

DOI:10.24223/1999-5555-2018-11-1-75-82

УДК 621.311.25

Модернизация сепараторов-пароперегревателей энергоблоков АЭС с реакторами ВВЭР-440 и ВВЭР-1000

Судаков А. В., Легкоступова В. В., Григорьев К. А., Кругликов П. А.

ОАО «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова» (ОАО «НПО ЦКТИ»)

ул. Атаманская, 3/6, Санкт-Петербург, 191167, Россия

Поступила / Received 05.04.2017

Принята к печати / Accepted for publication 31.01.2018

Сепараторы-пароперегреватели (СПП) предназначены для сепарации влаги из пара и последующего его перегрева. Проектная влажность пара после осушки в сепараторе СПП должна быть не более 1%, однако в эксплуатации она превышает этот уровень, что сказывается на эффективности и надежности турбины.

В связи с истечением проектного срока эксплуатации аппараты СПП-220М и СПП-1000 требуют замены либо модернизации. Конструкции СПП-220М и СПП-1000 унифицированы с СПП-500-1, и все эти аппараты имеют общие достоинства и недостатки.

Отмечено, что ведущие зарубежные фирмы, поставляющие СПП на АЭС, также ведут работы по совершенствованию своих аппаратов. Изложен опыт немецкой фирмы Balcke Durr, принимавшей участие совместно с ОАО «НПО ЦКТИ» в модернизации СПП-500-1 на АЭС в России, а также самостоятельно в проекте модернизации СПП на АЭС Ловииса в Финляндии.

Приведены результаты разработок ОАО «НПО ЦКТИ» по проектам модернизации СПП-220М для энергоблока с реактором ВВЭР-440 и СПП-1000 для энергоблока с реактором ВВЭР-1000. Проекты выполнены на основе собственного опыта и с учетом опыта совместных разработок с фирмой Balcke Durr. Они разработаны при соблюдении следующих условий: новые аппараты устанавливаются на прежние фундаменты; аппараты вписываются в прежние габариты; расположение присоединительных фланцев позволяет сохранить существующую обвязку аппаратов трубопроводами. Расчетное обоснование проекта включало вычислительный эксперимент на основе разработанной авторами модели СПП, а также теплогидравлические расчеты. Численное моделирование позволило провести оптимизацию конструкции сепарационных блоков, а теплогидравлические расчеты — оптимизацию конструкции пароперегревателя.

На основе расчетных оценок показано, что модернизация аппаратов может обеспечить осушку влажного пара на уровне 0,6%, понизить гидравлическое сопротивление по тракту влажного пара на 26% для СПП-220М и на 36% для СПП-1000, а также уменьшить массу аппаратов на 12%.

Предложены рекомендации по модернизации существующих и созданию перспективных конструкций СПП.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сепаратор-пароперегреватель (СПП), турбоустановка, водо-водяной энергетический реактор (ВВЭР), атомная электрическая станция (АЭС), модернизация.

Адрес для переписки:

Судаков А. В.
ОАО «НПО ЦКТИ»
ул. Атаманская, д. 3/6, Санкт-Петербург, 191167, Россия
e-mail: atom24@ckti.ru

Address for correspondence:

Sudakov A. V.
JSC «NPO CKTI»
Atamanskaya str., 3/6, 191167, Saint Petersburg, Russia
e-mail: atom24@ckti.ru

Для цитирования:

Судаков А. В., Легкоступова В. В., Григорьев К. А., Кругликов П. А. Модернизация сепараторов-пароперегревателей энергоблоков АЭС с реакторами ВВЭР. Надежность и безопасность энергетики. 2018. – Т. 11, №1. – С. 75 – 82.
DOI:10.24223/1999-5555-2018-11-1-75-82.

For citation:

Sudakov A. V., Legkostupova V. V., Grigoryev K. A., Kruglikov P. A. [Modernization of moisture separator-reheaters of NPP with reactors VVER-440 and VVER-1000]. Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki = Safety and Reliability of Power Industry. 2018, vol. 11, no. 1, pp. 75 – 82 (in Russian).
DOI:10.24223/1999-5555-2018-11-1-75-82.

Modernization of moisture separator-reheaters of NPP with VVER-440 and VVER-1000 reactors

Sudakov V. A., Legkostupova V. V., Grigoryev K. A., Kruglikov P. A.

Joint-Stock Company «I. I. Polzunov Scientific and Development Association on Research and Design of Power Equipment» («НПО СКТИ»)

Atamanskaya str., 3/6, Saint-Petersburg, 191167, Russia

Moisture separator-reheaters (MSR) are designed to separate the moisture from steam and its subsequent overheating. The design moisture of the steam after drying in the MSR separator should not be more than 1%, however, in operation it exceeds this level, which affects the efficiency and reliability of the turbine.

In connection with the expiry of the design lifetime, the SPP-220M and the SPP-1000 devices require replacement or modernization. The structures of SPP-220M and SPP-1000 are unified with SPP-500-1, and all these devices have common advantages and disadvantages.

It is noted that the leading foreign companies that supply the MSR to NPPs are also working to improve their devices. The experience of the German company Balcke Durr, which took part jointly with JSC «НПО СКТИ» in the modernization of SPP-500-1 at nuclear power plants in Russia, as well as independently in the project of modernization of the MSR at the Loviisa NPP in Finland, is presented.

The results of the development of JSC «НПО СКТИ» on the modernization of an SPP-220M for the power unit with a VVER-440 and an SPP-1000 reactor for the power unit with a VVER-1000 reactor are presented. The projects are executed on the basis of JSC «НПО СКТИ»'s own experience and taking into account the experience of joint development with the Balcke Durr firm. The projects are designed taking into account the following conditions: new devices are installed on existing foundations; devices are fit into the old dimensions; the location of connecting flanges allows to keep the existing pipelines.

The design basis for the project included a computational experiment based on an MSR model developed by the authors, as well as thermal hydraulics calculations. Numerical simulation allowed to optimize the design of separation units. Thermohydraulic calculations made it possible to optimize the superheater design.

Based on the calculation results, it is shown that the modernization of the apparatus will allow to dry the wet steam at 0.6%, to lower the hydraulic resistance along the wet steam path by 26% for the SPP-220M and 36% for the SPP-1000, and to reduce the weight of the apparatus by 12%.

Recommendations are proposed for the modernization of existing and the creation of promising structures for MSR.

KEYWORDS: moisture separator-reheater (MSR), turbine unit, water-water energetic reactor (VVER), nuclear power plant (NPP), modernization.

В настоящее время на АЭС в мире эксплуатируется 23 энергоблока с реакторами ВВЭР-440, 36 — с ВВЭР-1000 и 11 — с РБМК-1000. Турбины этих энергоблоков (К-220-44, К-1000-60 и К-500-65/3000 соответственно) работают на насыщенном паре и оснащены сепараторами-пароперегревателями СПП-220М, СПП-1000 и СПП-500-1. СПП предназначены для осушки и перегрева влажного пара, поступающего из цилиндра высокого давления (ЦВД) в цилиндр низкого давления (ЦНД) турбины, с целью снижения вероятности эрозийного износа в проточной части ЦНД и повышения надежности ее работы, а также повышения тепловой экономичности турбины. Проектная влажность пара после осушки в сепараторе СПП должна быть не более 1%*, однако в эксплуатации она превышает этот уровень [1, 2], что сказывается на эффективности и надежности турбин.

Аппараты СПП-220М, СПП-1000 и СПП-500-1 были разработаны Подольским машиностроительным заводом (ЗиО) в 70-х годах прошлого столетия, и сегодня

они требуют замены либо модернизации в связи с пониженной надежностью и истечением проектного срока эксплуатации.

Конструкция этих СПП унифицирована и представляет собой аппарат вертикального типа, в верхней части которого расположен жалюзийный сепаратор, а в нижней — двухступенчатый пароперегреватель с вертикальной ориентацией пароперегревательных каскадов. Аппараты различаются габаритными размерами корпуса, а также количеством и размерами сепарационных блоков и пароперегревательных каскадов. Сепаратор СПП-220М состоит из 16 блоков, а СПП-1000 и СПП-500-1 — из 20. Пароперегреватель СПП-500-1 выполнен из гладких труб из стали 08Х18Н10Т, а пароперегреватели СПП-220М и СПП-1000 — из оребренных труб из стали 20* [2].

Общие виды СПП-220М и СПП-1000 приведены на рисунке 1.

К основным достоинствам этих СПП можно отнести их унификацию и модульный принцип, суть которого заключается в возможности отключать отдельные элементы (сепарационные блоки и пароперегревательные каскады) без остановки турбины. Аппараты снабжены

* РТМ 108.020.107-84. Сепараторы-пароперегреватели турбин АЭС. Расчет и проектирование.

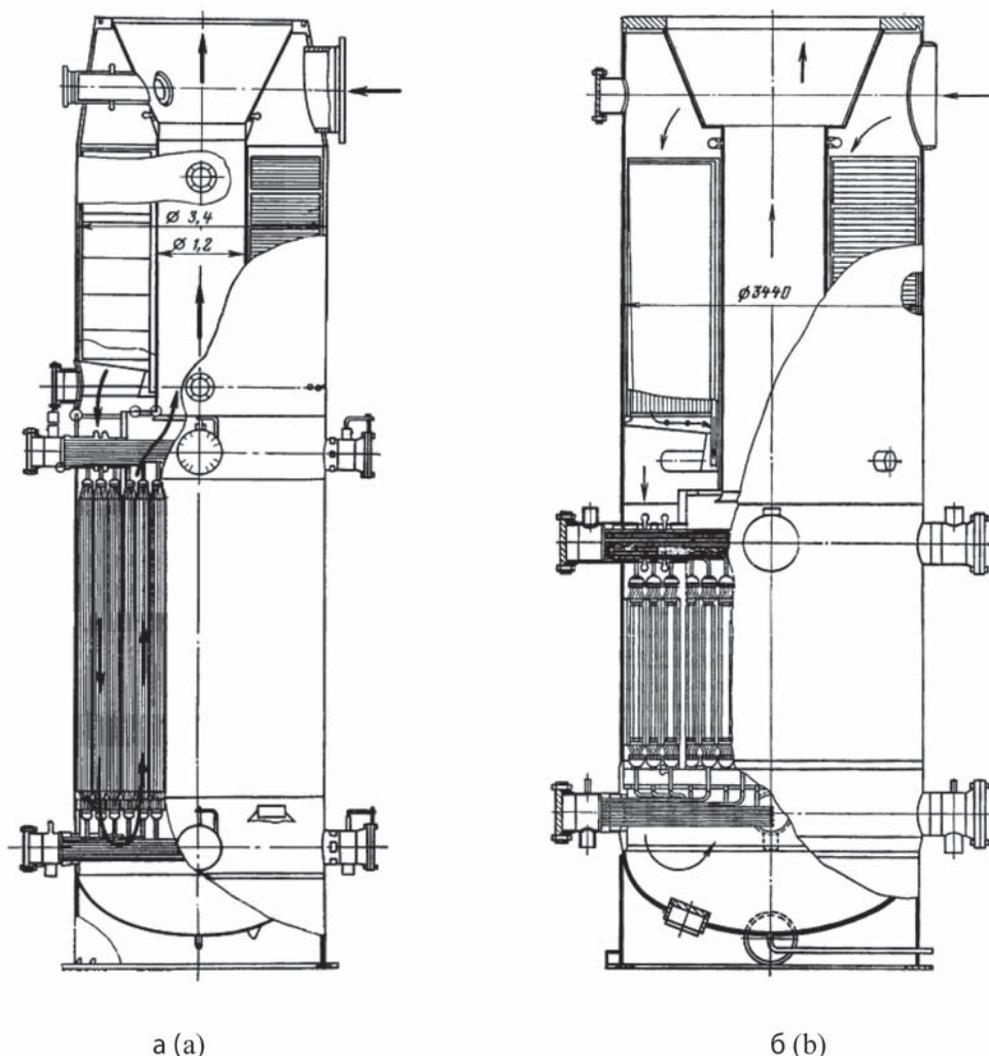


Рисунок 1. Конструкции СПП-220М (а) и СПП-1000 (б).
Figure 1. Design of SPP-220M (a) and SPP-1000 (b).

выносными сепараторами и конденсаторами, расположенными ниже точек слива сепарата из СПП; слив из аппаратов — безнапорный.

Однако опыт эксплуатации этих СПП на разных АЭС показал, что у них есть недостатки [3, 4], и одним из проблемных узлов является сепарационная часть аппарата, расположенная над пароперегревателем. Компоновка и конструкция сепарационных элементов не обеспечивают достаточную равномерность распределения потоков осушаемого пара по сепарационным блокам, а затем и по кассетам пароперегревателя.

В результате качество сепарации влаги резко ухудшается. Это приводит к орошению влагой «горячих» поверхностей пароперегревателя, что вызывает пульсации температуры металла стенок и, следовательно, создает термические напряжения и в результате — термоусталостное разрушение труб. Кроме того, гидравлическая разверка обуславливает неравномерную тепловую нагрузку отдельных кассет пароперегревателя, что сказывается на эффективности теплообмена.

В [4] отмечено, что недостаточная эффективность сепараторов СПП приводит к повреждению элементов пароперегревателя и корпуса аппарата, причем эти по-

вреждения имеют эрозионный, коррозионный и усталостный характер. Также отмечается недостаточная жесткость некоторых элементов СПП, приводящая к деформации и повреждению оборудования.

В свете вышеизложенного в ОАО «НПО ЦКТИ» было принято решение разработать проекты модернизации СПП для энергоблоков с ВВЭР-440 и ВВЭР-1000.

Анализ конструкций и опыта эксплуатации СПП ведущих мировых производителей (Westinghouse, General Electric, Mitsubishi, Balcke Durr, Stein Industrie и др.) показал [5], что конструктивное исполнение сепарационных устройств и пароперегревателей, компоновки аппаратов СПП на зарубежных АЭС отличаются большим разнообразием. Как правило, фирмы занимаются всем комплексом работ по созданию, производству и поставке оборудования (начиная от математического моделирования и стендовых экспериментов и заканчивая монтажом и вводом в эксплуатацию оборудования). Следует отметить, что СПП зарубежных фирм также имеют проблемы в эксплуатации. Например, при эксплуатации СПП фирм General Electric и Westinghouse на АЭС в Японии при вертикальной ориентации сепарационных блоков были отмечены захват паром сепарата и

пронос влаги в пароперегреватель; большой перепад температур по высоте корпуса, который приводил к его деформации, повреждению внутренних перегородок и труб и др. Поэтому фирмы постоянно ведут работы по совершенствованию аппаратов как в части доработки конструкции и апробации новых узлов, так и применяемых материалов.

Отдельно следует отметить опыт немецкой фирмы Balcke Durr, которая совместно с ОАО «НПО ЦКТИ» принимала участие в модернизации СПП-500-1 на Ленинградской, Смоленской и Курской АЭС. Результаты исследований этих СПП после модернизации дали положительные результаты: степень осушки влажного пара повысилась, и его влагосодержание после сепаратора снизилось с 2 до 0,6% [6, 7]. Таким образом, опыт модернизации СПП-500-1 показал, что даже при расположении сепаратора над пароперегревателем существует возможность получения надежного и эффективного СПП.

Фирма Balcke Durr производит СПП с 1968 г., когда она поставила аппараты на одну из первых немецких АЭС. С тех пор большинство АЭС Германии были оснащены СПП этой фирмы. Кроме того, СПП Balcke Durr широко эксплуатируются на многих АЭС в других странах. Фирма постоянно работает над повышением надежности и эффективности своих аппаратов.

Основные принципы, заложенные в конструкции СПП фирмы Balcke Durr:

- применение сепарационных устройств Powersep, которые устанавливаются на входе влажного пара в СПП, работают по принципу центробежного сепаратора и являются дополнительной ступенью сепарации;

- в качестве сепарационных блоков используются запатентованные жалюзийные пакеты Powervane, на входе и выходе которых установлены дырчатые листы со специально подобранной степенью перфорации. Такая конструкция обеспечивает достаточно равномерное распределение потоков по сепарационным блокам и повышенную степень осушки пара;

- надежная защита от эрозии и коррозии обеспечивается за счет изготовления деталей, контактирующих с влажным паром, из нержавеющей стали или плакируются ею;

- компенсация теплового расширения достигается при помощи термоэластичных компенсаторов;

- при разработке конструкции особое внимание уделяется защите от вибрации (например, использование дистанционирующих планок в трубном пучке пароперегревателя).

В 2015 г. фирма Balcke Durr начала работы по модернизации СПП на АЭС

Ловииса (Финляндия). Первоначально на энергоблоках с ВВЭР-440 были установлены СПП-220М конструкции ЗиО (в вертикальном исполнении, с верхним расположением сепаратора). Проект, по сути, предусматривал замену СПП-220М на новый СПП фирмы Balcke Durr. Корпус нового СПП выполнен в габаритах СПП-220М. Размеры и расположение присоединительных патрубков осталось прежним, что позволило вписать новый аппарат в существующую обвязку трубопроводами. Конструкция нового СПП представлена на рисунке 2.

В новой конструкции СПП применены сепарационные блоки на основе жалюзийных пакетов Powervane и усовершенствованная система сбора и отвода сепарата.

Пароперегреватель выполнен из трубок с низким оребрением; трубки изготовлены из эрозионностойкой стали 1.4510 (X3CrTi17), которая отличается высокой термоэластичностью и устойчивостью к тепловому растрескиванию.

Заявленная поставщиком проектная влажность пара на выходе из СПП — на уровне 0,3–0,5%. Гидравлическое сопротивление СПП составляет около 24 кПа. Вес оборудования был снижен на 17 т (по сравнению с аппаратом СПП-220М). К сожалению, данных об эффективности проведенной модернизации в открытом

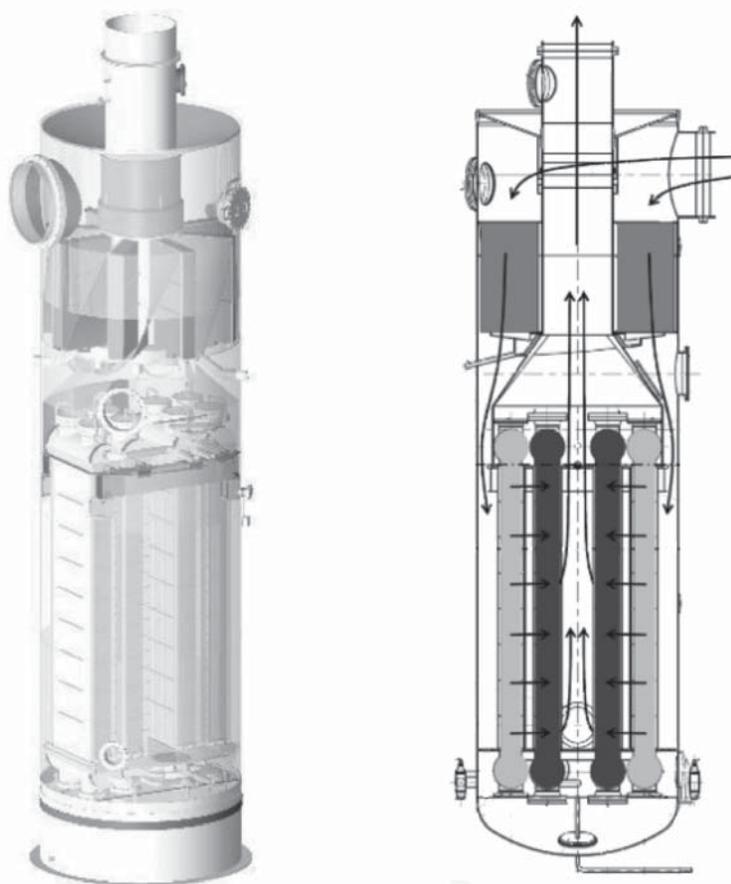


Рисунок 2. СПП фирмы Balcke Durr для АЭС Ловииса (стрелками указано направление движения пара).

Figure 2. MSR of the firm Balcke Durr for Loviisa NPP (the arrows are indicated the direction of the flow of the steam).

доступе авторам найти не удалось.

Проекты модернизации СПП-220М и СПП-1000 были выполнены на основе собственного опыта ОАО «НПО ЦКТИ» с использованием совместных разработок с фирмой Balcke Durr.

Проекты разработаны с учетом следующих условий:

- новые аппараты устанавливаются на прежние фундаменты;
- аппараты вписываются в прежние габариты;
- расположение присоединительных фланцев позволяет использовать существующую обвязку аппаратов трубопроводами.

Сохранена принципиальная компоновка — сепаратор расположен над пароперегревателем. Общий вид СПП приведен на рисунке 3.

Сепарационная часть выполнена по аналогии с модернизированным аппаратом СПП-500-1 на Ленинградской и Смоленской АЭС [6, 7].

В состав сепарационных элементов (см. рисунок 3) входят шесть сепарационных блоков 3, размещенных в виде правильного шестигранника вокруг трубопровода перегретого пара 14, и дырчатый лист 5, установленный на перекрытии сепарационных блоков.

Каждый сепарационный блок представляет собой параллелепипед и состоит из двух дырчатых листов, между которыми находится жалюзийный пакет Powervane (фирмы Balcke Durr). Размеры блоков (ширина × высота × глубина): 1330 × 1268 × 270 мм — для СПП-220М и 1330 × 2600 × 270 мм — для СПП-1000.

Дырчатые листы, установленные по ходу пара перед пакетами Powervane, имеют переменную степень перфорации для достижения равномерного распределения пара как по сепарационным блокам, так и по поверхности каждого блока.

Кольцевой зазор между корпусом и сепарационными блоками образует раздающий коллектор 4 сепаратора, а аналогичный зазор между блоками и трубопроводом перегретого пара — собирающий коллектор 9 сепаратора.

Под блоками расположен коллектор 6 сбора сепарата, к которому подсоединяются патрубки отвода сепарата из СПП. Также имеется система патрубков и труб

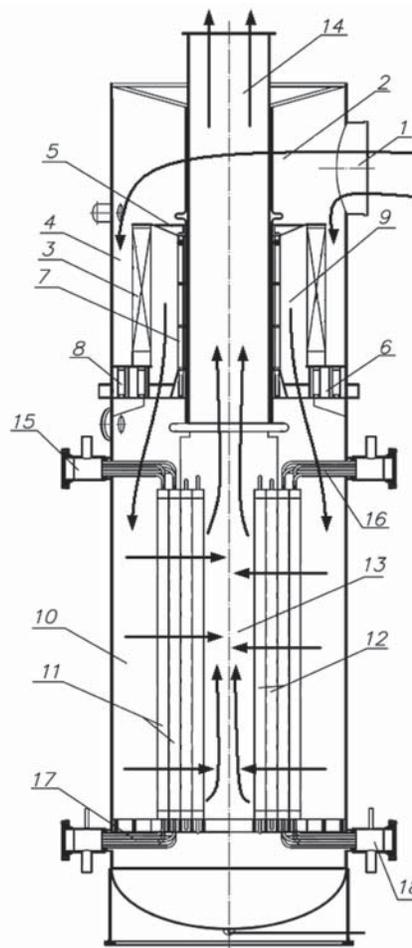


Рисунок 3. Общий вид модернизированной конструкции СПП (стрелками указано направление движения пара):

1 — входной патрубок; 2 — входная камера; 3 — сепарационные блоки; 4 — раздающий коллектор сепаратора; 5 — перекрытие сепарационных блоков (дырчатый лист); 6 — коллектор сбора сепарата; 7 — трубы отвода сепарата с перекрытия сепарационных блоков; 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.

Figure 3. General view of the upgraded design of MSR (the arrows are indicated the direction of the flow of the steam):

1 — inlet; 2 — inlet chamber; 3 — separating blocks; 4 — distributing manifold of the separator; 5 — overlap of separating blocks (perforated sheet); 6 — drain collector; 7 — pipes to assign drain from the overlap of separating blocks; 8 — pipes to assign drain from the floor of the distributing manifold of the separator; 9 — collecting manifold of the separator; 10 — distributing manifold of the steam reheater; 11 — cassettes of the first stage of the steam reheater; 12 — cassette of the second stage of the steam reheater; 13 — collecting manifold of the steam reheater; 14 — pipes to output superheated steam; 15 — distributing chambers of heating steam; 16 — pipes to supply heating steam to the steam reheater cassettes; 17 — pipes to assign condensate of heating steam; 18 — collecting chambers of the condensate of heating steam.

для отвода сепарата, сконденсировавшегося на перекрытии блоков и стенах входной камеры 2, и сепарата, осевшего на полу раздающего коллектора 4.

Влажный пар поступает в СПП через входной патру-

бок 1 сбоку в верхней части корпуса СПП и попадает во входную камеру 2, откуда поступает в раздающий коллектор 4 сепаратора и затем в сепарационные блоки 3. Пройдя сепарационные блоки, осушенный пар поступает в кольцевой зазор между ними и обечайкой вакуумной защиты трубопровода отвода перегретого пара (собирающий коллектор 9 сепаратора). Далее осушенный пар следует в раздающий коллектор пароперегревателя 10.

Пароперегреватель — двухступенчатый. В нем сохранен кассетный принцип, что позволяет при необходимости отключить поврежденные кассеты без остановки турбины.

Кассеты скомпонованы в два блока, в виде компактных прямоугольных параллелепипедов, расположенных симметрично относительно вертикальной оси аппарата напротив друг друга. По ширине каждого блока располагается 10 кассет, по глубине — 4. Первые два ряда кассет 11 (по ходу влажного пара) относятся к I ступени пароперегревателя, а следующие за ними два ряда кассет 12 — к II ступени.

Кассеты обеих ступеней пароперегревателя содержат по 70 труб. Материал труб первого ряда кассет I ступени — коррозионно-стойкая сталь 08X17T (сталь 439). Остальные трубы выполнены из стали 20 (20 К).

Пространство между блоками кассет и корпусом СПП является раздающим коллектором 10 пароперегревателя (таким образом, в пароперегревателе имеется два раздающих коллектора). Пространство между блоками кассет образует собирающий коллектор 13. Перегретый пар из собирающего коллектора поступает в выходной патрубок 14, соединяющийся с ресивером ЦНД.

Расчетное обоснование проекта включало вычислительный эксперимент и теплогидравлические расчеты.

Численное моделирование сепарационной части СПП позволило провести оптимизацию конструкции сепарационных блоков. Модели СПП были разработаны авторами на основе программного кода ANSYS CFX, широко используемого для подобных задач. Апробация математической модели СПП на экспериментальных данных, полученных для СПП-500-1 на стендовых установках и в промышленных условиях, показала [8, 9], что модель адекватно описывает физику протекающих в СПП процессов и дает удовлетворительное согласование расчета с экспериментом (в пределах 15% по величине остаточного влагосодержания осушенного пара).

В моделях СПП-220М и СПП-1000 исследовалось влияние конструкции сепарационных элементов (схемы и степени перфорации дырчатых листов, установленных перед пакетами Powervane), а также угла подвода рабочей среды во входную камеру сепаратора ($\beta = 0^\circ$ и $\beta = 28^\circ$) на равномерность распределения влажного пара по сепарационным блокам и эффективность сепарации влаги.

В качестве критерия для сравнительной оценки аэродинамического совершенства исследуемых конструкций сепарационных аппаратов использовался коэффициент *неравномерности* распределения потока по блокам СПП — a (для краткости — коэффициент

неравномерности a), который определялся как относительное линейное отклонение расхода по блокам.

По результатам вычислительного эксперимента была подобрана оптимальная схема перфорации дырчатых листов (с усредненной по блокам степенью перфорации $\varphi = 0,23$). Расчеты показали, что изменение угла подвода среды к входному патрубку СПП (β) в пределах от 0 до 28° приводит к росту коэффициента неравномерности на 3%, ухудшению степени осушки пара (примерно на 5%) и повышению гидравлического сопротивления аппарата в 1,3 раза. По расчетным оценкам предложенные конструкции сепараторов позволяют обеспечить осушку влажного пара на уровне примерно 0,6% (при начальной влажности 13%).

Теплогидравлические расчеты позволили обосновать и оптимизировать конструкцию пароперегревателя, которая обеспечивает требуемый уровень перегрева (136° — для СПП-220М и 185° — для СПП-1000). Характеристики СПП до и после модернизации приведены в таблице, из которой видно, что модернизация аппаратов позволит понизить гидравлическое сопротивление по тракту влажного пара на 26% для СПП-220М и на 36% для СПП-1000, а также уменьшить массу пароперегревателей на 12%.

На основе проведенных исследований, анализа отечественного и зарубежного опыта эксплуатации и модернизации СПП разработаны **рекомендации** для дальнейшего развития конструкций СПП, которые предложены в [4, 10]:

- компоновка СПП с размещением сепаратора под пароперегревателем или сбоку от него;
- переход на применение трубных пучков с поперечным обтеканием труб паром с использованием труб с поперечным оребрением; при этом сохраняется кассетный способ компоновки трубного пучка;
- совершенствование входных камер с установкой устройств предварительной сепарации влаги и специальных устройств (перфорированных листов или перегородок) для повышения равномерности распределения потоков влажного пара на сепарационные блоки;
- установка дополнительной ступени сепаратора перед СПП;
- переход на создание системы перегрева пара при установке вместо четырех СПП на турбоустановку двух СПП (хотя данная рекомендация требует существенных изменений компоновки турбоустановки в машинном зале);
- применение отдельных СПП — отдельно сепаратора и пароперегревателя;
- проектирование систем слива сепарата закрытого типа, исключающих 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 пароперегревателя с учетом изменения температур по высоте труб (например, трубы в верхней и нижней трубных досках

Таблица. Характеристики СПП до и после модернизации.
Table. Characteristics of MSR before and after modernization.

Параметр (Parameter)	СПП-220М (SPP-220M)		СПП-1000 (SPP-1000)	
	до (before)	после (after)	до (before)	после (after)
<i>Сепаратор (Separator)</i>				
Количество сепарационных блоков, шт. (The number of separation units, pcs)	16	6	20	6
Число модулей в блоке, шт. (Number of modules in the block, pcs)	5	1	6	1
<i>Пароперегреватель (Reheater)</i>				
Диаметр труб, мм (Diameter of tubes, mm)	16 × 2	16,25 × 1,1	16 × 2	16,25 × 1,1
Длина труб, мм (Length of tubes, mm)	4600	5050	4600	5050
Число труб в кассете, шт. (The number of tubes in the cassettes, pcs)	37	70	37	70
Количество кассет I ступени, шт. (Number of cassettes of the I stage, pcs)	94	40	94	40
Количество кассет II ступени, шт. (Number of cassettes of the II stage, pcs)	93	40	93	40
Число труб I ступени, шт. (Number of tubes of the I stage, pcs)	3478	2800	3478	2800
Число труб II ступени, шт. (Number of tubes of the II stage, pcs)	3441	2800	3441	2800
Масса теплообменных труб, т (Weight of reheater tubes, t)	22	19,3	22	19,3
Материал труб (The material of the pipes)	Сталь 20 (Steel 20)	08X17T, Сталь 20 (08X17T, Steel 20)	Сталь 20 (Steel 20)	08X17T, Сталь 20 (08X17T, Steel 20)
<i>Общие данные (Common data)</i>				
Гидравлическое сопротивление, кПа (Hydraulic resistance, kPa)	18,1	13,3	33,4	21,4

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);

– применение шайб на трубах подвода греющего пара пароперегревателя.

Данные принципы частично были реализованы в конструкции СПП для АЭС-2006, разработанной ОАО «НПО ЦКТИ», описание и характеристики которой приведены в [11, 12].

Выводы

1. Влажность пара после осушки в сепараторах СПП-220М и СПП-1000 на АЭС превышает допустимый уровень, что сказывается на эффективности и надежности турбины. В связи с этим аппараты требуют замены либо модернизации.

2. Разработаны и обоснованы проекты модернизации СПП-220М и СПП-1000, реализация которых на действующих энергоблоках АЭС позволяет повысить

эффективность осушки пара и обеспечить ее на требуемом уровне (около 0,6%), уменьшить гидравлическое сопротивление аппаратов и снизить их металлоемкость.

3. Предложены рекомендации по модернизации существующих и созданию перспективных конструкций СПП.

Список использованных источников

1. Филиппов Г. А., Поваров О. А. Сепарация влаги в турбинах АЭС. – М.: Энергия, 1980. – 320 с.
2. Судаков А. В., Фокин Б. С. Парогенераторы и теплообменное оборудование АЭС. – СПб: НПО ЦКТИ, 2005. – 254 с.
3. Условия работы модулей труб отвода конденсата СПП-500-1 на Чернобыльской АЭС. / В. Л. Мухачев, А. В. Некрасов, В. Ю. Пикус и др. // Энергомашиностроение. 1988. №10. – С. 38–41.
4. Легкоступова В. В., Судаков А. В. Модернизация сепараторов-пароперегревателей СПП-500-1 турбоустановок Ленинградской АЭС // Теплоэнергетика. 2015. №3. – С. 16–21.
5. Судаков А. В., Легкоступова В. В. Сепараторы-пароперегреватели зарубежных фирм. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. – 103 с.
6. Результаты модернизации сепараторов-пароперегревателей турбоустановок на четвертом блоке Ленинградской АЭС. / М. Ю. Егоров, К. В. Соколов, М. А. Блинов, М. Я. Бельский, Ю. В. Смолкин,

П. А. Кругликов, Е. Д. Федорович. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2011. №3 (130). – С. 263–272.

7. Результаты испытаний модернизированных сепараторов-пароперегревателей турбоустановки К-500-65/3000 энергоблока №4 Ленинградской АЭС. / М. А. Готовский, Б. С. Фокин, М. Я. Беленький, М. Е. Лебедев, М. А. Блинов, М. Ю. Егоров. // Теплоэнергетика. 2012. №2. – С. 27–32.

8. Легкоступова В. В., Судаков А. В. Эффективность модернизации сепаратора-пароперегревателя СПП-500-1 // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2016. №4 (254). – С. 173–181.

9. Легкоступова В. В., Судаков А. В. Эффективность применения предварительного сепаратора на Курской АЭС: экспериментальная и расчетная оценка // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2017. №1 (23). – С. 69–81.

10. Легкоступова В. В., Судаков А. В. Модернизация сепараторов-пароперегревателей энергоблоков АЭС с реакторами ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Естественные и инженерные науки. 2017. № 3 (23). – С. 61–73.

11. Сепаратор-пароперегреватель для перспективных блоков АЭС с ВВЭР / А. В. Судаков, В. В. Силин, А. М. Маринич, К. Н. Денисов, Д. А. Соболев, А. А. Мушков. // Надежность и безопасность энергетики. 2011. №12. – С. 66–70.

12. Патент РФ на полезную модель №88774. Сепаратор пароперегреватель турбины атомной электрической станции / А. М. Маринич, А. В. Судаков, Л. Я. Бальва, К. Н. Денисов, А. С. Лисянский. – Заявл. 16.07.2009. Опубл. 20.11.2009. Бюл. 32.

References

1. Filippov G. A., Povarov O. A. Separation of moisture in the turbines of NPP. – М.: Energiya, 1980. – 320 p.
2. Sudakov A. V., Fokin B. S. Steam generators and heat exchangers of NPP. – SPb.: NPO CKTI, 2005. – 254 p.
3. The operation conditions of the pipes to assign condensate of SPP-500-1 at Chernobyl NPP. / V. L. Muhachev, A. V. Nekrasov, V. Yu.

Pikus, et al. // Energomashinostroenie. 1988. No. 10. – pp. 38–41.

4. Legkostupova V. V., Sudakov A. V. Upgrading the SPP-500-1 moisture separators–steam reheaters used in the Leningrad NPP turbine units // Teploenergetika. 2015. No. 3. – pp. 16–21.

5. Sudakov A. V., Legkostupova V. V. Moisture separator-reheaters of foreign firms. – SPb.: Publishing house of Polytechnical University, 2015. – 103 p.

6. The results of modernization of moisture separator-steam reheaters of turbine on the fourth unit of the Leningrad NPP. / M. Yu. Egorov, K. V. Sokolov, M. A. Blinov, M. Ya. Belen'kii, Yu. V. Smolkin, P. A. Kruglikov, E. D. Fedorovich. // Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. 2011. No. 3 (130). – pp. 263–272.

7. Results from tests of modernized moisture separator-reheater of K-500-65/3000 turbine plants of the power unit No. 4 at the Leningrad Nuclear Power Plants (NPP). / M. A. Gotovskii, B. S. Fokin, M. Ya. Belen'kii, M. E. Lebedev, M. A. Blinov., M. Yu. Egorov. // Teploenergetika. 2012. No. 2. – pp. 27–32.

8. Legkostupova V. V., Sudakov A. V. The effectiveness of modernizing the SPP-500-1 moisture separator reheater // Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. 2016. No. 4 (254). – pp. 173–181.

9. Legkostupova V. V., Sudakov A. V. Efficiency of using a preliminary separator at the Kursk nuclear power plant: experimental and computational assessment // Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. 2017. No. 1 (23). – pp. 69–81.

10. Legkostupova V. V., Sudakov A. V. Modernization of moisture separator reheaters in nuclear power units with VVER reactors // Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. 2017. No. 3 (23). – pp. 61–73.

11. Moisture separator-steam reheater for the perspective units of NPP with VVER / A. V. Sudakov, V. V. Silin, A. M. Marinich, K. N. Denisov, D. A. Sobelev, A. A. Mushkov. // Safety and Reliability of Power Industry. 2011. No. 12. – pp. 66–70.

12. Moisture separator-steam reheater of the turbine of nuclear power plant. A. M. Marinich, A. V. Sudakov, L. Ya. Bal'va, K. N. Denisov, A. S. Lisyanskiy // Patent RF. No. 88774, 2009.

