



DOI: 10.18721/JEST.230306

УДК 621.311.25

В.В. Легкоступова, А.В. Судаков

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация

МОДЕРНИЗАЦИЯ СЕПАРАТОРОВ-ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГОБЛОКОВ АЭС С РЕАКТОРАМИ ВВЭР

Надежная работа сепараторов-пароперегревателей (СПП) — один из факторов, определяющих надежность влажнопаровых турбин в целом. На основе анализа существующих конструкций и опыта эксплуатации отечественных и зарубежных СПП были выявлены основные недостатки конструкций СПП. Предложены рекомендации по модернизации существующих и созданию перспективных конструкций СПП. В статье предлагается проект модернизации конструкций СПП-220М и СПП-1000, эксплуатируемых на действующих энергоблоках АЭС соответственно с реакторами ВВЭР-440 и ВВЭР-1000. Отличительной особенностью предлагаемого проекта является то, что он может быть реализован в «старом» или новом корпусе, который идентичен исходному. Для обоснования проекта проведены теплогидравлические расчеты и сравнение технических характеристик конструкций до и после модернизации. Подтверждением эффективности и целесообразности предлагаемого проекта также служит положительный опыт модернизации СПП на финской АЭС Ловииса, выполненной немецкой фирмой Balcke Durr. Основные положения по модернизации идентичны предлагаемому проекту.

СЕПАРАТОР-ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЬ (СПП); ТУРБОУСТАНОВКА; ВОДО-ВОДЯНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ РЕАКТОР (ВВЭР); АТОМНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СТАНЦИЯ (АЭС); МОДЕРНИЗАЦИЯ.

Ссылка при цитировании:

В.В. Легкоступова, А.В. Судаков. Модернизация сепараторов-пароперегревателей энергоблоков АЭС с реакторами ВВЭР // *Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки*. 2017. Т. 23. № 3. С. 61–73. DOI: 10.18721/JEST.230306

V.V. Legkostupova, A.V. Sudakov

Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, Saint-Peterburg, Russian Federation

MODERNIZATION OF MOISTURE SEPARATOR REHEATERS IN NUCLEAR POWER UNITS WITH VVER REACTORS

One of the factors responsible for the reliable operation of wet steam turbines is the safe operation of the moisture separator steam reheaters (MSR). Based on the analysis of existing designs and operational experience of domestic and foreign MSRs, the main disadvantages of MSR constructions were identified. Recommendations on modernizing the existing models and creating advanced MSR constructions are proposed. The project of the modernized constructions SPP-220M and SPP-1000, used at operating NPP units with the VVER-440 and VVER-1000 reactors, is presented. A distinctive feature of the proposed project is that it can be implemented in the «old» or new case, which is identical to the original. Thermal-hydraulic calculations and the comparison of technical characteristics of constructions before and after the upgrade were carried out to justify the project. The positive experience of MSR modernization in the Loviisa NPP (Finland) also confirms the effectiveness and feasibility of the proposed modernization project. MSR modernization was made by the German firm Balcke Durr. The main provisions of the modernization are identical to the proposed project.

MOISTURE SEPARATOR-STEAM REHEATERS (MSR); TURBINE; WATER-WATER ENERGETIC REACTOR (VVER); NUCLEAR POWER PLANT (NPP); MODERNIZATION.

Citation:

V.V. Legkostupova, A.V. Sudakov, Modernization of moisture separator reheaters in nuclear power units with VVER reactors, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering sciences and technology*, 23 (03) (2017) 61–73, DOI: 10.18721/JEST.230306

Введение

В настоящее время на атомных электрических станциях (АЭС) в мире эксплуатируется 23 энергоблока с реакторами ВВЭР-440 и 36 энергоблоков с реакторами ВВЭР-1000. На турбинах этих энергоблоков используются сепараторы-пароперегреватели СПП-220М и СПП-1000, предназначенные для сепарации и перегрева влажного пара, поступающего из цилиндра высокого давления (ЦВД), с целью предотвращения повышенного эрозионного износа цилиндра низкого давления (ЦНД).

СПП-220М и СПП-1000 (рис.1) разрабатывались и изготавливались Подольским машиностроительным заводом (ЗиО) в 1970–80-х годах [1–3]. Конструкция аппаратов унифицирована. Основное ее достоинство — модульность: сепараторы набираются из унифицированных сепарационных блоков, пароперегреватель — из унифицированных пароперегревательных мо-

дулей. Это позволяет при необходимости заглушать отдельные модули без остановки турбины.

Но у такой конструкции есть и недостатки: боковой подвод греющего пара, что приводит к неравномерному распределению пара по блокам, перегрузке блоков, расположенных под входным патрубком и за выходным патрубком; итогом всего перечисленного становится неэффективная сепарация пара;

расположение сепаратора над пароперегревателем, из-за чего при неэффективной сепарации пара и проносе влаги в пароперегреватель происходят термоусталостные повреждения и коррозионное растрескивание труб разводки греющего пара и труб поверхности нагрева.

В настоящей статье предлагается проект модернизации конструкций СПП-220М и СПП-1000. Принципиальные конструкции СПП-220М и СПП-1000 идентичны, отличаются только геометрическими размерами, поэтому

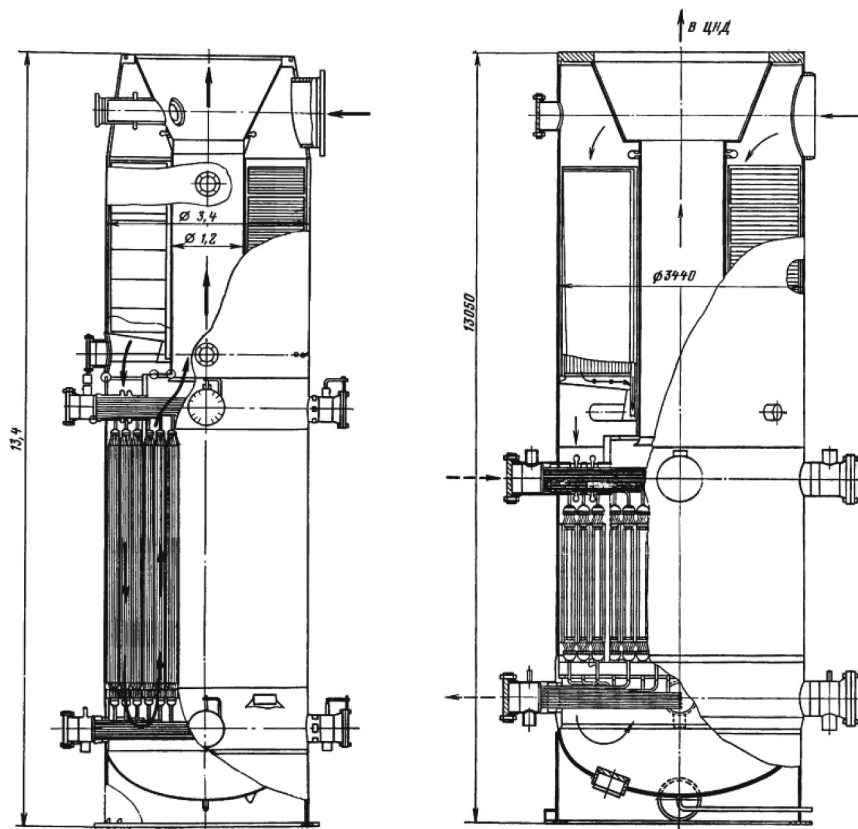


Рис. 1. Конструкции сепараторов-пароперегревателей:
а — СПП-220М; б — СПП-1000

Fig. 1. Design of moisture separator-reheaters:
а — SPP-220M; б — SPP-1000

проекты модернизированных конструкций аналогичны. Цель работы — достичь проектных параметров пара после СПП и увеличить надежность самого СПП.

Рекомендации по созданию перспективных конструкций СПП

В результате анализа существующих конструкций и опыта эксплуатации отечественных и зарубежных СПП сделан вывод об основных конструкционных недостатках, оказывающих значительное влияние на эффективную и надежную работу как СПП, так и турбины в целом [4]. К ним относятся:

- расположение сепаратора над поверхностью нагрева;

- боковой ввод влажного пара;

- несимметричная работа аппаратов и отдельных элементов;

- неравномерное распределение потоков пара как по скорости, так и по влажности как на входе в сепаратор, так и на входе в пароперегреватель;

- недостаточная эффективность сепараторов, приводящая к повреждениям (не только эрозийным, но и коррозионным и усталостным) элементов пароперегревателя и корпуса аппарата;

- непродуманная система слива сепарата, приводящая к захвату отсепарированным паром капель сепарата, образованию обратных токов сепарата;

- вибрация, прогиб и большие температурные разности в пароперегревательных трубках (особенно при горизонтальном расположении аппарата);

- недостаточная жесткость некоторых элементов СПП, приводящая к деформации и повреждению оборудования;

- образование трещин в элементах из нержавеющей стали под действием радиолитического кислорода пара одноконтурной АЭС.

С учетом отмеченного были разработаны рекомендации по созданию новых, перспективных конструкций СПП. Предложены:

- компоновка СПП с размещением сепаратора под пароперегревателем или сбоку от него;

- переход на применение трубных пучков с поперечным обтеканием труб паром и использованием труб с поперечным ребрением; при этом сохраняется кассетный способ компоновки трубного пучка [5];

- совершенствование входных камер с установкой устройств предсепарации влаги и специальных устройств (перфорированные листы или перегородки) для равномерного распределения подачи влажного пара на сепарационные блоки [6];

- установка предсепараторов перед СПП на ресиверах за ЦВД;

- переход к созданию системы пароперегрева, в которой вместо четырех СПП на турбоустановку будет два СПП (хотя данная рекомендация потребует произвести существенные изменения при компоновке турбоустановки в машинном зале);

- применение отдельных СПП — отдельно сепаратора и пароперегревателя;

- проектирование систем слива сепарата закрытого типа, предотвращающих возможность захвата отсепарированным паром капель сепарата, дальнейшего проноса его в пароперегреватель и образования возвратных токов;

- жесткое крепление элементов сепарационной части к корпусу аппарата;

- крепление труб в кассеты для пароперегревателя с учетом изменения температур по высоте труб (например, трубы в верхней и нижней трубных досках закрепляются вальцовкой с последующей обваркой; трубные доски закрываются сверху верхней и нижней крышками; в верхней камере кассеты устанавливается пароприемный дырчатый лист для гашения динамического напора поступающего в камеру пара; трубный пучок в кассете ограничен боковыми стенками, которые крепятся к верхней и нижней трубным доскам; по длине кассеты имеются дистанционирующие планки, крепящиеся к боковым стенкам);

- шайбование труб подвода греющего пара пароперегревателя.

Перечисленные принципы были реализованы в конструкции СПП для АЭС-2006 ОАО «НПО ЦКТИ имени И.И. Ползунова», описание и характеристики которой представлены в работе [7].

Описание модернизированных конструкций СПП-220М и СПП-1000

В настоящей статье предлагается проект модернизации конструкций СПП-220М и СПП-1000. Поскольку конструкции аппаратов унифицированы и отличаются только геометрическими размерами, модернизированные конструкции также аналогичны.

Основная особенность проекта в том, что он может быть реализован в новом корпусе, идентичном исходному. Это позволяет установить новые аппараты на старые фундаменты и сохранить существующую трассировку трубопроводов влажного и перегретого пара. Поэтому проект конструкции СПП может быть реализован с использованием как «старых» корпусов, так и в новом корпусе, идентичном исходному. Принципиально СПП состоит из сепаратора, расположенного в верхней части аппарата, и пароперегревателя, находящегося под ним. Общий вид СПП представлен на рис. 2*.

Сепарационная часть выполнена аналогично модернизированной сепарационной части СПП-500–1 [8]. Влажный пар поступает в СПП через входной патрубок сбоку в верхней части корпуса СПП и попадает во входную камеру. Из входной камеры пар поступает в кольцевой зазор между корпусом и сепарационными блоками (раздающий коллектор сепаратора). Шесть сепарационных блоков установлены в виде правильного шестигранника; они представляют собой параллелепипеды. Геометрические размеры сепарационных блоков: для СПП-220М — 1330 × 1268 × 270 мм; для СПП-1000 — 1330 × 2600 × 270 мм.

Каждый сепарационный блок содержит входной дырчатый лист, пакет жалюзийных элементов Powervanes фирмы Valcke Durr (на которых и осуществляется сепарация пара), выходной дырчатый лист и открытый коллектор для сбора отсепарированной влаги. Входные дырчатые листы имеют переменную степень перфорации для достижения равномерного распределения пара по сепарационным блокам и по поверхности сепарационного блока.

* См. диссертации:

Денисов К.Н. Расчетно-экспериментальное обоснование параметров и конструкции [Calculation-experimental substantiation of parameters and structure of MSR for the perspective units of NPP with VVER]: Дисс. ... канд. техн. наук, 05.14.03 / ОАО «НПО ЦКТИ им. И.И. Ползунова». Санкт-Петербург, 2015;

Егоров М.Ю. Разработка рекомендаций по повышению эффективности теплогидравлических процессов в сепараторах-пароперегревателях турбин АЭС на основе изучения опыта эксплуатации [Development of recommendation on increasing the efficiency of studying of operating experience]: Дисс. ... канд. техн. наук / СПбПУ. СПб., 2015.

Под сепарационными блоками расположен коллектор сбора сепарата, к которому подсоединяются патрубки отвода сепарата из корпуса СПП. Также имеется система патрубков и труб для отвода сепарата, сконденсировавшегося на нижнем перекрытии и стенах входной камеры (где для увеличения эффективности сепарации установлен дырчатый лист специальной конструкции), и сепарата, осевшего на полу раздающего коллектора. Пройдя сепарационные блоки, осушенный пар поступает в кольцевой зазор между ними и обечайкой вакуумной защиты трубопровода отвода перегретого пара. Далее осушенный пар следует в раздающий коллектор пароперегревателя.

В пароперегревателе сохранен кассетный принцип, что позволяет при необходимости отключить поврежденные кассеты без остановки турбины. Кассеты пароперегревателя выполнены в виде прямоугольных параллелепипедов, что позволяет получить компактную поверхность нагрева почти без промежутков между кассетами. Кассеты первой и второй ступеней пароперегревателя сгруппированы по 2 блока. По ширине каждого блока располагается 10 кассет, по глубине — 4. В первые два ряда кассет по ходу пара подается греющий пар первой ступени, во вторые два ряда — второй ступени. Кассеты обеих ступеней пароперегревателя содержат по 70 труб. Материал труб первого ряда кассет первой ступени — коррозионностойкая сталь 439 (08X17T). Остальные трубы пароперегревателя сделаны из стали 20 (20 K).

В кассетах пароперегревателя используются трубы, имеющие на поверхности теплообмена винтовое поперечное оребрение. Оребренная труба имеет следующие размеры: диаметр у основания ребер — 16,25 мм; диаметр гладких концов труб — 19 × 1,65 мм; высота ребер — 1,4 мм; толщина — 0,3 мм; шаг оребрения — 0,98 мм; коэффициент оребрения — 3,9. Трубы в кассете скомпонованы в шахматном порядке (по сторонам равностороннего треугольника) в 7 рядов (по 10 труб в ряду). Шаги труб S_1 и S_2 равны соответственно 22,8 и 19,7 мм. Масса труб в кассете равна примерно 241 кг.

Пространство между блоками кассет первой ступени пароперегревателя и корпусом СПП

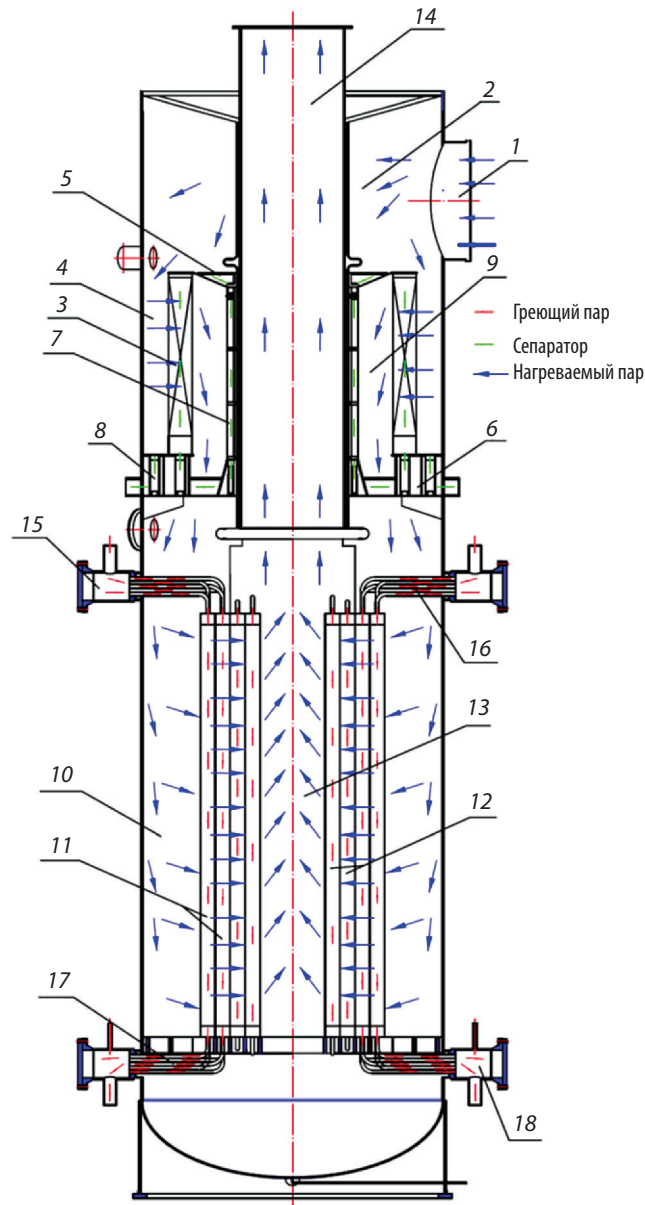


Рис. 2. Общий вид модернизированной конструкции СПП:

1 — входной патрубок; 2 — входная камера; 3 — сепарационные блоки; 4 — раздающий коллектор сепаратора; 5 — перекрытие входной камеры; 6 — коллектор сбора сепарата; 7 — трубы отвода сепарата с перекрытия входной камеры; 8 — трубы отвода сепарата с пола раздающего коллектора сепаратора; 9 — собирающий коллектор сепаратора; 10 — раздающий коллектор пароперегревателя; 11 — кассеты первой ступени пароперегревателя; 12 — кассеты второй ступени пароперегревателя; 13 — собирающий коллектор пароперегревателя; 14 — трубопровод выхода перегретого пара; 15 — раздающие камеры греющего пара; 16 — трубы подвода греющего пара к кассетам пароперегревателя; 17 — трубы отвода конденсата греющего пара; 18 — камеры сбора конденсата греющего пара

Fig. 2. General view of the upgraded design of MSR:

1 — inlet; 2 — camera input; 3 — separating blocks; 4 — distributing manifold of the separator; 5 — overlap of input camera; 6 — collector separators; 7 — drain pipe of the separator overlap with the inlet chamber; 8 — drain pipe separate from the floor of the distributing manifold of the separator; 9 — manifold separator; 10 — distributing manifold of the superheater; 11 — cassettes of the first stage superheater; 12 — cassette of the second stage reheater; 13 — manifold of the superheater; 14 — the pipeline output superheated steam; 15 — distributing chamber heating steam; 16 — pipe for supplying heating steam to the superheater magazines; 17 — pipe of the condensate heating steam; 18 — chamber of the condensate heating steam

служит раздающим коллектором (таким образом, в пароперегревателе имеется 2 раздающих коллектора). Пространство между блоками кассет второй ступени пароперегревателя образует собирающий коллектор. Перегретый пар после собирающего коллектора поступает в пространство над второй ступенью пароперегревателя и далее в выходной патрубков, соединяющийся с ресивером.

Результаты теплогидравлических расчетов

Для обоснования проектов были проведены теплогидравлические расчеты модернизированных конструкций [11]. Основные технические характеристики конструкций СПП-220М до и после модернизации представлены в табл. 1. В табл. 2 представлены основные технические характеристики конструкции СПП-1000 до и после модернизации.

Таблица 1

Основные теплогидравлические характеристики СПП-220М

Наименование	До модернизации	После модернизации
<i>Нагреваемый пар на входе в СПП</i>		
Расход, кг/с	136	486,5
Давление, МПа	0,304	0,3295
Температура, °С	136	136,1
Влажность на входе в СПП, %	13,0	13,0
<i>Греющий пар I-й ступени</i>		
Расход, кг/с	8,92	31,85
Давление, МПа	1,77	1,853
Температура, °С	206	208,6
Влажность на входе в ступень ПП, %	6,4	6,4
<i>Греющий пар II-й ступени</i>		
Расход, кг/с	7,50	25,6
Давление, МПа	4,22	4,227
Температура, °С	253	253,6
Влажность на входе в ступень ПП, %	0,5	0,5
Общая высота СПП, мм	13980	13980
Диаметр корпуса (внутренний), мм	3440	3440
Толщина стенки корпуса, мм	20	20
<i>Материал</i>		
Корпуса	Сталь 16ГС	Сталь 22К
Труб	Сталь 20	08Х17Т, Сталь 20
<i>Трубы пароперегревателя</i>		
Диаметр, мм	16 × 2	16,25 × 1,1
Длина, мм	4600	5050
Число, шт.	3478 / 3441	2800 / 2800
Количество кассет (модулей), шт.	94 / 93	40 / 40
Число труб в кассете, шт.	37	70
<i>Масса</i>		
Корпуса, т	22	22
Труб, т	22	19,3
Гидравлическое сопротивление СПП, Па	18100	13301
Суммарная потеря разделительного давления, %	5,95	3,95

Table 1

Basic thermal-hydraulic characteristics of SPP-220M

Name	Before modernization	After modernization
<i>Heated steam at the entrance to the MSR</i>		
Consumption, kg / s	136	486,5
Pressure, MPa	0,304	0,3295
Temperatur, °C	136	136,1
Humidity at the entrance, %	13,0	13,0
<i>Heating steam of the 1st stage</i>		
Consumption, kg / s	8,92	31,85
Pressure, MPa	1,77	1,853
Temperatur, °C	206	208,6
Moisture at the entrance to the stage, %	6,4	6,4
<i>Heating steam of the second stage</i>		
Consumption, kg / s	7,50	25,6
Pressure, MPa	4,22	4,227
Temperatur, °C	253	253,6
Moisture at the entrance to the stage, %	0,5	0,5
Total height of SPP, mm	13980	13980
Case diameter (inner), mm	3440	3440
Wall thickness, mm	20	20
<i>Material</i>		
Case	Steel 16GS	Steel 22K
Pipes	Steel 20	08X17T, Steel 20
<i>Steam reheaters pipes</i>		
Diameter, mm	16 × 2	16,25 × 1,1
Length, mm	4600	5050
Number, pcs.	3478 / 3441	2800 / 2800
Number of cassettes (modules), pcs.	94 / 93	40 / 40
Number of tubes in the cassette, pcs.	37	70
<i>Weight</i>		
Shells, t	22	22
Pipes, t	22	19,3
Hydraulic resistance of MSR, Pa	18100	13301
Total loss of separation pressure, %	5,95	3,95

Таблица 2

Основные теплогидравлические характеристики СПП-1000

Наименование	До модернизации	После модернизации
<i>Нагреваемый пар на входе в СПП</i>		
Расход, кг/с	328	337,36
Давление, МПа	1,15	1,149
Температура, °С	185	198
Влажность на входе в СПП, %	11,6	12,8
<i>Греющий пар I-й ступени</i>		
Расход, кг/с	13,7	13,574
Давление, МПа	2,6	2,812
Температура, °С	228	230,04
Влажность на входе в ступень ПП, %	0,9	0,9
<i>Греющий пар II-й ступени</i>		
Расход, кг/с	17,7	19,238
Давление, МПа	5,6	6,0
Температура, °С	272	274,3
Влажность на входе в ступень ПП, %	0,5	0,5
Общая высота СПП, мм	13350	13350
Диаметр корпуса (внутренний), мм	3440	3440
Толщина стенки корпуса, мм	20	20
<i>Материал</i>		
Корпуса	Сталь 22К	Сталь 22К
Труб	Сталь 20	08Х17Т, Сталь 20
<i>Трубы пароперегревателя</i>		
Диаметр, мм	16 × 2	16,25 × 1,1
Длина, мм	4600	5050
Число, шт.	2960 / 3959	2800 / 2800
Количество кассет (модулей), шт.	80 / 103	40 / 40
Число труб в кассете, шт.	37	70
<i>Масса</i>		
Корпусы, т	40	40
Трубы, т	22	19,3
Гидравлическое сопротивление СПП, Па	33400	21410
Суммарная потеря разделительного давления, %	2,9	1,864

Table 2

Basic thermal-hydraulic characteristics of SPP-1000

Name	Before modernization	After modernization
<i>Heated steam at the entrance to the MSR</i>		
Consumption, kg / s	328	337,36
Pressure, MPa	1,15	1,149
Temperatur, °C	185	198
Humidity at the entrance, %	11,6	12,8
<i>Heating steam of the 1st stage</i>		
Consumption, kg / s	13,7	13,574
Pressure, MPa	2,6	2,812
Temperatur, °C	228	230,04
Moisture at the entrance to the stage, %	0,9	0,9
<i>Heating steam of the second stage</i>		
Consumption, kg / s	17,7	19,238
Pressure, MPa	5,6	6,0
Temperatur, °C	272	274,3
Moisture at the entrance to the stage, %	0,5	0,5
Total height of SPP, mm	13350	13350
Case diameter (inner), mm	3440	3440
Wall thickness, mm	20	20
<i>Material:</i>		
Case	Steel 22K	Steel 22K
Pipes	Steel 20	08X17T, Steel 20
<i>Steam reheaters pipes</i>		
Diameter, mm	16 × 2	16,25 × 1,1
Length, mm	4600	5050
Number, pcs.	2960 / 3959	2800 / 2800
Number of cassettes (modules), pcs.	80 / 103	40 / 40
Number of tubes in the cassette, pcs.	37	70
<i>Weight</i>		
Shells, t	40	40
Pipes, t	22	19,3
Hydraulic resistance of MSR, Pa	33400	21410
Total loss of separation pressure, %	2,9	1,864

Модернизированная конструкция позволяет снизить массу аппарата на 12,27 %. При этом происходит существенное снижение гидравлического сопротивления: на 26,51 % для СПП-220М и на 35,9 % для СПП-1000.

Опыт модернизации СПП — 500—1 на АЭС с реакторами РБМК-1000 показал, что даже при расположении сепаратора над поверхностью нагрева есть возможность получить надежный и эффективный СПП [10–12]. Принципиально конструкции СПП-220М, СПП-500—1 и СПП-1000 имеют схожую схему движения пара. Отличие только в геометрических размерах

и конструктивном исполнении кассет пароперегревателя: пароперегреватель СПП-500—1 выполнен из гладких труб из стали 08Х18Н10Т, пароперегреватели СПП-220М и СПП-1000 — из оребренных труб из стали 20 [13].

Модернизация СПП АЭС Ловииса

В 2015 году немецкая фирма Balcke Durr начала работу по модернизации СПП на АЭС Ловииса (Финляндия), проект который предусматривает замену СПП на вариант модернизированной конструкции (рис. 3).

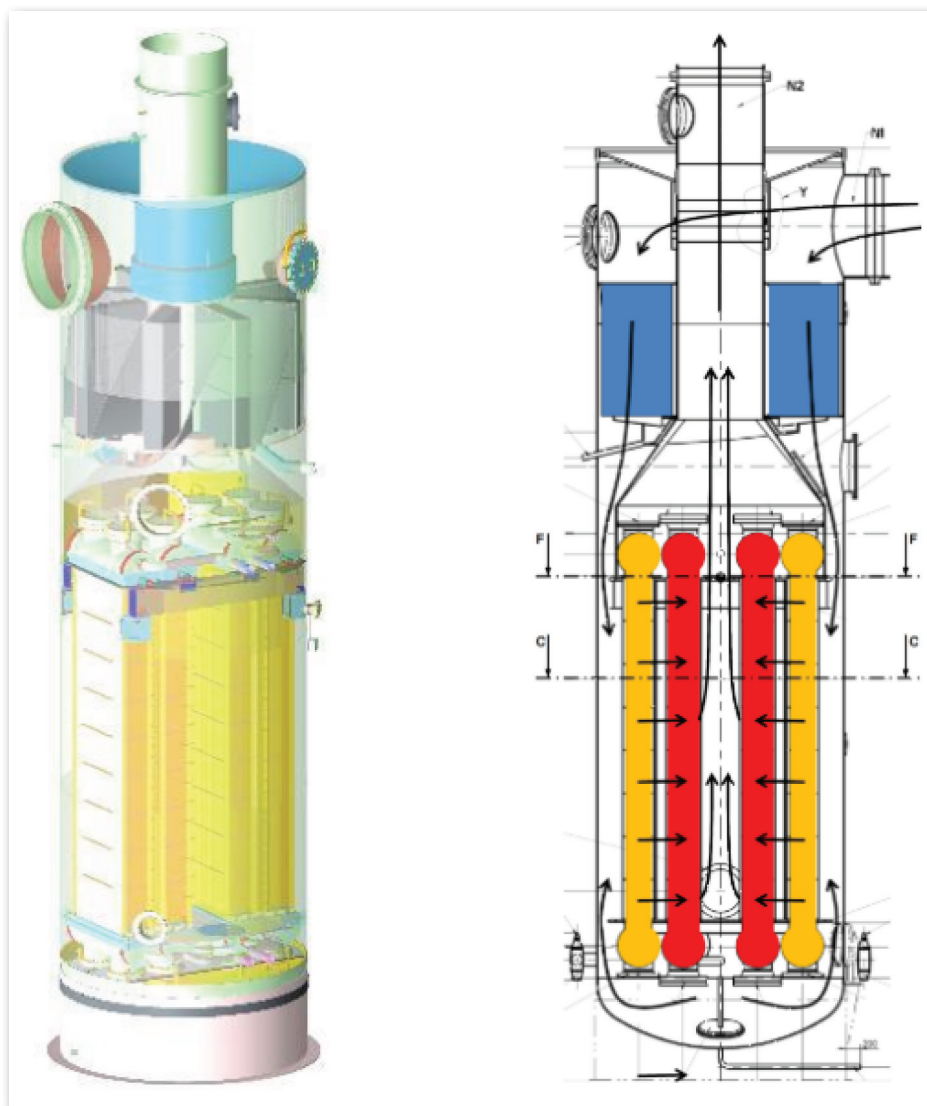


Рис. 3. СПП фирмы Balcke Durr для АЭС Ловииса

Fig. 3. MSR of the firm Balcke Durr for Loviisa NPP

Общие положения в проектах по модернизации следующие:

СПП выполняются в новом корпусе, идентичном исходному;

в сепараторе используются высокоэффективные пакеты жалюзийных элементов;

кассеты пароперегревателя имеют прямоугольное сечение и сгруппированы по два блока.

Основные различия между проектами — в компоновке сепарационных блоков и принципиальной конструкции кассет пароперегревателя.

Основные результаты модернизации СПП: остались неизменными внешние габариты СПП, присоединительные размеры и расположение присоединительных патрубков;

сохранилась существующая трассировка трубопроводов подвода влажного пара и отвода перегретого пара;

новый СПП рассчитан на тепловую мощность 1500 МВт, а также на эксплуатацию при увеличении мощности блока до 1600 МВт;

высокоэффективные сепарационные блоки обеспечивают остаточную влажность пара на уровне 0,3–0,5 %;

в пароперегревателе используются трубки с низким оребрением из эрозионностойких материалов (сталь 1.4510 (X3CrTi17) с высокой термостойкостью и устойчивостью к тепловому растрескиванию);

вес оборудования снижен на 17 т и составил 90 т.

На станцию новые СПП были доставлены уже готовыми к монтажу, что позволило осуще-

ствить монтаж двух СПП на каждом из энергоблоков соответственно за 14 и 17 дней. Уже произведен монтаж шести из восьми СПП. Монтаж последних двух СПП запланирован в период ремонтов ППР в 2017 году. Ожидается прирост мощности на 1,0–1,5 МВт.

Эксплуатация модернизированных конструкций СПП на АЭС Ловииса подтвердила целесообразность и эффективность модернизации конструкций СПП-220М и СПП-1000, предложенной авторами статьи.

Выводы

На базе анализа опыта эксплуатации и конструкций отечественных и зарубежных СПП были разработаны рекомендации по созданию новых перспективных конструкций СПП.

Предложен проект модернизации конструкций СПП-220М и СПП-1000, эксплуатируемых на действующих энергоблоках АЭС соответственно с реакторами ВВЭР-440 и ВВЭР-1000.

Целесообразность предлагаемого проекта по модернизации обоснована результатами теплогидравлических расчетов и сравнением технических характеристик конструкций до и после модернизации.

Подтверждением основных положений предлагаемой модернизации СПП является положительный опыт модернизации СПП АЭС Ловииса, выполненной фирмой Valcke Durr, основные принципы которой идентичны предлагаемым.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филиппов Г.А., Поваров О.А. Сепарация влаги в турбинах АЭС. М.: Энергия, 1980. 320 с.

2. Машиностроение. Энциклопедия. Турбинные установки. Т.IV-19 / В.А. Рассохин, Л.А. Хоменок, В.Б. Михайлов [и др.], под ред. Ю.С. Васильева. М.: Машиностроение, 2015. 1030 с.

3. Агеев А.Г., Карасев В.Б., Серов И.Т. [и др.]. Сепарационные устройства АЭС. М.: Энергоиздат, 1982. 169 с.

4. Судаков А.В., Легкоступова В.В. Сепараторы-пароперегреватели зарубежных фирм. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. 103 с.

5. Egorov M., Gotovsky M., Sudakov A., Fedorovich E. Heat transfer effectiveness in coiled type superheater of steam separator-reheater for turbines of nuclear power

plants // Proceedings of the Baltic Heat Transfer Conference. 2015. P. 195–200.

6. Готовский М.А., Егоров М.Ю., Федорович Е.Д. Использование закрученных потоков и вихревых течений теплоносителей в перспективных конструкциях промежуточных сепараторов-пароперегревателей турбин АЭС // Труды пятой международной конференции «Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках». Казань: Изд-во КНИТУ-КАИ, 2015. С. 63–74.

7. Судаков А.В., Силин В.В., Марнич А.М. Сепаратор-пароперегреватель для перспективных блоков АЭС с ВВЭР // Надежность и безопасность энергетики. 2011. № 1(12). С.66–70.

8. Судаков А.В., Легкоступова В.В. Модернизация сепараторов-пароперегревателей СПП-500–1 турбо-

установок Ленинградской АЭС // Теплоэнергетика. 2015. № 3. С. 16–21.

9. **Готовский М.А., Сулов В.А.** Теплообмен в технологических установках. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. 420 с.

10. **Готовский М.А., Фокин Б.С., Беленький М.Я. [и др.]**. Результаты испытаний модернизированных сепараторов-пароперегревателей турбоустановки К-500–65/3000 энергоблока № 4 Ленинградской АЭС // Теплоэнергетика. 2012. № 2. С. 27–32.

11. **Егоров М.Ю., Соколов К.В., Блинов М.А. [и др.]**. Результаты модернизации сепараторов-паропе-

регревателей турбоустановок на четвертом блоке Ленинградской АЭС // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2011. № 3 (130). С. 263–272.

12. **Гредасов П.О.** Модернизация сепараторов-пароперегревателей СПП-500–1 турбоустановок Ленинградской АЭС // Сборник тезисов докладов XII Международной молодежной научной конференции «Полярное сияние 2009». М.: Изд-во НИЯУ МИФИ, 2009. С. 30–34.

13. **Судаков А.В., Фокин Б.С.** Парогенераторы и теплообменное оборудование АЭС. СПб.: Изд-во НПО ЦКТИ, 2005. 254 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЛЕГКОСТУПОВА Вера Васильевна — аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. E-mail: faith89@yandex.ru

СУДАКОВ Александр Вениаминович — профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. E-mail: zamdir3@ckti.ru

REFERENCES

1. **Filippov G.A., Povarov O.A.** Separatsiya vlagi v turbinakh AES [Separation of moisture in the turbines of nuclear power plants]. Moscow: Energiya, 1980. 320 s. (rus.)

2. Mashinostroenie. Enciklopediya. Turbinnye ustanovki [Engineering. Encyclopedia. Turbine installations]. Vol. IV-19. Moscow: Mashinostroenie, 2015. 1030 s. (rus.)

3. **Ageev A.G., Karasev V.B., Serov I.T. [et. all.]**. Separacionnye ustrojstva AES / [The Separators of NPP] Moscow: Energoizdat, 1982. 169 s. (rus.)

4. **Sudakov A.V., Legkostupova V.V.** Separatory-paroperegrevateli zarubezhnykh firm [Moisture separator-reheaters of foreign firms]. SPb.: Publishing house of Polytechnical Institute. University press, 2015. 103 s. (rus.)

5. **Egorov M., Gotovskiy M., Sudakov A., Fedorovich E.** Heat transfer effectiveness in coiled type superheater of steam separator-reheater for turbines of nuclear power plants *Proceedings of the Baltic Heat Transfer Conference*, 2015. P. 195–200. (eng.)

6. **Gotovskiy M.A., Egorov M.Yu., Fedorovich E.D.** Ispolzovanie zakruchennykh potokov i vihrevuh techenij teplonositelej v perspektivnykh konstruiacijah promezhutocnykh separatorov-paroperegrevatelej turbin AES [The Use of swirling flows and vortex flow of the coolants in the perspective structures of the intermediate moisture separators-steam reheaters of NPP turbine]. Kazan: Kazan state technical University, 2015. P. 63–74. (rus.)

7. **Sudakov A.V., Silin V.V., Marnich A.M.** Separator-paroperegrevatel dlia perspektivnykh blokiv AES s VVER / [Moisture separator-reheater for the perspective units of NPP with VVER]. *Reliability and security of energy*. 2011. № 1(12). P. 66–70. (rus.)

8. **Sudakov A.V., Legkostupova V.V.** Modernizatsiya separatorov-paroperegrevateley SPP-500–1 turboustanovok Leningradskoy AES [Modernization of moisture separator-reheaters SPP-500–1 of the turbines of Leningrad NPP]. *Teploenergetika*. 2015, № 3. P. 16–21. (rus.)

9. **Gotovskiy M.A., Suslov V.A.** Teplomassoobmen v tehnologicheskikh ustanovkakh / [Heat and mass transfer in technological plants] SPb.: Publishing house of Polytechnical institute. 2017. 420 s. (rus.)

10. **Gotovskiy M.A., Fokin B.S., Belenkiy M.Ya.** Rezultaty ispytaniy modernizirovannykh separatorov-paroperegrevateley turboustanovki K-500–65/3000 energobloka № 4 Leningradskoy AES [The results of the tests of the modernized separators-superheaters of turbine K-500–65/3000 of power unit № 4 of Leningrad NPP] *Teploenergetika*. 2012, № 2, S. 27–32. (rus.)

11. **Egorov M.Yu., Sokolov K.V., Blinov M.A.** Rezultaty modernizatsii separatorov-paroperegrevateley turboustanovok na chetvertom bloke Leningradskoy AES [The results of modernization of separators-superheaters of turbine at the fourth unit of the Leningrad NPP]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU*. 2011, № 3 (130), S. 263–272. (rus.)

12. **Gredasov P.O.** Modernizatsiya separatorov-paroperegrevateley SPP-500–1 turboustanovok Leningradskoy AES [Modernization of moisture separator-steam reheaters SPP-500–1 of the turbines of Leningrad NPP] *Sbornik tezisev dokladov XII Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii «Polyarnoye siyaniye 2009»*. Moscow: SRNU MIFI, 2009. S. 30–34. (rus.)

13. **Sudakov A.V., Fokin B.S.** Parogeneratoriy I teploobmennoe oborudovanie AES [Steam generators and heat exchangers of nuclear power plants]. SPb.: NPO CKTI, 2005. 254 s. (rus.)

AUTHORS

LEGKOSTUPOVA Vera V. — Peter the Great St. Petersburg polytechnic university. E-mail: faith89@yandex.ru

SUDAКOV Aleksandr V. — Peter the Great St. Petersburg polytechnic university. E-mail: zamdir3@ckti.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 13 июня 2017 г.