

СЕПАРАТОРЫ-ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ДЛЯ ПАРОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК АЭС С ВВЭР

© 2022 г. А. С. Шамароков^{а, *}, В. М. Зорин^б, С. Б. Пустовалов^с, Е. А. Михушкина^б

^аНаучно-производственная фирма ЭКИП, Солдатская ул., д. 3, Москва, 111020 Россия

^бНациональный исследовательский университет “Московский энергетический институт”,
Красноказарменная ул., д. 14, Москва, 111250 Россия

^сНациональный исследовательский центр “Курчатовский институт”,
пл. Академика Курчатова, д. 1, Москва, 123182 Россия

*e-mail: rasa7@mail.ru

Поступила в редакцию 14.11.2021 г.

После доработки 17.01.2022 г.

Принята к публикации 26.01.2022 г.

Представлены результаты сравнения конструкционных, массогабаритных и технологических характеристик сепараторов-пароперегревателей (СПП) паротурбинных установок АЭС с водо-водяными энергетическими реакторами (ВВЭР) на базе кассетной трубной системы (СПП-К), применяемой в настоящее время, с перспективным аппаратом на основе коллекторно-ширмовой трубной системы (СПП-ШН) с организацией процессов конденсации греющего пара и отвода выделившихся при конденсации неконденсирующихся газов. Рассматриваемый в статье сепаратор СПП-ШН отличается от СПП-Ш, разработанного в начале XXI в. специалистами ВНИИАМ, конструкцией трубного пучка ступеней пароперегревателей и работой трактов конденсации греющего пара. Устранение теплогидравлической неравномерности и обеспечение стабильной и надежной работы трубных пучков ступеней пароперегревателей СПП-ШН без термопульсаций и парогазовых пробок достигается за счет растворения газов, выделившихся при конденсации пара, на участке охлаждения конденсата. Трубный пучок каждой ступени пароперегревателя СПП-ШН представляет собой один участок, в котором совмещаются конденсация пара и охлаждение конденсата. При этом полностью исключаются потери греющего пара из-за отсутствия продувки. Кроме того, уменьшаются расходы греющего пара в ступенях пароперегревателей благодаря охлаждению конденсата и повышаются экономичность работы аппарата и КПД турбоустановки. Использование СПП-ШН позволит существенно сократить площадь, занимаемую системой промежуточной сепарации и перегрева пара в машинном зале, а также снизить в 2 раза металлоемкость аппарата по сравнению с СПП-К. Указанные возможности СПП-ШН имеют существенное значение при реконструкции (модернизации) действующих и создании новых энергоблоков АЭС и оптимизации проектно-технологических и объемно-компоновочных решений систем промежуточной сепарации и перегрева пара действующих и проектируемых паротурбинных установок с соответствующим снижением приведенных годовых затрат, включающих капитальные вложения и эксплуатационные расходы.

Ключевые слова: паротурбинная установка АЭС, сепаратор-пароперегреватель, конденсация, вертикальный цилиндрический коллектор, коллекторно-ширмовая трубная система, кассетная трубная система, продувка пара, теплогидравлическая неустойчивость

DOI: 10.56304/S0040363622080082

Вследствие сравнительно низкого давления (6–7 МПа) сухого насыщенного пара (относительная влажность 0.5–1.0%) на входе в цилиндр высокого давления турбины АЭС с ВВЭР требуется проведение специальных мероприятий для обеспечения приемлемой влажности пара на выходе из него. В настоящее время для этого применяются аппараты системы промежуточных сепараций и перегрева пара (ПСПП), составляющей вместе с цилиндрами турбины единый тракт, по которому проходит рабочий пар. Характеристики

сепаратора-пароперегревателя оказывают влияние на характеристики турбины, ее надежность, а также на экономичность паротурбинной установки в целом.

В статье анализируются характеристики СПП вертикального исполнения двух типов. Один из них — используемый на российских АЭС сепаратор-пароперегреватель кассетного типа, разработанный в АО ИК “ЗиОМАР” и изготавливаемый на предприятии АО «Машиностроительный завод “ЗиО-Подольск»». Второй относится к новому

поколению аппаратов с коллекторно-ширмовой трубной системой.

Особенностью двухступенчатого СПП-К является применение в трубных пучках ступеней пароперегревателей (ПП) вертикальных теплообменных труб с продольным оребрением, объединенных в кассеты, которые характеризуются высокой металлоемкостью и плохой компенсацией температурных расширений труб. Основной узел ступени ПП – устройство многоэтапного (многоступенчатого) подвода греющего пара к теплопередающей поверхности и отвода его конденсата.

Особенностью СПП-ШН является применение в ПП теплообменных труб с поперечным оребрением, которые обеспечивают высокую тепловую эффективность и низкую металлоемкость. Основной узел каждой ступени ПП – трубная система, представляющая собой единый трубный пучок, состоящий из теплообменных ширм, закрепленных концами в вертикальном коллекторе. Между трубами в ширме имеется хорошая компенсация температурных расширений. Подвод греющего пара к коллектору осуществляется по одному трубопроводу, так же как и отвод конденсата от него. Трубный пучок каждой ступени ПП представляет собой один участок, в котором совмещаются зоны конденсации пара и охлаждения конденсата. Теплогидравлическая устойчивость работы ПП достигается вследствие растворения газов, выделившихся при конденсации пара, в зоне охлаждения конденсата. Кроме того, нет потерь греющего пара, потому что отсутствует продувка.

Сравнение СПП-К и СПП-ШН было выполнено применительно к рабочим параметрам турбоустановки К-1200-6.8/50 (проект АЭС-2006), которая комплектуется четырьмя СПП, установленными параллельно по нагреваемому пару. В СПП-К и СПП-ШН применены трубы наружным диаметром 16 мм из нержавеющей стали 08X14МФ, а жалюзийные сепараторы выполнены из нержавеющей стали 08X18Н10Т.

КОНСТРУКТИВНОЕ УСТРОЙСТВО СЕПАРАТОРОВ-ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЕЙ

Продольный и поперечный разрезы сепаратора СПП-К показаны на рис. 1, схема включения СПП-К в тепловую схему турбоустановки К-1200-6.8/50 – на рис. 2. СПП-К представляет

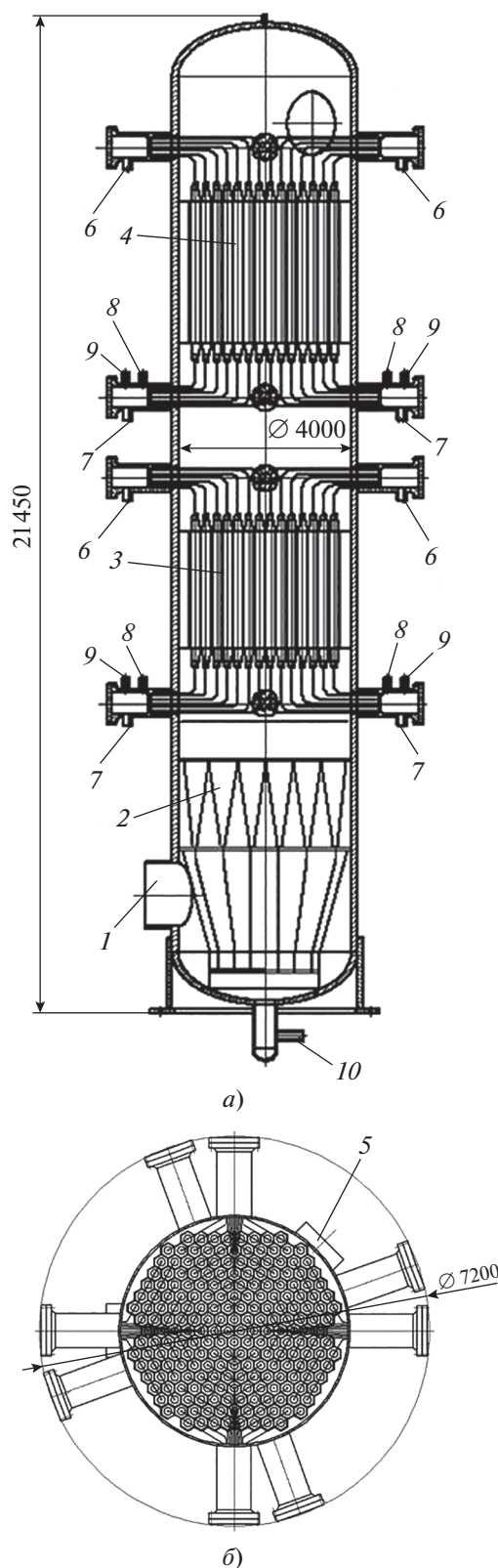


Рис. 1. Продольный (а) и поперечный (б) разрезы сепаратора-пароперегревателя с кассетной трубной системой.

1 – патрубок входа насыщенного пара; 2 – жалюзийный сепаратор; 3, 4 – пароперегреватель первой (ПП-1) и второй (ПП-2) ступени перегрева; 5 – патрубок выхода перегретого пара; 6 – подвод греющего пара; 7 – отвод конденсата; 8 – патрубок дыхательной линии; 9 – патрубок рециркуляции; 10 – выход сепарата

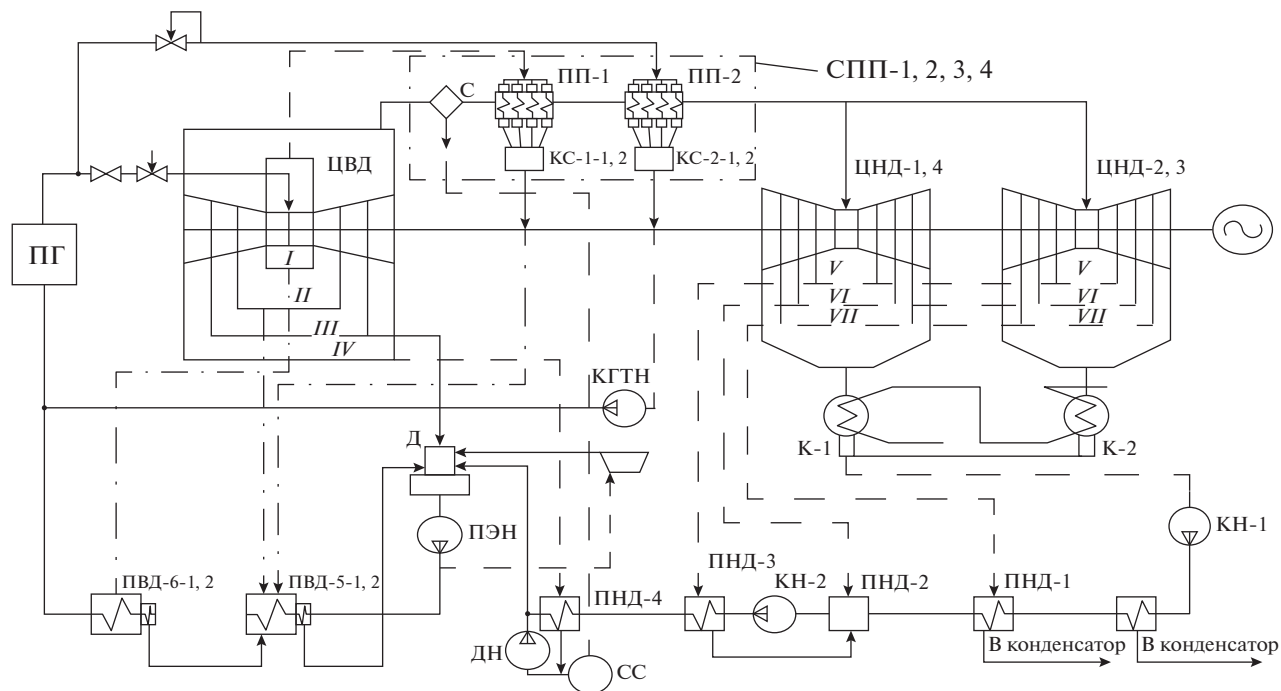


Рис. 2. Схема включения СПП-К в тепловую схему турбоустановки К-1200-6.8/50.

ЦВД, ЦНД – цилиндр высокого и низкого давления; ПВД, ПНД – подогреватель высокого и низкого давления; Д – деаэра́тор; ПГ – парогенератор; С – сепаратор; СС – сепараторосборник; КГТН – конденсатосборник; ПЭН – питательный электронасос; К – конденсатор; КН – конденсатный насос; ДН – дренажный насос; I–VII – номер отбора пара

собой вертикальный аппарат, который содержит встроенные в корпус сепаратор, пароперегреватели, конденсаторосборники, расположенные вне корпуса СПП-К (один конденсаторосборник каждой ступени ПП обеспечивает совместную работу двух СПП-К). Подвод влажного насыщенного пара в сепаратор осуществляется по патрубку диаметром 1800 мм. Сепаратор состоит из перевернутых V-образных жалюзийных сепарационных блоков, включающих в себя волнистые пластины с влагоуловителями. Отсепарированная влага собирается в нижней части корпуса и отводится через нижний патрубок в единый для всех СПП-К сепараторосборник. Осушенный пар направляется в расположенные выше ПП-1 и ПП-2, где перегревается и выходит из СПП-К через боковой патрубок диаметром 1800 мм.

Трубная система каждой ступени ПП состоит из четырех индивидуальных секций, включенных параллельно по греющему пару. Каждая секция включает в себя 55 вертикальных кассет, камеру подвода греющего пара к секции и камеру отвода конденсата, а также внутрикорпусные трубопроводы, соединяющие камеры секции с кассетами. Кассета состоит из 37 продольно оребренных вертикальных труб, концы которых закреплены в трубных досках камер подвода греющего пара и отвода конденсата от кассеты. Греющий пар подводится индивидуальными трубопроводами к горизонталь-

ным камерам секций, приваренным снаружи к корпусу, и затем по индивидуальным внутрикорпусным трубопроводам к камерам кассет. Отвод конденсата из ступени ПП осуществляется в три этапа: из камер кассет по индивидуальным трубопроводам в камеры секций, затем в отдельно стоящий конденсаторосборник, единый для двух СПП-К, после чего из конденсаторосборника ПП-1 конденсат отводится в ПВД-5, а из конденсаторосборника ПП-2 закачивается конденсатным насосом с гидроприводом в смеситель, установленный в тракте питательной воды после ПВД-6.

Для трубных пучков ступеней пароперегревателей СПП-К характерны:

гидравлическая неравномерность вследствие разной длины труб, соединяющих камеры секции с камерами кассет по греющему пару и его конденсату;

неравномерное обтекание нагреваемым паром продольно оребренных труб кассет, которое вызывает теплогидравлическую неравномерность и образование парогазовых пробок с исключением из теплообмена части теплопередающей поверхности, что приводит к снижению температуры нагреваемого пара и КПД турбоустановки;

наличие термопульсаций, приводящих к высоким температурным напряжениям и усилиям в трубах и узлах заделки труб в трубных досках кассеты.

Для уменьшения влияния теплогидравлической неравномерности в СПП-К организована рециркуляция части греющего пара и неконденсирующихся газов из камер конденсата секций в камеры греющего пара соответствующей секции. Такая рециркуляция незначительной части греющего пара приводит к постоянному увеличению доли неконденсирующихся газов в греющем паре на входе в трубные пучки и не устраняет образование парогазовых пробок и термопульсаций.

Для обеспечения стабильной работы пароперегревателей в дополнение к рециркуляции греющего пара из конденсатосборников каждой ступени производится периодическая продувка греющего пара. Промышленные исследования СПП-К, проведенные на АЭС, показали, что для обеспечения надежной работы кассетных трубных пучков без образования парогазовых пробок и термопульсаций необходима постоянная продувка греющего пара в объеме не менее 10% расхода пара на входе в каждую ступень ПП со сбросом в конденсатор турбоустановки [1]. При меньшем расходе пара на продувку не все трубы кассет полноценно продуваются. При периодической или меньшей постоянной продувке парогазовой смеси трубные пучки СПП-К будут работать с различной скоростью образования парогазовых пробок и термопульсациями до 70°C и уменьшением температуры нагреваемого пара, что приведет к снижению надежности функционирования турбины и КПД турбоустановки. Накопление неконденсирующихся газов в теплопередающих трубах происходит в зоне встречи основного потока с обратным, вследствие чего образуется парогазовая пробка.

Термопульсации возникают в результате охлаждения парогазовой пробки и металла труб до температуры нагреваемого пара и дальнейшего роста гидростатического давления с последующим выталкиванием пробки и возобновлением конденсации пара на этом участке, которая сопровождается ростом температуры металла трубы. Из-за плохой компенсации температурных расширений прямых труб кассеты (с небольшой подгибкой периферийных труб в местах их закрепления в камерах кассеты) теплообменные трубы и узлы заделки труб (сварные швы) в трубных досках камер кассет испытывают циклические температурные напряжения и температурные усилия, которые понижают надежность работы ступеней ПП в СПП-К.

Продувка греющим паром в соответствии с требованиями [1] повышает надежность работы СПП-К, но при этом снижается тепловая экономичность турбоустановки. В табл. 1 приведены данные расчета электрической мощности N турбоустановки и ее снижения ΔN в зависимости от продувки. Все расчеты тепловой схемы паротурбинной установки К-1200-6.8/50 проводились с использованием программы СХЕМА, разрабо-

Таблица 1. Электрическая мощность турбоустановки К-1200-6.8/50 (АЭС-2006) и ее снижение при продувке трубного пространства ПП-1 и ПП-2 в целях сдувки неконденсирующихся газов в конденсатор турбины

Продувка, %	$N_{бр}$, кВт	$\Delta N_{бр}$, кВт
0	1 191 458.03	0
3.0	1 187 378.39	-4079.64
6.0	1 183 330.07	-8127.96
10.0	1 177 978.23	-13 479.80

Примечание. Все варианты рассчитаны при одних и тех же параметрах в оборудовании турбоустановки. Температура питательной воды на выходе из ПВД-6 равна 224.1°C. Конденсат греющего пара ПП-2 закачивается в смеситель после ПВД-6.

танной на кафедре атомных электростанций НИУ МЭИ. Снизить потери тепловой экономичности можно путем дресселирования всех труб ступеней ПП по специальной программе или с помощью отвода продувочного пара не в конденсатор турбины, а из ПП-2 в ПП-1 и из ПП-1 в ПВД-5. Для надежного дренажа конденсата греющего пара из камер секций в конденсатосборники камеры конденсата секций ПП соединены дыхательными трубопроводами с вынесенными конденсатосборниками. Для проведения текущих осмотров и ремонтов на корпусе и торцах камер секций пароперегревателей расположены люки-лазы. При повреждении одной трубки какой-либо кассеты ремонт сводится к отключению секции с этой кассетой и отглушению кассеты с последующим включением секции в работу. Замена поврежденных кассет производится при капитальном ремонте энергоблока.

Продольный и поперечный разрезы СПП-ШН показаны на рис. 3, схема включения СПП-ШН в тепловую схему турбоустановки К-1200-6.8/50 — на рис. 4. В нижней части корпуса СПП-ШН находится сепаратор, который состоит из вертикальных и наклонных жалюзийных блоков, изготовленных из волнистых пластин с влагоуловителями. Вертикальные блоки расположены в два яруса и скомпонованы в виде соосного корпусу цилиндра, установленного с зазором относительно корпуса. Наклонные блоки нижним основанием опираются на цилиндрическую часть сепарационного устройства, а верхним основанием — на корпус СПП-ШН.

В зазоре между вертикальными сепарационными блоками и корпусом организована раздающая кольцевая камера для поступающего в нее влажного пара. По периметру кольцевой раздающей камеры с зазором относительно корпуса установлена перфорированная обечайка для улавливания крупнодисперсной влаги из пара. Частично осушенный в предвключенном пленочном сепараторе, размещенном в тракте трубопровода (на рис. 4 не показан), насыщенный пар поступает через патрубок

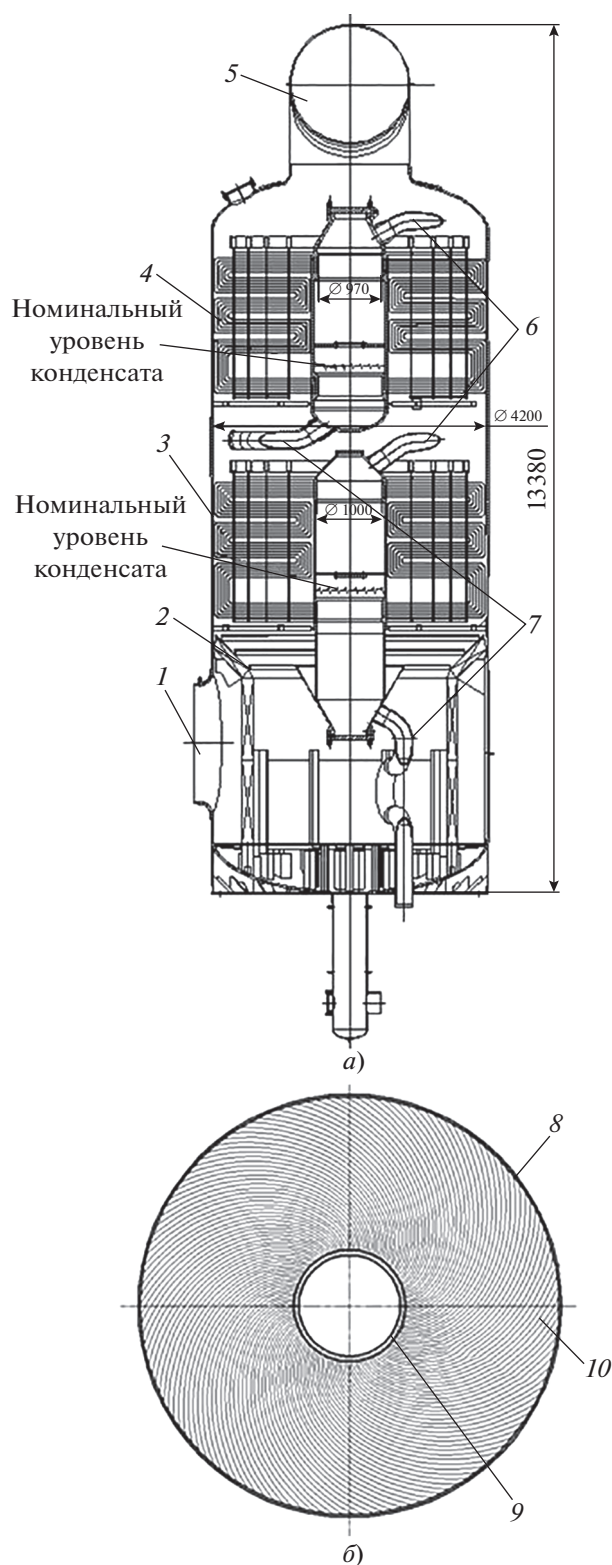


Рис. 3. Продольный (а) и поперечный (б) разрезы сепаратора-пароперегревателя с коллекторно-ширмовой трубной системой.

1 – патрубок входа насыщенного пара; 2 – жалюзийный сепаратор; 3, 4 – пароперегреватель первой и второй ступени перегрева; 5 – патрубок выхода перегретого пара; 6 – подвод греющего пара; 7 – отвод конденсата; 8 – корпус; 9 – коллектор; 10 – ширма

внутренним диаметром 1800 мм в кольцевую раздающую камеру, из которой равномерно распределяется по сепарационным жалюзийным блокам. Слив сепарата из сепарационных блоков производится по индивидуальным каналам через гидрозатворы в патрубок, расположенный на нижнем днище корпуса, а из него – в общий для всех СПП-ШН сепаратосборник.

Осушенный пар с влажностью менее 0.5% поступает в ступени ПП, где оставшаяся влага испаряется, а пар перегревается. Отвод перегретого пара из СПП-ШН осуществляется через патрубок, закрепленный в центре верхнего эллиптического днища корпуса.

Трубный пучок каждой ступени пароперегревателя выполняется на одном участке, совмещающем зоны конденсации пара и охлаждения конденсата. Благодаря W-образной форме труб с оребрением на горизонтальных участках высота трубного пучка пароперегревателя увеличивается незначительно. В результате при увеличении длины труб и неизменной теплообменной площади поверхности существенно сокращается количество труб в ширме. Трубный пучок ступени пароперегревателя состоит из 144 ширм. В плане ширмы расположены в виде эвольвенты (или спирали Архимеда) (см. рис. 3, б). На горизонтальных участках трубы размещены в коридорном порядке. Для дистанционирования ширм концы горизонтальных дистанционирующих планок ширм закрепляют в бандажах снаружи трубного пучка и в пазах кожуха, расположенного снаружи коллектора. Выделение зоны охлаждения конденсата осуществляется путем поддержания уровня конденсата в коллекторе, который является конденсатосборником, и в трубах на одном из вертикальных участков U-образногогиба (как сообщающиеся сосуды). Вертикальный участок труб в районе уровня конденсата выполняется с увеличенной высотой для обеспечения постоянства температуры нагреваемого пара и охлаждаемого конденсата при колебании уровня.

В коллекторе между участками закрепления концов труб расположена кольцевая перегородка со съемной крышкой, делящая коллектор на камеру подвода греющего пара и конденсатосборник. Подвод греющего пара к ПП и отвод охлажденного конденсата осуществляются в каждой ступени ПП одним трубопроводом. Для поддержания уровня конденсата в конденсатосборнике из камер подвода греющего пара и конденсатосборника выведены трубки к датчику уровня, который управляет регулирующим клапаном, установленным на трубопроводе отвода конденсата из конденсатосборника-коллектора.

Внутри труб над уровнем конденсата происходит конденсация греющего пара, ниже уровня конденсата – охлаждение конденсата. Охлаждение на-

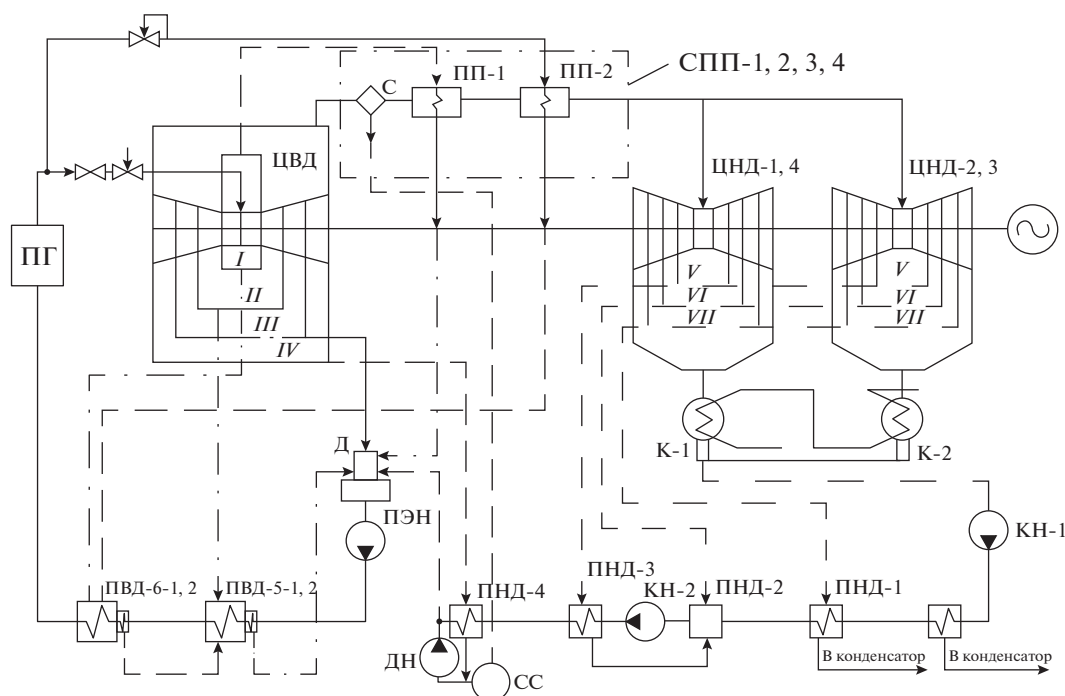


Рис. 4. Схема включения СПП-ШН в тепловую схему турбоустановки К-1200-6.8/50. Обозначения см. рис. 2

чинается на вертикальном участке труб, продолжается на колене, в котором возникает вторичная циркуляция в поперечном сечении, переходящая на горизонтальный участок труб охлаждения конденсата. Охлажденный конденсат из ПП-2 самотеком сливается в ПВД-6, а из ПП-1 – в деаэрактор и далее по установленной схеме отсасывается в конденсатор турбины.

Для возможности проведения текущих осмотров и ремонтов коллекторы ступеней пароперегревателей и корпус СПП-ШН снабжены люками-лазами диаметром 400 (500) мм.

Основные характеристики СПП-К и СПП-ШН, а также результаты теплогидравлических расчетов и расчетов по сепарации пара приведены в табл. 2. Расчеты по сепарации пара и теплогидравлические расчеты СПП-ШН по трактам конденсации и охлаждения конденсата греющего пара в трубах и нагрева промежуточного пара на оребренных поверхностях выполнены по общепринятым методикам [2, 3]. Все расчетные параметры соответствуют исходным техническим требованиям.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СПП

Высокая надежность СПП-ШН при их эксплуатации в сравнении с СПП-К достигается благодаря следующим конструктивным особенностям.

Пароперегреватели ПП-1 и ПП-2 выполнены единым трубным пучком по тракту греющего пара, в отличие от СПП-К, в котором трубный пучок каждой ступени пароперегревателей состоит из 4 индивидуальных секций по тракту греющего пара, а каждая секция – из 55 индивидуальных кассет. При этом секции каждого пароперегревателя соединены с кассетами индивидуальными внутрикорпусными трубопроводами по греющему пару и его конденсату.

Между W-образными теплообменными трубами в ширме и в ширмах в трубном пучке обеспечена хорошая компенсация температурных расширений.

В корпус СПП-ШН встроены индивидуальные конденсаторосборники для ПП-1 и ПП-2, в отличие от СПП-К, которые комплектуются четырьмя отдельно стоящими конденсаторосборниками (по одному конденсаторосборнику на два СПП-К каждой ступени ПП) с арматурой и трубопроводами их обвязки.

В каждой ступени ПП подвод греющего пара осуществляется по одному трубопроводу, отвод конденсата – также по одному трубопроводу. В СПП-К в каждой ступени ПП подвод греющего пара происходит по четырем трубопроводам, отвод конденсата – также по четырем трубопроводам.

В каждой ступени ПП отсутствуют дыхательные линии, трубопроводы рециркуляции греющего пара, трубопроводы, соединяющие камеры

Таблица 2. Геометрические, режимные и технологические показатели сепараторов-пароперегревателей с каскадной и коллекторно-ширмовой трубными системами для турбоустановки К-1200-6.8/50 (АЭС-2006)

Показатель	Тип СПП	
	СПП-К	СПП-ШН
Диаметр корпуса внутренний, мм	4000	4200
Диаметр аппарата максимальный (условный для СПП-К), мм	7200	4260
Высота аппарата, м	21.45	13.38
Число:		
индивидуальных секций	4/4	Единый пучок
в пароперегревателе, параллельно		
включенных по греющему пару		
и конденсату греющего пара		
камер греющего пара	4/4	1/1
в пароперегревателе		
камер конденсата греющего пара	4/4	1/1
в пароперегревателе		
кассет в секции	55/55	0/0
кассет в пароперегревателе	$55 \times 4 = 220/220$	0/0
труб подвода греющего пара от камер	$4 \times 55 = 220/220$	0/0
секций к камерам кассет		
в пароперегревателе		
труб отвода конденсата от камер кассет	$55 \times 4 = 220/220$	0/0
к камерам секций в пароперегревателе		
трубопроводов рециркуляции части	4/4	0/0
греющего пара		
дыхательных трубопроводов	4/4	0/0
отдельно стоящих конденсатосборников	2/2	0/0
для дренажа конденсата из СПП (на энергоблок)		
конденсатных насосов для закачки	1	0
конденсата греющего пара ПП-2		
в смеситель после ПВД-6		
теплообменных труб в пароперегревателе	8140/8140	1584/1584
Площадь поверхности теплообмена, м ²	Нет данных	1310/1310
Теплопередающая площадь поверхности,	0.45/0.45	0.063/0.063
отключаемая при течи одной трубы, %		
Влажность пара на выходе из сепаратора, %	0.5	0.5
Температурный напор на входе	71.4/67.4	14.5/12.5
нагреваемого пара в пароперегреватель, °С		
Температура нагреваемого пара на выходе	214.1/270.5	218/272.7
из пароперегревателя, °С		
Температурный напор на выходе	14.3/11.0	10.4/8.7
нагреваемого пара из пароперегревателя, °С		
Гидравлическое сопротивление аппарата по	15800	17720
тракту нагреваемого пара, Па		

Таблица 2. Окончание

Показатель	Тип СПП	
	СПП-К	СПП-ШН
Необходимый расход греющего пара с продувкой от расхода на входе в каждый пароперегреватель в целях сдувки неконденсирующихся газов, %	10.0/10.0	0/0
Увеличение мощности турбоустановки с учетом гидравлического сопротивления по тракту нагреваемого пара (без учета потерь мощности с продувкой), кВт	0	3318.2
Потери мощности турбоустановки с продувкой пара в целях сдувки неконденсирующихся газов, МВт	13.48	0
Масса СПП с конденсатосборниками на энергоблок (без массы трубопроводов обвязки), т	$(221 \times 4) + (7 \times 2) + (16 \times 2) = 930$	$114 \times 4 = 456$
Размещение сепаратора-пароперегревателя относительно площадки обслуживания турбины	<i>Над</i> площадкой обслуживания на 7.2 м	<i>Под</i> площадкой обслуживания
Транспортабельность по железной дороге единым блоком заводской готовности	Нет	Да
Число основных транспортабельных блоков	19	1

Примечание. Значения в числителе приведены для ПП-1, в знаменателе – для ПП-2.

секций греющего пара и конденсата с камерами кассет греющего пара и конденсата, и сварные швы приварки трубопроводов к трубным доскам.

Подвод греющего пара к теплопередающей поверхности ступени ПП и отвод конденсата греющего пара осуществляются в один этап вместо двух этапов подвода пара и трех этапов отвода конденсата в СПП-К.

Число теплообменных труб и сварных швов приварки труб в коллекторе сокращено в 5 раз по сравнению с числом труб и сварных швов в трубных досках кассет СПП-К.

Основные узлы пароперегревателей СПП-ШН (коллекторы, фланцевые разъемы, закрепление труб в коллекторе развальцовкой и сваркой торцов) по конструкции, составу конструкционных материалов, технологии изготовления и ремонту идентичны соответствующим узлам парогенераторов ПГВ-440 и ПГВ-1000М, отработанным до высокой надежности за более чем 40-летний период их эксплуатации на площадках АЭС.

Зона охлаждения конденсата расположена в каждой ступени пароперегревателя.

Целью введения зоны охлаждения конденсата греющего пара в СПП-ШН является повышение технико-экономических показателей паротурбинной установки и, в частности, ее тепловой экономичности и надежности. Выделяющиеся при конденсации греющего пара газы растворяются в турбулентном потоке охлаждаемого конденсата, движущегося со скоростью, значительно превы-

шающей скорость относительного движения фаз (жидкости и газа), и при нарастающем снижении температуры потока по сравнению с температурой насыщения (примерно 50°C). Это создает благоприятные условия для растворения газов в конденсате (с понижением температуры растворимость газов увеличивается). При неполном растворении газы вместе с охлажденным конденсатом отводятся в один из ПВД, а далее из ПВД по установленной схеме отсасываются в конденсатор турбины.

Опубликованные данные по растворимости позволяют сделать вывод о полноте растворения неконденсирующихся газов в охлаждаемом конденсате греющего пара промежуточного пароперегревателя. В то же время очевидна необходимость экспериментальной проверки этого положения после принятия решения о внедрении предлагаемого коллекторно-ширмового аппарата с зоной охлаждения конденсата.

Благодаря растворению газов в охлаждаемом конденсате устраняется теплогидравлическая неравномерность при работе пароперегревателей. Тем самым исключается возможность образования парогазовых пробок, которые приводят к уменьшению температуры нагреваемого пара и КПД турбоустановки, и циклических термопульсаций, вызывающих высокие температурные напряжения и усилия в трубах и узлах заделки их в трубных досках кассеты.

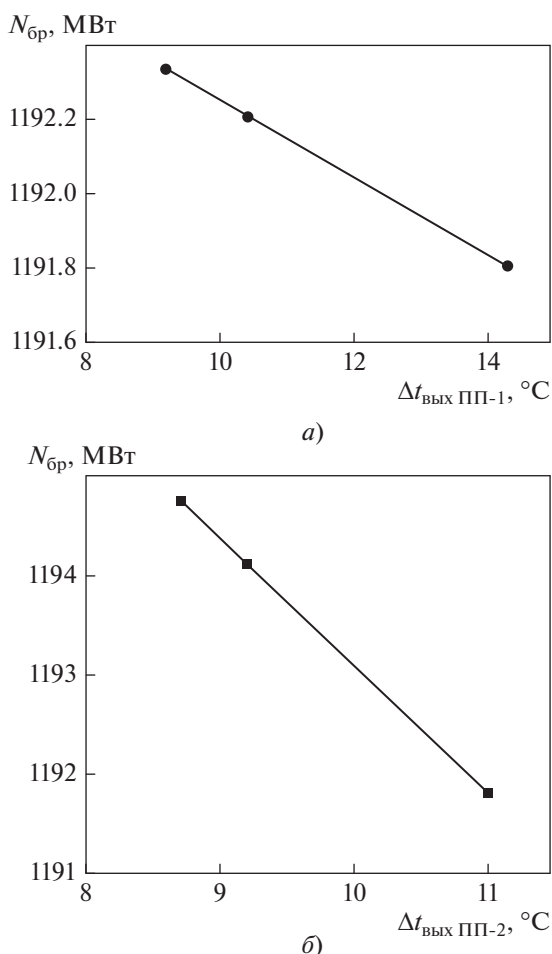


Рис. 5. Зависимость электрической мощности (брутто) турбоустановки К-1200-6.8/50 от температурного напора на выходе нагреваемого пара из ПП-1 (а) и ПП-2 (б) при постоянном температурном напоре на выходе нагреваемого пара 11.0°C из ПП-2 (а) и 14.3°C из ПП-1 (б) и постоянных минимальных температурных напорах в охладителях конденсата и пара 14.5°C в ПП-1 и 12.5°C в ПП-2

Наряду с этим охлаждение конденсата и образование газов в охлаждаемом конденсате обеспечивают:

снижение потерь тепловой мощности турбоустановки, так как отпадает необходимость в продувке греющим паром трубных пучков ПП-1 и ПП-2;

увеличение электрической мощности турбоустановки за счет использования тепла охлажденного конденсата в ПП-1 и ПП-2;

улучшение условий работы арматуры и трубопроводов трактов дренажа охлажденного конденсата из конденсатосборников ПП-1 и ПП-2 (без кавитации), что позволяет выполнять трубопроводы из углеродистой стали вместо нержавеющей;

исключение из тепловой схемы конденсатного насоса с гидротурбинным приводом.

Применение СПП-ШН дает возможность увеличить электрическую мощность турбоустановки К-1200-6.8/50 на 3.318 МВт (см. табл. 2) при нагреве пара и охлаждении конденсата в ПП-1 и ПП-2 с учетом гидравлического сопротивления тракта нагреваемого пара.

В табл. 3 приведены данные расчета электрической мощности брутто турбоустановки $N_{\text{брутто}}$ (далее в подстрочном индексе везде “бр”), цилиндров высокого и низкого давления $N_{\text{ЦВД бр}}$ и $N_{\text{ЦНД бр}}$, изменения электрической мощности брутто турбоустановки $\Delta N_{\text{бр}}$ в зависимости от температурного напора нагреваемого пара на входе в ПП-1 $\Delta t_{\text{вх ПП-1}}$ и ПП-2 $\Delta t_{\text{вх ПП-2}}$ и выходе из ПП-1 $\Delta t_{\text{вых ПП-1}}$ и ПП-2 $\Delta t_{\text{вых ПП-2}}$. Анализируя рис. 2, 4 и данные табл. 3, можно сделать вывод, что охлаждение конденсата в ПП-1 и ПП-2 по схеме, представленной на рис. 4, в режиме 3 обеспечивает увеличение электрической мощности турбоустановки К-1200-6.8/50 на 346.66 кВт по сравнению со схемой, приведенной на рис. 2, в режиме 1 и на 2557.66 кВт по сравнению с классической схемой на рис. 4 в режиме 2.

Анализ рис. 5 показывает, что при неизменных остальных параметрах электрическая мощность турбоустановки увеличивается на 103.7 кВт при нагреве пара на 1°C в ПП-1 и на 1283.5 кВт при нагреве пара на 1°C в ПП-2.

СПП-ШН имеет высокую ремонтпригодность благодаря размещению на нижнем и верхнем днищах корпуса аппарата и коллекторов специальных люков-лазов, которые обеспечивают обслуживающему персоналу доступ внутрь корпуса и коллекторов для проведения ревизии и ремонта внутрикорпусных и внутриколлекторных устройств, что делает возможным качественный ремонт и эргономичное глушение поврежденных труб (одна отглушенная труба соответствует 0.063% площади поверхности ступени пароперегревателя).

Для обнаружения поврежденных теплообменных труб после останова энергоблока производится установка специального устройства для отделения внутриколлекторного пространства ПП-1 от межтрубного пространства СПП-ШН. Далее межтрубное пространство заполняется водой без напора (гидростатический способ). Дефектная труба обнаруживается изнутри коллекторов в результате протечки воды. При конструировании промежуточных пароперегревателей СПП-ШН площади поверхностей нагрева были увеличены в соответствии с требованиями [3] на 10% по сравнению с результатами расчетов. При отглушении труб, площадь поверхности которых соответствует необходимому запасу, показатели работы пароперегревателей приближаются к расчетным значениям.

В СПП-К на корпусе и торцах камер секций пароперегревателей также расположены люки-лазы. Однако при течи одной трубы в какой-либо

Таблица 3. Результаты расчета электрической мощности турбоустановки К-1200-6.8/50 (АЭС-2006) для различных режимов

Номер режима	$\Delta t_{\text{вых ПП-1/}} / \Delta t_{\text{вых ПП-2}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta t_{\text{вх ПП-1/}} / \Delta t_{\text{вх ПП-2}}, ^\circ\text{C}$	$N_{\text{ЦВД бр}} / N_{\text{ЦНД бр}}, \text{кВт}$	$N_{\text{бр}}, \text{кВт}$	$\Delta N_{\text{бр}}, \text{кВт}$	Примечание
1*	14.3/11.0	71.4/67.4	550 157.23/ 641 300.80	1 191 458.03	0	Конденсат греющего пара из ПП-2 закачивается в смеситель, расположенный за ПВД-6, из ПП-1 дренируется в ПВД-5
2**	14.3/11.0	71.4/67.4	547 180.9/ 642 066.09	1 189 247.03	-2211.0	Дренаж конденсата греющего пара из ПП-2 в ПВД-6, из ПП-1 в ПВД-5
3	14.3/11.0	14.5/12.5	550 593.10/ 641 211.49	1 191 804.59	346.66	Дренаж охлажденного конденсата из ПП-2 в ПВД-6, из ПП-1 в деаэрактор
4	10.4/11.0	14.5/12.5	551 133.22/ 641 075.80	1 192 209.03	751.0	Так же, как в варианте 3
5	9.2/11.0	14.5/12.5	551 300.89/ 641 033.67	1 192 334.56	876.53	Так же, как в варианте 3
6	14.3/9.2	14.5/12.5	549 892.24/ 644 222.70	1 194 114.94	2656.91	Так же, как в варианте 3
7	14.3/8.7	14.5/12.5	549 697.91/ 645 057.62	1 194 755.53	3297.5	Так же, как в варианте 3
8	10.4/8.7	14.5/12.5	550 233.97/ 644 922.22	1 195 156.19	3698.16	Так же, как в варианте 3
9	14.3/9.2	71.4/67.4	549 343.49/ 644 161.34	1 193 507.83	2049.80	Конденсат греющего пара из ПП-2 закачивается в смеситель, расположенный за ПВД-6, а из ПП-1 дренируется в ПВД-5

Примечание. Электрическая мощность турбоустановки в режимах 3–9 рассчитана без учета изменения гидравлического сопротивления тракта нагреваемого пара.

* Схема включения СПП-К в тепловую схему турбоустановки К-1200-6.8/50 с закачкой конденсата из ПП-2 конденсатным насосом с гидроприводом в смеситель, расположенный за ПВД-6 (применяется только на ЛМЗ).

** Классическая схема включения СПП в тепловую схему турбоустановки К-1200-6.8/50 с дренажом конденсата из ПП-2 в ПВД-6.

ступени пароперегревателя для ремонта отключается ступень пароперегревателя по греющему пару и вскрываются камеры греющего пара и конденсата секций ступени пароперегревателя. После этого выполняются поиск и отглушение кассеты с поврежденной трубой (0.45% общей площади теплопередающей поверхности ступени пароперегревателя) при работающем энергоблоке АЭС с последующим включением отключенной ступени пароперегревателя в работу.

Для СПП-ШН, в сравнении с СПП-К, характерны меньшие трудоемкость при изготовлении, стоимость и сроки монтажных работ, которые достигаются благодаря выполнению одного трубопровода подвода греющего пара и одного трубопровода отвода конденсата от каждой ступени ПП, встроенных в корпус конденсатосборников, и, соответственно, исключению из поставки че-

тырех отдельно стоящих конденсатосборников с арматурой и трубопроводами обвязки. Кроме того, поставка СПП-ШН на АЭС производится одним блоком заводской готовности, в отличие от СПП-К, который поставляется 19 отдельными блоками (ПП-1 и ПП-2, сепаратор, 8 камер подвода греющего пара к ПП-1 и ПП-2, а также 8 камер отвода конденсата от них) с последующей их сборкой и испытаниями на площадке АЭС.

Система промежуточной сепарации и перегрева пара на базе СПП-ШН со встроенными в корпус конденсатосборниками занимает меньшую площадь машинного зала. Это связано с тем, что при наружном диаметре корпуса СПП-ШН 4260 мм для его установки в машинном зале требуется ячейка меньшей площади в отличие от СПП-К. Для размещения сепаратора СПП-К необходима ячейка значительно больших размеров, так как условный диа-

метр аппарата (диаметр описанной окружности) равен 7200 мм из-за присоединяемых к корпусу с наружной его стороны по всей высоте восьми камер подвода греющего пара и восьми камер отвода конденсата греющего пара из ступеней ПП, а также лестниц и площадок для обслуживания камер (см. рис. 1). К этому следует добавить площадь, занимаемую четырьмя отдельно расположенными конденсатосборниками с арматурой и трубопроводами обвязки.

Сепараторы СПП-ШН и СПП-К устанавливаются на высоте 1.8 м от нулевой отметки, при этом габариты СПП-ШН позволяют разместить его под площадкой обслуживания турбины, в отличие от СПП-К, который с трубопроводом нагретого пара выступает над площадкой обслуживания турбины на 7.2 м.

РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОЕКТА ПО СОЗДАНИЮ СПП-ШН

Работы по созданию аппаратов коллекторно-ширмового типа проводились с начала 80-х годов прошлого века во ВНИИАМ. Сотрудниками ВНИИАМ совместно со специалистами НПО «ЦНИИТмаш» и Атоммаш разработали и апробировали технологии изготовления плоских и эвольвентных ширм из U- и W-образных гладких и оребренных труб и сборки их с коллектором для различного теплообменного оборудования. В 2010–2012 гг. по заказу АО «Концерн Росэнергоатом» во ВНИИАМ был разработан технический проект СПП-Ш [4] с экспериментальным обоснованием для турбоустановки К-1200-6.8/50 применительно к проекту АЭС-2006.

Разработанный СПП-Ш рекомендован к внедрению Научно-техническим советом при Государственной корпорации по атомной энергетике «Росатом» и комиссией центрального аппарата АО «Концерн Росэнергоатом».

В настоящее время по заказу АО «Концерн Росэнергоатом» в НИЦ «Курчатовский институт» совместно с АЭП, ЛМЗ и ЦКТИ выполняется концептуальная проработка паротурбинной установки двухконтурной ЯЭУ ВВЭР-СКД с учетом возможности использования СПП-ШН.

ВЫВОДЫ

Сопоставление вертикальных сепараторов-пароперегревателей с коллекторно-ширмовой и каскадной трубными системами, включенных в состав турбоустановки К-1200-6.8/50 проекта АЭС-2006, показало следующее.

1. СПП-ШН имеют высокую надежность в эксплуатации, которая обеспечивается благодаря:

единому трубному пучку в ПП-1 и ПП-2 по греющему пару;

хорошей компенсации температурных расширений W-образных труб в ширме и ширм в трубном пучке;

уменьшению количества теплообменных труб и сварных швов приварки труб к коллектору;

встроенным в корпус индивидуальным конденсатосборникам для ПП-1 и ПП-2;

идентичности основных узлов пароперегревателей по конструкции, составу конструкционных материалов, технологии изготовления и ремонту соответствующим узлам парогенераторов ПГВ-440 и ПГВ-1000М, отработанным до высокой надежности за более чем 40-летний период их эксплуатации на площадках АЭС.

2. В СПП-ШН организованы зоны охлаждения конденсата в каждой ступени пароперегревателя с растворением в охлажденном конденсате газов, выделившихся на участке конденсации пара. Целью введения зоны охлаждения конденсата греющего пара является повышение технико-экономических показателей паротурбинной установки и, в частности, ее тепловой экономичности (электрической мощности) и надежности.

3. Охлаждение конденсата в ПП-1 и ПП-2 обеспечивает увеличение электрической мощности турбоустановки на 2557.56 кВт по сравнению с классической схемой включения СПП в тепловую схему турбоустановки с дренажом конденсата насыщенного пара из ПП-2 в ПВД-6, из ПП-1 в ПВД-5.

4. Исключение в СПП-ШН продувки и потерь греющего пара в ПП-1 и ПП-2 с продувкой обеспечивает дополнительное увеличение электрической мощности турбоустановки.

5. Применение СПП-ШН позволяет повысить электрическую мощность турбоустановки на 3318 МВт за счет увеличения нагрева пара и охлаждения конденсата в ПП-1 и ПП-2 с учетом гидравлического сопротивления тракта нагретого пара.

6. СПП-ШН имеют высокую ремонтпригодность. Удобство технического обслуживания СПП-ШН достигается благодаря возможности доступа через люки-лазы внутрь корпуса и к трубам, закрепленным в цилиндрических вертикальных коллекторах, что позволяет проводить эргономичное глушение неисправных труб.

7. СПП-ШН устанавливаются под площадкой обслуживания турбины.

8. СПП-ШН может быть транспортирован по железной дороге как один блок заводской готовности, в отличие от СПП-К, который поставляется 19 блоками.

9. Масса СПП-ШН с конденсатосборниками ПП-1 и ПП-2 меньше массы СПП-К в 2 раза.

10. Размеры машинного зала могут быть сокращены благодаря меньшей площади, занима-

емой СПП-ШН со встроенными конденсаторно-сборниками.

II. Благодаря перечисленным характеристикам СПП-ШН можно рассматривать в качестве перспективных аппаратов для действующих и проектируемых паротурбинных установок энергоблоков АЭС с ЯЭУ ВВЭР, которые позволяют существенно повысить конкурентоспособность отечественного атомного энергомашиностроения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мухачев В.Л., Десятун В.Ф., Назаров О.И. Оптимизация работы системы промперегрева турбины

К-500-60/3000 на основе продувки тракта греющего пара второй ступени перегрева СПП-500-1 // Труды ЦКТИ. 1992. Вып. 269. С. 87–93.

2. РТМ 108.020.107-84. Сепараторы-пароперегреватели турбин АЭС. М.: Минэнергомаш, 1986.
3. РД 24.035.05-89. Тепловой и гидравлический расчет теплообменного оборудования АЭС. М.: Минэнергомаш, 1989.
4. Пат. РФ № 2521699. Сепаратор-пароперегреватель (приоритет от 13.11.2012 г.) / А.С. Шамароков, В.И. Жингель, Л.М. Андреев, О.А. Авдеев, Д.А. Дробченко // Б.И. 2018. № 34.

The New Generation of Separator-Superheaters for Steam-Turbine Units of Nuclear Power Plants (NPP) with VVER-Reactors

A. S. Shamarokov^{a, *}, V. M. Zorin^b, S. B. Pustovalov^c, and E. A. Mikhushkina^b

^a Research and Production Company EKIP, Moscow, 111020 Russia

^b National Research University Moscow Power Engineering Institute (NRU MPEI), Moscow, 111250 Russia

^c National Research Center Kurchatov Institute, Moscow, 123182 Russia

*e-mail: rasa7@mail.ru

Abstract—Results are presented from a comparison of the design, weight, size, and process characteristics of separator-superheaters (SSH) for steam-turbine units at nuclear power plants with pressurized water power reactors (VVER), which are based on a cartridge-type tube system (SSH-CTS) and are currently used, with a promising apparatus based on a manifold-platen tube system (SSH-MPS) with provisions for the heating-steam condensation and the removal of noncondensable gases released during condensation. The SSH-MPS separator considered in the article differs from the SSH-P, developed at the beginning of the 21st century by specialists of VNIAM, by the design of the tube bundle in the superheater stages and the operation of the heating-steam condensation paths. Elimination of the thermohydraulic nonuniformity in and stable and reliable operation of tube bundles is SSH-MPS superheaters without temperature fluctuations and steam-gas plugs are attained due to dissolution of the gases released during steam condensation in the condensate cooling section. The tube bundles of each stage of the SSH-MPS superheater is a single section where steam condensation and condensate cooling are combined. This design eliminates all heating-steam losses since purging is not provided. In addition, heating-steam flowrates in superheater stages decrease due to the condensate cooling, and the effectiveness of the apparatus and the efficiency of the turbine unit increase. Application of SSH-MPS will considerably decrease the footprint of the system of intermediate separation and reheat of steam in the turbine hall and will also reduce the apparatus's metal intensity by half as compared to the SSH-CTS system. The outlined capabilities of the SSH-MPS system are essential in the reconstruction (upgrading) of existing and development of new power units at NPPs and optimization of design, process, and space-layout solutions for intermediate separation and reheat of steam systems for operating and newly designed steam-turbine units with a corresponding reduction in annual reduced costs, including CAPEX and OPEX.

Keywords: steam-turbine unit of NPP, separator-superheater, condensation, vertical cylindrical manifold, manifold-platen tube system, cartridge tube system, steam vent, thermohydraulic instability