

УДК 621.039

DOI 10.46960/1816-210X_2025_4_79

EDN APGPGT

ВАРИАНТЫ СИСТЕМЫ ОТВОДА ТЕПЛА РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК С ТЯЖЕЛЫМ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

Р.В. Сумин

ORCID: 0009-0005-3003-8784 e-mail: rom.sumin@yandex.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***М.Д. Погорелов**

ORCID: 0009-0004-7325-6805 e-mail: md.pogorelov@yandex.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***Т.К. Зырянова**

ORCID: 0000-0002-5336-3556 e-mail: ats@nntu.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***С.В. Колосов**

ORCID: 0009-0007-3238-6592 e-mail: kolosovs.nn@yandex.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***Д.С. Шалина**

ORCID: 0009-0009-8254-3669 e-mail: daria-sh@list.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Рассмотрены варианты отвода тепла от ядерных энергетических установок с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем. Проведен анализ конструктивных особенностей и эксплуатационных характеристик парогенераторов ядерных паропроизводящих установок атомных подводных лодок, охлаждаемых свинец-висмутовым теплоносителем, а также перспективных реакторных установок со свинцовым теплоносителем типа БРЕСТ, предназначенных для генерации электроэнергии. Предложена конструкция и схема водо-воздушного теплообменника, работающего при давлении, близком к атмосферному, и теплообменника для экспериментальных контуров. Данная конструкция не требует применения сложных систем с водой под давлением, а также исключает затвердевание жидкометаллического теплоносителя. Показаны характеристики теплообменных поверхностей, а также параметры греющей (жидкий металл) и рабочей (вода/пар, воздух) сред для систем отвода тепла от активных зон реакторов. Изложенный опыт проектирования данных видов теплообменников может стать основой для дальнейшего проектирования и совершенствования систем теплоотвода в ядерных энергетических установках нового поколения.

Ключевые слова: реактор; быстрые нейтроны; тяжелый жидкометаллический теплоноситель; теплообмен; свинцовый теплоноситель; свинец-висмутовый теплоноситель; парогенератор; отвод тепла; поверхность теплообмена; первый контур.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Сумин, Р.В. Варианты системы отвода тепла реакторных установок с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем / Р.В. Сумин, М.Д. Погорелов, Т.К. Зырянова, С.В. Колосов, Д.С. Шалина // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2025. № 4. С. 79-92. DOI: 10.46960/1816-210X_2025_4_79 EDN: APGPGT

HEAT REMOVAL SYSTEM OPTIONS FOR HEAVY LIQUID METAL COOLANT REACTOR PLANTS

R.V. Sumin

ORCID: **0009-0005-3003-8784** e-mail: **rom.sumin@yandex.ru**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

Nizhny Novgorod, Russia

M.D. Pogorelov

ORCID: **0009-0004-7325-6805** e-mail: **md.pogorelov@yandex.ru**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

Nizhny Novgorod, Russia

T.K. Zyryanova

ORCID: **0000-0002-5336-3556** e-mail: **ats@nntu.ru**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

Nizhny Novgorod, Russia

S.V. Kolosov

ORCID: **0009-0007-3238-6592** e-mail: **kolosovs.nn@yandex.ru**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

Nizhny Novgorod, Russia

D.S. Shalina

ORCID: **0009-0009-8254-3669** e-mail: **daria-sh@list.ru**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article discusses options for heat removal from nuclear power plants with heavy liquid metal coolant. The design features and operational characteristics of steam generators of nuclear steam-producing plants of nuclear submarines with lead-bismuth coolant, as well as promising BREST type reactor plants with lead coolant for electricity generation, are analyzed. The design and diagram of a water-air heat exchanger operating at a pressure close to atmospheric pressure and a heat exchanger for experimental circuits are proposed. This design does not require the use of complex pressurized water systems and also eliminates the solidification of the liquid metal coolant. The characteristics of heat exchange surfaces, as well as the parameters of the heating (liquid metal) and working media (water/steam, air) for reactor cores heat removal systems are shown. The presented experience in designing these types of heat exchangers can become the basis for further design and improvement of heat removal systems in new generation nuclear power plants.

Key words: reactor; fast neutrons; heavy liquid metal coolant; heat exchange; lead coolant; lead-bismuth coolant, steam generator; heat removal; heat exchange surface; first circuit.

FOR CITATION: R.V. Sumin, M.D. Pogorelov, T.K. Zyryanova, S.V. Kolosov, and D.S. Shalina. Heat removal system options for heavy liquid metal coolant reactor plants. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2025. № 4. Pp. 79-92. DOI: 10.46960/1816-210X_2025_4_79 EDN: APGPGT

Введение

Реакторные установки с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем (ТЖМТ) имеют ряд преимуществ по сравнению с существующими реакторными установками. Свинцовый и свинец-висмутовый теплоносители являются химически неактивными по отношению к воздуху и воде. Также они не могут кипеть в реакторных условиях, что исключает аварии с пустотным эффектом реактивности. Эти и другие факторы составляют естественную безопасность реакторной установки в целом. Атомные электростанции с реакторами, активные зоны которых охлаждаются жидкометаллическими теплоносителями, в общем слу-

чае обладают более высоким коэффициентом полезного действия по сравнению с реакторами с водой под давлением, имея при этом более низкое давление первого контура. Отсутствие сложных систем безопасности, уменьшенная металлоемкость и высокий коэффициент полезного действия реакторных установок с ТЖМТ позволяют достичь более высоких экономических показателей при создании данных типов реакторных установок.

Сегодня в мире уделяется большое внимание разработке реакторов IV поколения, активные зоны которых охлаждаются свинцовым или свинец-висмутовым теплоносителями [1]. Парогенераторы являются одним из наиболее важных узлов любой реакторной установки, от характеристик которых зависят безопасность и эффективность в целом. Наша страна имеет большой опыт создания парогенераторов с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем для атомных подводных лодок. В настоящей статье рассмотрены конструкции и параметры парогенераторов с ТЖМТ для атомных подводных лодок и проектируемого на данный момент реактора БРЕСТ-ОД-300. Отдельно рассмотрен теплообменник стенда со свинцовым теплоносителем ФТ-4, созданного в НГТУ им. Р.Е. Алексеева.

Конструктивные схемы парогенераторов транспортных реакторных установок

Парогенератор МП-2 (рис. 1) состоял из трех автономных секций, отключаемых арматурой как по реакторному контуру, так и по пароводяному контуру. Каждая петля теплообмена включала в себя парогенерирующий теплообменник, сепаратор пара, насос многократной принудительной циркуляции (МПЦ), трубопроводы. Характеристики парогенератора МП-2 показаны в табл. 1.

Таблица 1.

Проектные характеристики парогенератора МП-2 в номинальном режиме

Table 1.

Design characteristics of MP-2 steam generator in nominal mode

Характеристика	Значение
Паропроизводительность, кг/с	26,8
Давление пара в сепараторе, МПа	4,1
Температура перегретого пара, °C	355
Температура питательной воды после подогревателя, °C	100
Температура котловой воды, °C	173
Кратность циркуляции	2
Расход свинец-висмутового теплоносителя, м ³ /с	0,258
Температура теплоносителя, °C	
- на входе	473
- на выходе	254

Конфигурация труб в трубной доске имеет треугольную форму, с шагом между трубами 18 мм. По длине испарительного пучка установлено пять дистанционирующих решеток. По результатам испытаний на заводе-изготовителе ПГ МП-1 было заглушено 25 периферийных труб испарителя. Вокруг испарителя были расположены 122 U-образных труб наружным диаметром 19 мм и толщиной стенки 1,5 мм пароперегревателя в три ряда по окружности с шагом 25 мм. По длине пароперегревательных труб устанавливались три дистанционирующие решетки.

Камера ТЖМТ разделена перегородкой на входную и выходную части. К перегородке примыкала разделительная обечайка, которая образовывала пароперегревательную и испарительную полости свинец-висмутового теплоносителя. В верхней части камеры приваривалась трубная доска и пароводяная камера. Пароводяная камера состояла из наружной и внутренней обечаек, разделенных перегородкой, которые образовывали полости: котловой воды, пароводяной смеси, насыщенного пара, перегретого пара. Уплотнение полостей пароводяной

камеры производилось съемными промежуточными крышками и сильфонными вставками. Пароводяная камера уплотнялась силовой крышкой на никелевой прокладке.

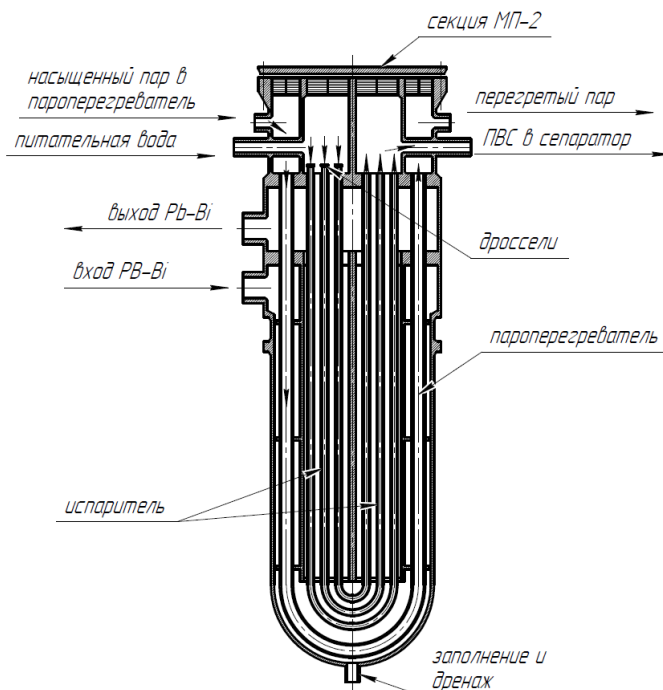


Рис. 1. Конструктивная схема парогенератора МП-2

Fig. 1. Structural diagram of MP-2 steam generator

При эксплуатации ПГ МП-1 на стенде 27/ВТ была обнаружена межконтурная неплотность в периферийных трубах испарителя. Как показал расчетный анализ, причиной течи в трубах была нестабильность гидродинамических характеристик испарительных труб вследствие недостаточного их дросселирования. На основании расчетного анализа, учитывающего различное тепловосприятие и гидравлическое сопротивление, было внедрено трехзонаное дросселирование испарительных труб. Такое же дросселирование было внедрено в парогенераторах МП-2. В последующей эксплуатации течей в трубах испарителя не было.

Для выравнивания температуры трубной доски в конструкции секции под трубной доской был установлен сферический вытеснитель, а со стороны пара (воды) трубная доска защищалась тепловой изоляцией в виде труб наружным диаметром 14 мм, толщиной стенки 1 мм и длиной 440 мм, образующих застойные зоны пара. Во входных участках труб пароперегревателя были установлены чехлы в виде труб наружным диаметром 14 мм, толщиной стенки 1 мм и длиной 1820 мм. Секция МП-2 была изготовлена из стали 1Х18Н9Т. В состав контура МПЦ МП-2 входил сепаратор пара центробежного типа с центральными жалюзи в виде цилиндрического сосуда диаметром 720 мм и высотой 2500 мм. В его верхней части была расположена разделительная камера с тангенциальным подводом пароводяной смеси. Сопловое устройство направляло поток пароводяной смеси на внутренние стенки корпуса. За счет центробежных сил влага стекала по стенкам корпуса вниз, а отсепарированный пар через вертикальные жалюзи попадал в центральную часть и, пройдя через дополнительные жалюзи в верхней части, поступал в пароперегреватель секции МП-2. Сопловое устройство состояло из направляющих лопаток с фигурным профилем, расположенным под углом 25° к горизонту. Вертикальные жалюзи состояли из вертикальных профильных листов, установленных с шагом 3° по окружности. Парогенератор МП-4А (рис. 2) включал в себя три одинаковых секции, каждая из которых состояла из теплообменника – секции МП-4А, сепаратора пара, насоса МПЦ, конденсатора расхолаживания, соединяющих их трубопроводов и арматуры.

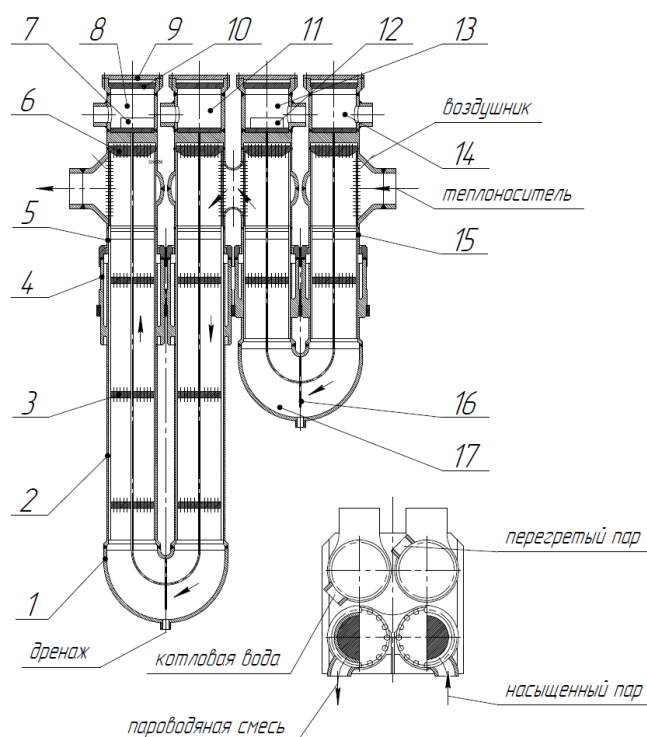


Рис. 2. Конструктивная схема парогенератора МП-4А:

- 1 – днище испарителя; 2 – вытеснитель; 3 – решетка дистанционирующая; 4 – опора;
 5 – корпус испарителя; 6 – вытеснитель; 7 – дроссельное устройство; 8 – камера котловой воды;
 9 – крышка силовая; 10 – блок биологической защиты; 11 – камера пароводяной смеси;
 12 – тепловая защита; 13 – камера насыщенного пара; 14 – камера перегретого пара;
 15 – корпус пароперегревателя; 16 – дистанционирующая решетка; 17 – днище пароперегревателя

Fig. 2. Structural diagram of MP-4A steam generator:

- 1 – evaporator bottom; 2 – displacer; 3 – spacer grid; 4 – support; 5 – evaporator body; 6 – displacer;
 7 – throttle device; 8 – boiler water chamber; 9 – power cover; 10 – biological protection unit;
 11 – steam-water mixture chamber; 12 – thermal protection; 13 – saturated steam chamber;
 14 – superheated steam chamber; 15 – superheater body; 16 – spacer grid; 17 – superheater bottom

Секция МП-4А – вертикальный теплообменник, состоящий из двух U-образных корпусов с размещенными в них теплообменными трубами. Один корпус является испарителем, другой – пароперегревателем. Испаритель и пароперегреватель имеют принципиально одинаковую конструкцию и отличаются, в основном, габаритными размерами по высоте. В МП-4А в испарителе были применены трубы наружным диаметром 12 мм и толщиной стенки 2 мм. Шаг между трубами составлял 17 мм. В пароперегревателе трубы наружным диаметром 16 мм и толщиной стенки 2 мм располагались по сторонам равностороннего треугольника с шагом 23 мм. Диаметр корпусов испарителя и пароперегревателя одинаков. Размещение теплообменных поверхностей в двух отдельных U-образных корпусах испарителя и пароперегревателя, соединенных общей камерой теплоносителя, позволило реализовать противоточную схему движения нагревающих и нагреваемых сред. По сравнению с секцией МП-2 увеличилась скорость теплоносителя, применена более теплопроводная сталь для теплообменных труб. Благодаря этому, при тех же параметрах сред, характеристики парогенератора были оптимизированы: получены меньшие поверхности теплообмена, массы сухой и заполненной теплоносителем секции. Масса сухой секции МП-4А составила 5900 кг, а с заполняющим теплоносителем – около 11150 кг. Масса секции МП-2 соответственно была 8360 и 17450 кг. Для шести секций МП-4А уменьшение массы составило около 38000 кг. Теплооб-

менные трубы секции МП-4А заключены в корпусе, состоящем из камер ТЖМТ, цилиндрических корпусов, полуторовых днищ и трубных досок, в которых закреплены трубы. Камеры теплоносителя сферической формы имеют патрубки и горловины, к которым сверху приварены трубные доски пароводяных камер, а снизу цилиндрические корпуса. Камеры теплоносителя имеют горизонтальный разъем, и соединяют при сварке камеры корпуса испарителя и пароперегревателя. Штампованные днища устанавливаются после сборки трубного пучка и соединяют цилиндрические корпуса. В корпусах установлены пластинчатые дистанционирующие решетки, разделяющие трубы в горизонтальной плоскости. Планки перекрещиваются под углом 60° и образуют ромбическую решетку. На гибовых участках труб в днищах дистанционирование выполнено плоскими пластинами в горизонтальном направлении, обеспечивая возможность термических перемещений гибов труб в вертикальном направлении.

Для предотвращения перетечек теплоносителя, помимо трубного пучка и уменьшения его объема, по высоте цилиндрических корпусов установлены вытеснители. На вертикальных участках корпусов вытеснители повторяют наружную конфигурацию трубного пучка. Для предохранения трубной доски от термического воздействия ТЖМТ в верхней части камер под трубными досками установлены вытеснители, выполненные в виде перфорированных дисков. Они создают застойные зоны теплоносителя, которые термостатируют трубные доски, благодаря чему температура трубных досок по всей их толщине соответствует температуре сред, проходящих по теплообменным трубам. В полости, образованной дисками вытеснителей и трубными досками, имеются воздушники камер. На камерах теплоносителя под вытеснителями установлены штуцеры к системе сигнализаторов межконтурной неплотности парогенерирующих труб.

Для удаления эвтектики свинец-висмут из корпусов секции предусмотрены дренажные штуцеры в нижней части днищ. В пароводяных камерах имеются резьбовые отверстия для шпилек крепления силовых крышек. Герметизация камеры осуществляется никелевыми прокладками. Наличие съемных силовых крышек обеспечивает доступ к трубным доскам и внутренним полостям теплообменных труб для проведения работ по диагностике состояния труб и их ремонту. Закрепление труб в трубных досках производилось вальцеванием энергией взрывчатых веществ на всю толщину трубных досок и последующей приваркой к ним труб аргонодуговой сваркой. Для раздачи котловой воды по трубам испарителя, обеспечивающей беспульсационный режим работы испарительных труб осуществлено их дросселирование. Дроссели установлены в каждую трубу через паронитовые прокладки, облицованные фольгой из нержавеющей стали. Ввиду незначительного различия в длинах труб в секции МП-4А выполнено однозонное дросселирование. Корпусные детали секции МП-4А выполнялись из перлитной стали 12Х1МФ. Для теплообменных труб была применена сталь ЭП-79. Характеристики парогенератора МП-4А показаны в табл. 2.

Таблица 2.

Проектные характеристики парогенератора МП-4А в номинальном режиме

Table 2.

Design characteristics of MP-4A steam generator in nominal mode

Характеристика	Значение
Паропроизводительность, кг/с	26,8
Давление пара в сепараторе, МПа	4,1
Температура перегретого пара, °С	350
Температура питательной воды после подогревателя, °С	100
Температура котловой воды, °С	181
Кратность циркуляции	2,1
Температура теплоносителя, °С	
– на входе	430
– на выходе	242

В состав реакторной установки (РУ) атомных подводных лодок проекта 705К входили два парогенератора МП-8М, каждый из которых состоял из теплообменника – секции МП-8М, сепаратора пара, насоса МПЦ, конденсатора расхолаживания, охладителя продувки, соединяющих их трубопроводов и арматуры.

Разработке парогенератора МП-8М предшествовал проект парогенератора МП-7 для реакторной установки проекта 705. В ней применялись три парогенератора, суммарная производительность и параметры пара которых соответствовали парогенератору МП-8М. Первый опытный парогенератор МП-7 был изготовлен и установлен вместе с парогенератором МП-4А на стенде 27/ВТ-5. От штатного парогенератора опытный образец МП-7 отличался конфигурацией корпусов испарителя и пароперегревателя. Штатный парогенератор МП-7 был установлен и эксплуатировался на атомных подводных лодках. Во время эксплуатации парогенератора МП-7 были выявлены конструктивные недостатки, связанные, в основном, с недостаточной вибропрочностью теплообменных труб в условиях высокоскоростных характеристик теплоносителя, ранее не применявшихся в конструкциях, и «слабыми» дистанционирующими элементами. Поэтому в конструкции МП-7 и МП-8 были введены новые специально разработанные дистанционирующие решетки труб, изменены параметры устройств, распределяющих поток теплоносителя по периферии трубных пучков. Внедрено новое надежное уплотнение пароводяных камер.

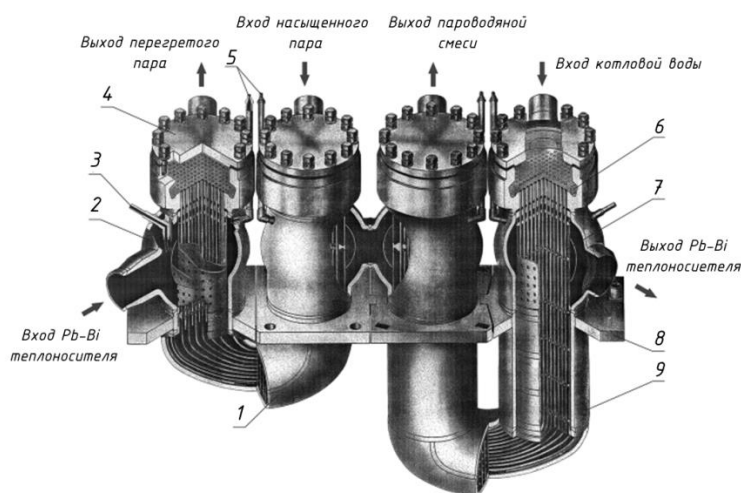


Рис. 3. Конструктивная схема парогенератора МП-8М:

1 – пароперегреватель; 2 – камера теплоносителя; 3 – дренаж; 4 – силовая крышка; 5 – воздушник;
6 – дроссельное устройство; 7 – труба теплообменная; 8 – опора; 9 – испаритель

Fig. 3. Structural diagram of MP-8M steam generator:

1 – superheater; 2 – coolant chamber; 3 – drainage; 4 – power cover; 5 – air release valve;
6 – throttle device; 7 – heat exchange pipe; 8 – support; 9 – evaporator

Модернизированные конструкции парогенераторов получили наименование МП-7М и МП-8М (рис. 3). Они отличались в основном паропроизводительностью, которая была в 1,5 раза больше чем в МП-7М, закреплением корпусов испарителя и пароперегревателя на каркасах их крепления. Принципиальный облик трубных пучков и их крепления, устройств, распределяющих поток теплоносителя, конструкция пароводяных камер, трубопроводов дренажа одинаковы в секциях МП-7М и МП-8М. Характеристики парогенератора МП-8М показаны в табл. 3.

Таблица 3.
Проектные характеристики парогенератора МП-8М в номинальном режиме

Table 3.
Design characteristics of MP-8M steam generator in nominal mode

Характеристика	Значение
Паропроизводительность, кг/с	25
Давление в сепараторе, МПа	4,8
Температура, °С	
– перегретого пара;	420
– питательной воды.	60
Температура теплоносителя, °С	
– на входе в парогенератор;	456
– на выходе из парогенератора.	270
Расход теплоносителя, м ³ /с	0,26

Секция МП-8М – вертикальный теплообменник, состоящий из двух U-образных корпусов с размещенными в них теплообменными трубами. Один корпус является испарителем, другой – пароперегревателем. Испаритель и пароперегреватель имеют аналогичную конструкцию и отличаются, в основном, габаритными размерами по диаметру и высоте. Теплообменные трубы заключены в корпусе, состоящем из камер теплоносителя, цилиндрических корпусов, полуторового днища и трубных досок, в которых закреплены трубы. Камеры теплоносителя сферической формы имеют патрубки и горловины, к которым сверху приварены трубные доски пароводяных камер, а снизу – цилиндрические корпуса. Патрубок выхода теплоносителя пароперегревателя и патрубков входа теплоносителя испарителя камеры соединены сваркой и объединяют оба корпуса секции. Штампованные полуторовые днища устанавливаются после сборки трубного пучка и соединяют цилиндрические корпуса.

Для более равномерного распределения теплоносителя по периметру трубного пучка ось камер теплоносителя смещена относительно оси цилиндрических корпусов в сторону патрубка, а вокруг трубных пучков в камере установлены перфорированные обечайки с профилированными отверстиями. Эти меры снижают скорость теплоносителя на входе в трубный пучок и, соответственно, вибрацию труб от набегающего потока. В пароперегревателе на входе теплоносителя установлены две коаксиальных перфорированных обечайки, в которых для предотвращения прямого воздействия струй теплоносителя на трубы, оси отверстий смещены в горизонтальной плоскости. В корпусах установлены дистанционирующие решетки, выполненные фрезерованием пазов на диске-заготовке для образования планок, разделяющих трубы в горизонтальной плоскости. Пазы фрезеруются с обеих плоскостей диска на глубину более половины его толщины. В плане пазы перекрещиваются под углом 60° и образуют ромбическую решетку, в которой планки соединены в каждом месте перекрещивания. Такие решетки обеспечивают точное и жесткое крепление теплообменных труб в горизонтальной плоскости и свободу взаимных перемещений в вертикальном направлении. Две решетки, помещенные одна над другой, образуют шестигранные ячейки, которые создают дополнительную фиксацию труб в горизонтальной плоскости. Эти решетки установлены на участках входа теплоносителя в корпусах пароперегревателя и испарителя. На участкахгиба труб в днищах дистанционирование выполнено плоскими пластинами, которые дистанционируют трубы в горизонтальном направлении, и обеспечивают возможность термических перемещений гибов труб в вертикальном направлении.

Для предотвращения перетечек свинец-висмутowego теплоносителя, помимо трубного пучка и уменьшения его объема, по высоте цилиндрических корпусов установлены вытеснители. На вертикальных участках корпусов вытеснители повторяют наружную конфигурацию трубного пучка. Для снижения воздействия потока на трубный пучок пароперегревателя

часть потока, минуя пучок, поступает через периферийные отверстия в корпусных вытеснителях. Для предохранения трубной доски от термокачек и термоударов теплоносителя в верхней части камер под трубными досками установлены вытеснители, выполненные из двух дисков. Эти вытеснители создают застойные зоны жидкого металла, которые термостатируют трубные доски, благодаря чему температура трубных досок по их толщине соответствует температуре сред, проходящих по теплообменным трубам. Из полости, образованной дисками вытеснителя, теплоноситель отводится в воздушники камер. В случае межконтурной неплотности пар выводится из парогенератора через воздушник, удаляясь затем из контура циркуляции и из объема эвтектики.

Парогенераторы реакторной установки БРЕСТ-ОД-300

В настоящее время в Российской Федерации ведется строительство АЭС с реактором БРЕСТ-ОД-300 на площадке АО «Сибирский химический комбинат» (СХК) в г. Северск Томской области. Проект призван продемонстрировать возможность создания реактора на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем, а также новую технологию по замыканию ядерного топливного цикла на базе смешанного нитридного уран-плутониевого топлива. В дальнейшем планируется создание коммерческого энергоблока БР-1200 на основе опыта создания и эксплуатации данного реактора.

В проекте установки БРЕСТ-ОД-300 [3] применено восемь парогенераторов. Каждый из них входит в состав одной из четырех петель теплообмена реактора БРЕСТ-ОД-300 (рис. 4). В состав каждой петли теплообмена входит два парогенератора.

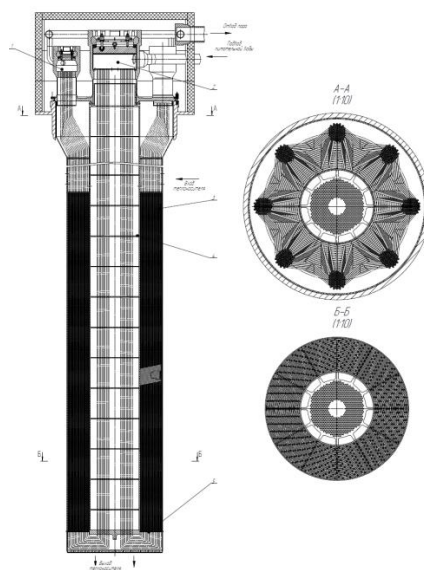


Рис. 4. Конструктивная схема прямоточного парогенератора реакторной установки БРЕСТ-ОД-300:

*1 – камера перегретого пара; 2 – камера питательной воды; 3 – труба теплообменная;
4 – решетка дистанционирующая; 5 – решетка выходная*

Fig. 4. Structural diagram of the direct-flow steam generator of the BREST-OD-300 reactor plant:

*1 – superheated steam chamber; 2 – feedwater chamber; 3 – heat exchange pipe;
4 – spacer grid; 5 – outlet grid*

Компоновка реактора БРЕСТ-ОД-300 включает в себя наличие специальных модулей, в которые объединены различные виды оборудования. При этом каждый модуль имеет поперечные связи с соседними модулями, что за счет перетоков теплоносителя позволяет компенсировать теплоотвод по элементам реакторной установки в аварийных режимах. Парогенераторы

нератор реакторной установки БРЕСТ-ОД-300 – это вертикальный прямоточный змеевиковый теплообменник с относительно малым углом навивки. В межтрубном пространстве находится греющий теплоноситель – жидкий свинец. В трубном пространстве циркулирует питательная вода, переходящая в результате нагрева в пар за критических параметров, который поступает на турбоустановку. Для обеспечения безопасной и непрерывной работы реакторной установки в случае течи предусмотрено наличие секционирования теплообменной поверхности.

На элементы любого оборудования с ТЖМТ действуют повышенные вибрационные нагрузки в связи с большой плотностью теплоносителя, поэтому имеется необходимость в фиксации этих элементов. В парогенераторе БРЕСТ-ОД-300 для этих целей выполнена фиксация теплообменных трубок за счет использования дистанционирующих решеток.

Преимуществом змеевикового типа парогенератора являются наличие самокомпенсации температурных расширений конструкционных материалов, а также компактность теплообменника из-за развитой теплообменной поверхности. В табл. 4 показаны характеристики парогенератора реакторной установки БРЕСТ-ОД-300 [3].

Таблица 4.
Характеристики парогенератора реакторной установки БРЕСТ-ОД-300

Table 4.
Characteristics of the steam generator of the BREST-OD-300 reactor plant

Характеристика	Значение
Тепловая мощность, МВт	175
Паропроизводительность, кг/с	52
Давление пара, МПа	17,0
Температура рабочего тела, °С	
- перегретого пара	505
- питательной воды	340
Температура свинцового теплоносителя, °С	
- на входе в парогенератор	535
- на выходе из парогенератора, около	420

Развитая теплообменная поверхность вдоль вертикальной оси может спровоцировать следующий аварийный сценарий. В результате течи воды в толще свинца происходит резкое вскипание и образование пузырьков пара. Из-за резкого увеличения объема пузырька на конструкции парогенератора действуют ударные нагрузки, при этом на пузырьки пара действует выталкивающая сила, заставляющая их разгоняться. Чем ниже свободного уровня свинца происходит течь, тем выше будет конечная скорость пара на выходе из толщи свинца. Резкое всплытие пузырьков пара может повлечь за собой резкий удар по верхним конструкциям реакторной установки. При этом дистанционирующие решетки теплообменных труб могут разбивать образующиеся паровые пузыри на более мелкие, что уменьшает потенциальную ударную нагрузку. Возможным решением данной проблемы может стать изменение конструкции парогенератора и развитие теплообменной поверхности вдоль горизонтальной оси, что снизит высоту всплытия потенциально образующихся при течи пузырьков пара. На данный момент подробно изучен вопрос возможного волнообразного разрушения теплообменных трубок в результате течи парогенератора. Показано, что волнообразного разрушения трубок парогенератора в результате течи не происходит [4].

На данный момент проведены экспериментальные исследования на 18-трубной модели на стенде «СПРУТ» ГНЦ РФ ФЭИ в обоснование проектных характеристик парогенератора БРЕСТ-ОД-300 [5]: исследованы различные переходные режимы циркуляции, показаны пульсации расхода воды на входе в имитатор парогенератора, изменение коэффициента теплопередачи от времени работы парогенератора, а также распределения температур теплооб-

менных трубок. В НГТУ были проведены исследования теплообмена на стенде ФТ-2Б для модели парогенератора БРЕСТ-ОД-300 в виде коридорного пучка труб [6]. Показаны распределения температур теплообменных трубок, поля скоростей свинца в межтрубном зазоре, зависимости числа Нуссельта от числа Пекле при различных кислородных режимах теплоносителя. В НГТУ также проведены работы по исследованию износостойкости защитных оксидных покрытий стали при большой течи парогенератора [7]. Установлено, что вблизи места течи происходит разрушение оксидных покрытий.

Конструктивные схемы теплообменников для экспериментальных стендов

При работе экспериментальных стендов с ТЖМТ (свинец или свинец-висмут), включающих различные источники тепла (циркуляционные насосы, участки с прямым токовым нагревом и др.), вносимая оборудованием тепловая энергия превышает тепловые потери с поверхности циркуляционного контура в окружающую среду, что создает необходимость в создании специальных теплообменников, отводящих тепло от тяжелого жидкометаллического теплоносителя. Такие теплообменники могут иметь различную конструкцию, однако усложнение поверхности теплообмена (оребрения, змеевики и др.) ведет к удорожанию конструкции. При этом важной проблемой является выбор теплоносителя и сам способ отвода энергии контуром отвода тепла. Для экспериментальных стендов, задачами создания которых не является исследование теплообмена в парогенераторах, нецелесообразно создание полноценного водяного контура отвода тепла. Также нет необходимости в создании сложных систем отвода тепла с развитыми поверхностями теплообмена и введением дополнительного оборудования, если в этом нет необходимости.

При атмосферном давлении и при стандартных температурах ТЖМТ водяной теплоноситель достаточно быстро догревается до температуры насыщения и переходит в паровую фазу, что сопровождается большим значением отводимой тепловой мощности, и, следовательно, риском переохлаждения ТЖМТ до температуры кристаллизации и самой кристаллизации ТЖМТ на теплообменных поверхностях, что недопустимо. Для предотвращения кипения водяного теплоносителя необходимо повышенное давление в водяном контуре, что требует увеличения толщин стенок теплообменника из-за увеличивающихся нагрузок. Возможным решением по отводу тепла от ТЖМТ и исключением возможности его кристаллизации может быть создание воздушного теплообменника, однако из-за низкой теплоемкости воздуха и малой эффективности теплообмена требуется применение мощных воздуходувок и увеличение поверхности теплообмена, что также сопровождается усложнением конструкции стенда. Сотрудниками НГТУ предложен отвод тепла от контура ТЖМТ водо-воздушной смесью, работающей при давлении, близком к атмосферному. Суть данного метода заключается во введении в воздушный поток, циркуляция которого осуществляется компрессором, капель воды достаточно малого размера. Разбиение струи воды на капли осуществляется с помощью специального устройства (форсунки). Конструкция теплообменника представлена на рис. 5.

Теплообменная поверхность представляет собой четыре трубки Фильда, обтекаемые потоком ТМЖТ и дистанционированные с помощью решеток. Внутри трубок Фильда осуществляется движение водо-воздушной смеси. При этом теплообменник оснащен системой регулирования расхода воды, воздуха, а также системой измерения температур. Тонкая настройка расхода воды с помощью игольчатого клапана позволяет производить регулирование мощности отвода тепла с требуемой точностью. В режиме нормальной эксплуатации в теплообменнике поддерживается свободный уровень теплоносителя. Теплообменник является разборным для осуществления ревизии стенда. Верхняя крышка уплотняется с ответным фланцем с помощью паронитовой прокладки и прижимается за счет болтовых соединений, а теплообменные трубки герметично приварены к крышке.

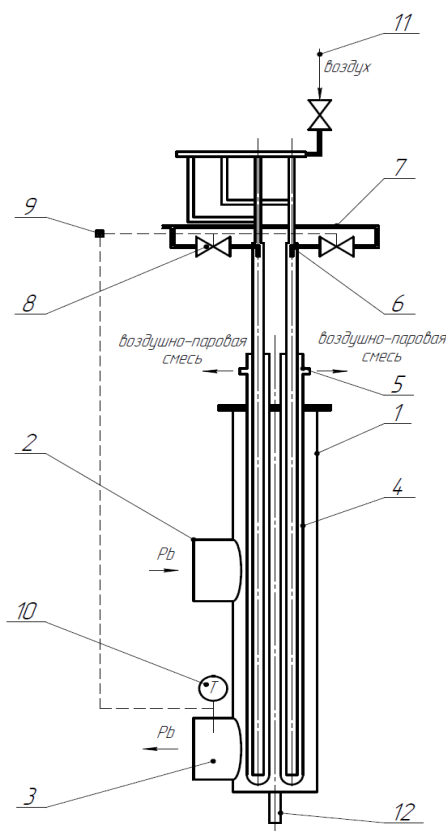


Рис. 5. Охладитель расплава жидкометаллического теплоносителя:

1 – корпус; 2 – патрубок подвода; 3 – патрубок отвода; 4 – теплообменная поверхность; 5 – выходной патрубок; 6 – устройство ввода капель; 7 – линия подвода; 8 – регулятор расхода воды; 9 – задатчик температуры; 10 – термонара; 11 – подвод воздуха от компрессора

Fig. 5. Cooler of liquid metal coolant melt:

1 – frame; 2 – supply pipe; 3 – branch pipe; 4 – heat exchange surface; 5 – outlet pipe; 6 – drip injector; 7 – supply line; 8 – water flow regulator; 9 – temperature setter; 10 – thermocouple; 11 – air supply from the compressor

К достоинствам данной конструкции и самого способа отвода тепла можно отнести: малое давление контура отвода тепла, что исключает необходимость в применении толстостенных труб; простота конструкции; отсутствие кристаллизации ТЖМТ на поверхностях теплообмена; простота регулирования отводимой мощности, а к ее недостаткам можно отнести накопление отложений со стороны паровоздушной смеси, ухудшающее теплоотдачу. Максимальная отводимая мощность данного теплообменника в ходе экспериментов составила 50 кВт, его работоспособность и эффективность обоснована многолетним опытом работы стенда ФТ-4 НГТУ, в состав которого входит данный теплообменник (стенд испытаний макетов проточной части главного циркуляционного насоса БРЕСТ-ОД-300).

Концептуально данная конструкция и способ отвода тепла могут стать основой для проектирования аварийных систем расхолаживания реакторных установок с ТЖМТ. Подача воды с малым расходом в теплообменник расхолаживания значительно увеличивает мощность отвода тепла, что позволяет уменьшить площадь теплообменной поверхности и снизить металлоемкость.

Заключение

В статье рассмотрена эволюция конструкций парогенераторов с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями для судовых и стационарных ядерных паропроизводящих установок. Показаны технические характеристики данных теплообменников.

Коллективом НГТУ им. Р.Е. Алексеева предложена и испытана конструкция теплообменника для исследовательских стендов, с помощью которого отводится тепло от контура со свинцовым теплоносителем. Данный теплообменник работает при атмосферном давлении, обеспечивает отсутствие кристаллизации жидкого металла на поверхностях теплообмена, а также обеспечивает относительную простоту эксплуатации. Конструкция обладает относительно низкой металлоемкостью и проста в изготовлении. Опыт создания парогенераторов и теплообменников с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем может быть полезен для конструкторов новых реакторных установок IV поколения, активные зоны которых охлаждаются свинцовым или свинец-висмутовым теплоносителем.

Результаты работы получены в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема № FSWE-2024-0005 «Особенности и специфика применения тяжелых жидкометаллических теплоносителей в реакторных установках на быстрых нейтронах»).

Библиографический список

1. **Адамов, Е.** Значение новой технологической платформы для ядерной энергетики России / Е. Адамов, А. Каширский // Энергетическая политика. – 2024. – № 6(197). – С. 10-17.
2. **Безносков, А.В.** Технологии и основное оборудование контуров реакторных установок, промышленных и исследовательских стендов со свинцовым и свинец-висмутовым теплоносителями / А.В. Безносков, Т.А. Бокова, П.А. Боков. – Н. Новгород: Литера, 2016. – 487 с.
3. Белая книга ядерной энергетики. Замкнутый ЯТЦ с быстрыми реакторами / под общ. ред. проф. Е.О. Адамова. – М.: Изд-во АО «НИКИЭТ», 2020. – 502 с.
4. **Абрамов, А.В.** Исследование процессов в свинцовом теплоносителе при нарушении целостности теплообменной трубы парогенератора БРЕСТ-ОД-300 / А.В. Абрамов, Е.О. Ковалев, П.А. Колесников [и др.] // Атомная энергия. – 2015. – Т. 119, № 3. – С. 164-168.
5. **Грабежная, В.А.** Экспериментальное обоснование проектных характеристик парогенератора РУ БРЕСТ-ОД-300 / В.А. Грабежная, А.С. Михеев, А.В. Алехин [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2021. – № 2. – С. 218-235.
6. **Безносков, А.В.** Теплогидравлические характеристики потока тяжелого жидкометаллического теплоносителя при поперечном обтекании пучка труб применительно к РУ С ТЖМТ / А.В. Безносков, М.В. Ярмонов, О.О. Новожилова [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2013. – № 5(102). – С. 213-225.
7. **Волков, Н.С.** Влияние параметров истечения водяного пара на эрозионный износ оксидных покрытий трубной решетки в среде свинцового теплоносителя / Н.С. Волков, Т.А. Бокова, А.Г. Мелузов, Т.К. Зырянова, Р.В. Сумин, М.Д. Погорелов, С.Е. Шашков // Трение и износ. 2024. – Т. 45. № 6. – С. 541-547.

References

1. Adamov E.O. and Kashirskii A. 2024. “Znachenie novoi tekhnologicheskoi platformy dlia iadernoi energetiki Rossii” [The Significance of a New Technological Platform for Russia's Nuclear Energy]. *Energeticheskaya politika* [Energy Policy], no. 6 (197): 10-17.
2. Beznosov A.V., Bokova T.A. and Bokov P.A. 2016. *Tekhnologii i osnovnoe oborudovanie konturov reaktornykh ustanovok, promyshlennykh i issledovatel'skikh stendov so svintsovym i svinets-vismutovym teponositeliami* [Technologies and Main Equipment for Circuits of Reactor Plants, Industrial and Research Facilities with Lead and Lead-Bismuth Coolants]. Nizhnii Novgorod: Litera.
3. Adamov E.O., ed. 2020. *Belaia kniga iadernoi energetiki. Zamknutyi IaTs s bystryimi reaktorami* [White Paper of Nuclear Energy. Closed Nuclear Fuel Cycle with Fast Reactors]. Moscow: NIKIET.
4. Abramov A.V., Kovalev E.O., Kolesnikov P.A. [et al.]. 2015. “Issledovanie protsessov v svintsovom teponositele pri narushenii tselostnosti teploobmennoi truby parogeneratora BREST-OD-300” [Investigation of Processes in Lead Coolant During Heat-Exchange Tube Failure in the BREST-OD-300 Steam Generator]. *Atomnaya Energiia* [Atomic Energy] 119 (3): 164-168.
5. Grabezhnaya V.A., Mikheev A.S., Alekhin A.V. [et al.]. 2021. “Eksperimental'noe obosnovanie proektnykh kharakteristik parogeneratora RU BREST-OD-300” [Experimental Validation of Design Characteristics for the BREST-OD-300 Reactor Unit Steam Generator]. *Voprosy Atomnoi Nauki i*

Tekhniki. Seriya: Iaderno-Reaktornye Konstanty [Problems of Atomic Science and Technology. Series: Nuclear and Reactor Constants], no. 2: 218-235.

6. Beznosov A.V., Yarmonov M.V., Novozhilova O.O. [et al.]. 2013. “Teplogidravlicheskie kharakteristiki potoka tiazhelogo zhidkometallichesкого teplonositel'ia pri poperechnom obtekanii puchka trub primenitel'no k RU S TZhMT” [Thermal-Hydraulic Characteristics of Heavy Liquid Metal Coolant Flow During Cross-Flow Around a Tube Bundle Applied to Reactor Plants with HLHC]. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva* [Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev], no. 5 (102): 213-225.
7. Volkov N.S., Bokova T.A., Meluzov A.G., Zyryanova T.K., Sumin R.V., Pogorelov M.D., and Shashkov S.E. 2024. “Vliianie parametrov istecheniia vodianogo para na erozionnyi iznos oksidnykh pokrytii trubnoi reshetki v srede svintsovogo teplonositel'ia” [Influence of Water Steam Discharge Parameters on Erosive Wear of Oxide Coatings of Tube Sheet in Lead Coolant Environment]. *Trenie i Iznos* [Journal of Friction and Wear] 45 (6): 541-547.

**Дата поступления
в редакцию: 24.06.2025**

**Дата принятия
к публикации: 27.09.2025**