоносителя в рабочем диапазоне перспективных водо-водяных реакторных установок для АЭС малой мощности при использовании в составе теплообменного оборудования теплообменного элемента оптимизированной конструкции.

### Библиографический список

1. **Гортышев, Ю.Ф.** Теплогидравлический расчет и проектирование оборудования с интенсифицированным теплообменом / Ю.Ф. Гортышев, В.В. Олимпиев, Б.Е. Байгалиев – Казань: Изд. Казанского государственного технического университета, 2004. – 432 с.
2. **Dreiser, G.A.** Intensification of heat exchange equipment/ A.S. Myakotchin, A.A. Neverov, V.V. Ermakov, S.L. Lapaev // Proceedings of International Conference «Heat Exchangers for Sustainable Development». 15-18 June 1998. Lisbon, Portugal. P.395-404.
3. **Будов, В.М.** Форсированные теплообменники ЯЭУ/ В.М. Будов, С.М. Дмитриев – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 176 с.
4. **Manglik, R. M.** Heat transfer enhancement and pressure drop in viscous liquid flows in isothermal tubes with twisted-tape inserts/ R. M. Manglik, A. E. Bergles // Wärme-und Stoffübertragung. –1992. – No.27. – P. 249-257.
5. **Фадеев, Ю.П.** Плавающие и блочно-транспортабельные атомные станции малой мощности / Ю.П. Фадеев, А.Н. Пахомов, В.И. Полуничев, А.Ю. Турусов // Труды НГТУ им. П. Е. Алексеева. – 2018. – №4 (123). – С. 172-177.
6. Пат. 2125695 Российская Федерация, F28D 7/10. Теплообменный элемент / Каменский В.Г., Камашев Б.М., Рулев В.М.; заявитель и патентообладатель Опытное конструкторское бюро машиностроения (RU). – № 96113250/06; заявл. 04.07.1996; опубл. 27.01.1999.

*Дата поступления  
в редакцию: 08.10.2020*



A.V. Shilov<sup>1</sup>, M.I. Ershova<sup>2</sup>

**NUMERICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THERMAL-HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF THE OPTIMIZED HEAT EXCHANGER ELEMENT FOR A PRESSURIZED-WATER REACTOR PLANTS NUCLEAR POWER PLANT SMALL POWER**

<sup>1</sup>Afrikantov OKB Mechanical Engineering

<sup>2</sup>Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

**Purpose:** estimate the effectiveness of the proposed design of the heat exchange element and the implementation of comparative analysis of results of experimental and numerical studies of thermal-hydraulic characteristics of the considered structures.

**Methodology:** the authors performed a computational analysis of the standard and optimized heat exchange element, and evaluated the effectiveness of the proposed design of the heat exchange element. An experimental model of an optimized heat exchange element was developed and tested in JSC «Afrikantov OKBM» in order to experimental study the thermal-hydraulic characteristics of the structure under consideration. The paper analyzes the results of computational and experimental studies of the thermal-hydraulic characteristics of the structure under consideration.

**Results:** a comparative calculation analysis confirmed the feasibility of using an optimized heat exchange element in the heat exchange equipment of promising reactor plant. The proposed heat exchange element can significantly reduce the hydraulic resistance of the steam generator while maintaining its thermal efficiency.

**Conclusions:** based on the results of the analysis of calculated and experimental studies, the possibility of providing the specified parameters of the coolant in the operating range of promising water-water power plants for low-power nuclear power plants when using an optimized heat exchange element as part of the heat exchange equipment confirmed.

*Key words:* heat exchange element, steam generator, reactor plant, thermal-hydraulic characteristics, small nuclear power plant.