

УДК 621.311.25

### МОДЕРНИЗАЦИЯ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ СЕПАРАТОРОВ-ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЕЙ НА ЛЕНИНГРАДСКОЙ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

М.Ю. Егоров

Представлены результаты испытаний модернизированных сепараторов-пароперегревателей СПП-500-1 с жалюзийными пакетами «Powervane», разработанными германской фирмой Balcke-Durg. Анализируются результаты определения влажности нагреваемого пара на выходе из сепарационной части СПП и его температуры между ступенями перегрева.

**Ключевые слова:** сепаратор-пароперегреватель, сепарация, теплообмен, влажность, температура, жалюзийные пакеты.

#### Введение

В состав турбоустановок АЭС с реакторами РБМК-1000, работающих на насыщенном паре, входят промежуточные сепараторы-пароперегреватели (СПП).

Однокорпусные вертикальные аппараты СПП-500-1 включают входную камеру (прием влажного пара из цилиндра высокого давления (ЦВД) и отделение крупнодисперсной влаги от пара), сепарационную часть (дальнейшая более тонкая сепарация влаги) и перегревательную часть (перегрев осушенного пара до температуры, обеспечивающей надежную работу цилиндра низкого давления (ЦНД)). Сепаратор расположен в верхней части аппарата, а в нижней – две ступени перегревателя-теплообменника, в котором греющий конденсируемый пар высокого давления передает теплоту пару низкого давления.

Одним из основных требований, предъявляемых к СПП, является эффективная и надежная работа сепарационных устройств на всех режимах. Признаки повышенного уровня влажности пара у за сепарационными блоками (рис. 1) возникли с первых лет эксплуатации СПП-500-1 и связаны, по мнению автора, с особенностями конструкции сепарационной части в целом. Другие проблемы эксплуатации данных аппаратов и причины их возникновения были проанализированы в работе [1].

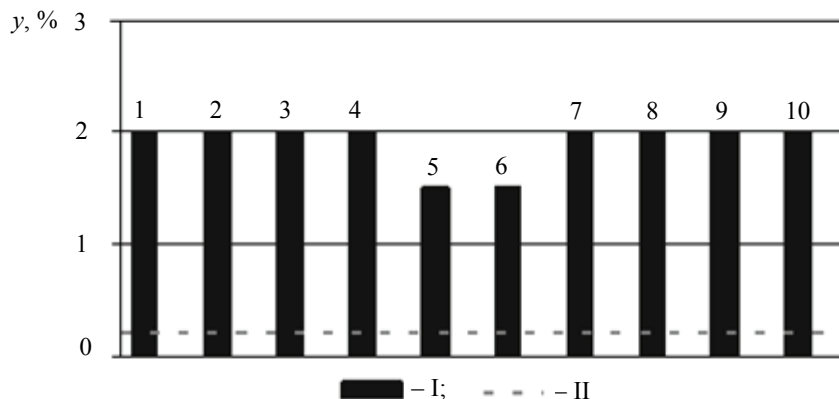


Рис. 1. Влажность  $y$  за сепарационными блоками на турбоустановках Смоленской АЭС (1–6) и Курской АЭС (7–10): I – значения по данным работы [2]; II – проектное значение

Цель настоящей работы, входящей в общий цикл исследований по тематике СПП, – анализ результатов проведенной модернизации и разработка предложений по дальнейшему совершенствованию аппаратов СПП-500-1, направленному на повышение надежности, экономичности и увеличение эффективности работы как СПП, так и турбоустановки и энергоблока с реактором РБМК-1000 в целом.

#### Модернизация сепарационной части СПП-500-1

Модернизация СПП-500-1 основана на замене отечественных жалюзийных сепарационных пакетов на жалюзийные пакеты типа «Powervane» фирмы Balcke-Durg. Также в совместном проекте Balcke-Durg и ОАО «НПО ЦКТИ» была изменена схема движения пара во входной камере, расположение сепарационных пакетов и системы коллекторов. Изменение конструкции сепарационной части обеспечило улучшение условий работы жалюзийных пакетов. Перегревательная часть модернизации не подвергалась.

Схема модернизированной СПП-500-1 выглядит следующим образом. Пар поступает во входную камеру 1 (рис. 2), образованную крышкой и дырчатым листом 2 с коническими лунками малой глубины 3, обеспечивающими сбор и отвод 4 (минуя жалюзи) крупнодисперсной влаги при минимуме гидравлического сопротивления. Выбор параметров отверстий, их конфигурации и шагов между отверстиями был основан на результатах экспериментального моделирования. Организован отдельный отвод влаги 5 (через отверстия 6), осаждающейся на стенках входной камеры, во внешний кольцевой коллектор. Из входной камеры пар направляется в 12 сепарационных блоков 7 типов А, В, С, D, E, F с пакетами «Powervane», представляющими собой наборы волнообразных профилей. Блоки расположены в кольцевом пространстве между корпусом и выходной трубой 11 и отличаются степенью перфорации металлических листов 8 на входе влажного пара, что обеспечивает определенное выравнивание потоков влажного пара через блоки. Наибольшей является площадь сечения перфорации блоков F, расположенных с противоположной стороны по отношению к входу пара во входную камеру 10. Блоки состоят из трех сепарационных пакетов типов I, II, III, также отличающихся степенью перфорации входных дырчатых листов в зависимости от изменения давления пара по высоте сепарационного блока вследствие коллекторных эффектов. Подбор степени перфорации входных листов снизил угловую неравномерность удельного расхода пара на входе в сепарационные пакеты «Powervane». Отсепарированная на жалюзи влага стекает во внутренний сливной кольцевой коллектор 9 и далее – в сепараторосборник.

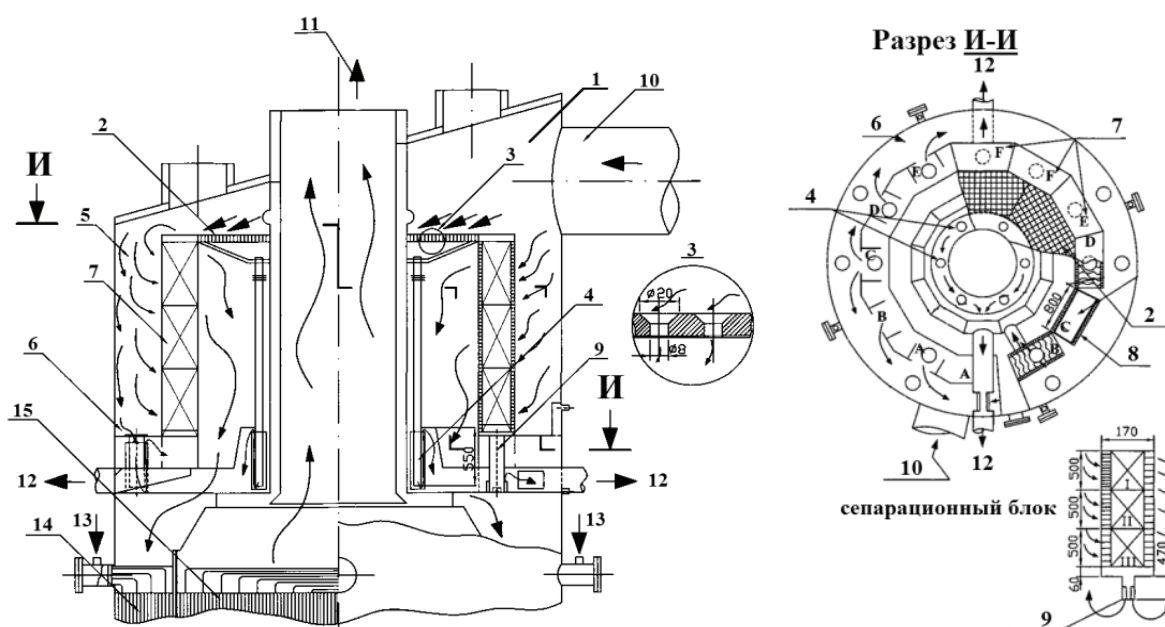


Рис. 2. Общий вид модернизированной сепарационной части СПП-500-1: 1 – входная камера; 2 – дырчатый лист; 3 – лунки; 4 – отверстия для отвода сепарата от перфорированного листа, 6 шт.; 5 – отвод влаги от стенок входной камеры; 6 – отверстия отвода сепарата во внешний кольцевой коллектор, 6 шт.; 7 – сепарационные блоки; 8 – входной дырчатый лист сепарационного блока; 9 – отверстия для отвода сепарата от сепарационных пакетов во внутренний кольцевой коллектор, 12 шт.; 10 – вход влажного пара из ЦВД; 11 – выход перегретого пара в ЦНД; 12 – отвод сепарата в сепараторосборник; 13 – подвод греющего пара второй ступени; 14 – модули первой ступени; 15 – модули второй ступени

Успех модернизации СПП-500-1 был в значительной части обусловлен созданием отдельного отвода влаги, осаждающейся на стенках входной камеры, отвода влаги со дна входной камеры через перфорированный лист, отверстия которого располагались в центрах сферических лунок. Снижение влажности пара на входе в сепарационные блоки и улучшение распределения потока по периметру СПП уменьшило нагрузку на жалюзи и обеспечило высокую эффективность осушения потока пара.

#### Результаты испытаний модернизированных СПП-500-1

Ниже представлены результаты испытаний модернизированных аппаратов СПП-500-1 турбоустановки № 7 четвертого блока Ленинградской АЭС, проведенные в мае–июне 2010 г. В ходе этих испытаний были получены данные по распределению по периметру аппарата влажности отсепарированного пара и его температуры в поворотной камере (после первой ступени перегрева), а также расхода сепарата нагреваемого пара и конденсата греющего пара первой ступени.

**Определение влажности нагреваемого пара за сепарационными блоками.** В ходе проведенных ранее работ по модернизации СПП была разработана и внедрена система определения влажности нагреваемого пара на выходе из сепарационных блоков с помощью дроссель-калориметра конструкции ОАО «НПО ЦКТИ». Ввод зондов для отбора влажного пара осуществлялся через люк-лаз, снабженный модернизированной крышкой.

Для определения искомой влажности пара использовался простой и удобный метод – дросселирование влажного пара из двухфазной области в область перегретого пара.

В ходе испытаний были определены значения влажности отсепарированного пара на четырех СПП-500-1 турбоустановки № 7. Для аппарата СПП-74 в таблице представлены результаты для двух серий опытов. Как видно из таблицы, имеет место соответствие результатов, полученных в I и II сериях испытаний (интервал – 25 дней).

	Значение влажности на определяемом участке					
	стенка	Е	D	В	С	низ С
I серия (05.2010 г.)	0,7	0,6	0,7	0,7	0,6	0,7
II серия (06.2010 г.)	0,4	0,5	0,6	0,7	0,6	0,7
Среднее значение	0,6					
Проектное значение	0,5					

Таблица. Результаты определения влажности у отсепарированного пара СПП-74, %

Анализ полученных данных показывает, что распределение влаги по периметру аппарата во всех четырех СПП носит достаточно равномерный характер. Кроме того, определение влажности у одного из блоков (С) с помощью двух отборов, расположенных на различной высоте, также показало достаточно равномерное распределение влажности по высоте парового пространства.

По результатам проведенных испытаний среднее значение влажности на выходе из сепарационных блоков по всем четырем СПП составило около 0,5%, что близко к проектному значению.

**Измерения температуры нагреваемого пара в поворотной камере.** В рамках данного исследования для оценки работы сепарационных блоков и модулей пароперегревателей первой ступени по периметру корпуса поворотной камеры СПП были установлены термометры сопротивления с длиной защитной гильзы 400 мм. В СПП-71 и СПП-73 было установлено по четыре термометра сопротивления, а в СПП-72 и СПП-74 – по пять.

Пароперегреватель СПП-500-1 состоит из двух ступеней перегрева. Теплообменная поверхность выполнена из жесткотрубных теплообменников – модулей. Первая ступень перегревателя расположена в периферийной части поперечного сечения аппарата. Греющий пар раздается по пароперегревательным модулям от двух входных камер, расположенных на противоположных сторонах корпуса СПП. Из-за особенностей трассировки труб разводки длина отдельных труб различается в несколько раз, что приводит к разверке температур по периметру поворотной камеры и повреждению труб разводки и модулей первой ступени перегрева. На рис. 3 представлены данные по количеству заглушенных модулей СПП-74 перед планово-предупредительным ремонтом, во время которого проводилась модернизация. В первой ступени СПП-74 было заглушено 32% модулей.

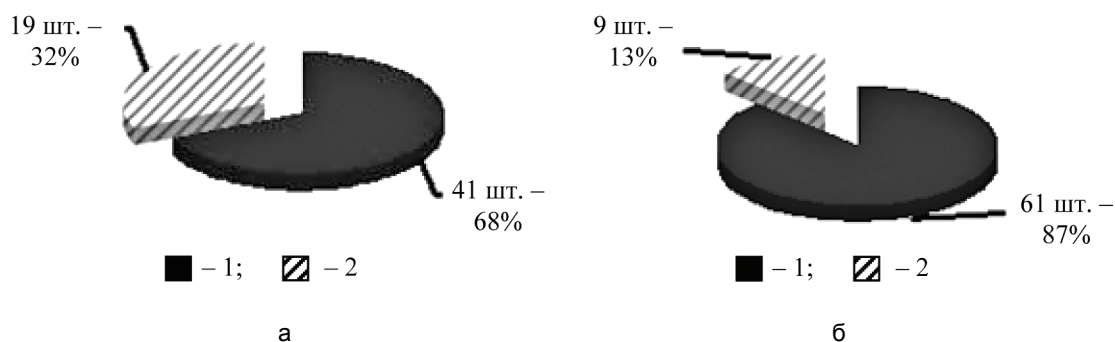


Рис. 3. Количество работающих (1) и заглушенных (2) модулей СПП-74: первая ступень (а), вторая ступень (б)

На рис. 4 приведены результаты измерения температуры  $t$  в поворотной камере СПП-74. Видно, что распределение температуры имеет два максимума. Это обстоятельство объясняется тем, что для групп модулей с более длинными линиями подвода расход греющего пара оказывается меньше, чем для коротких линий, и часть поверхности оказывается выключенной из теплообмена.

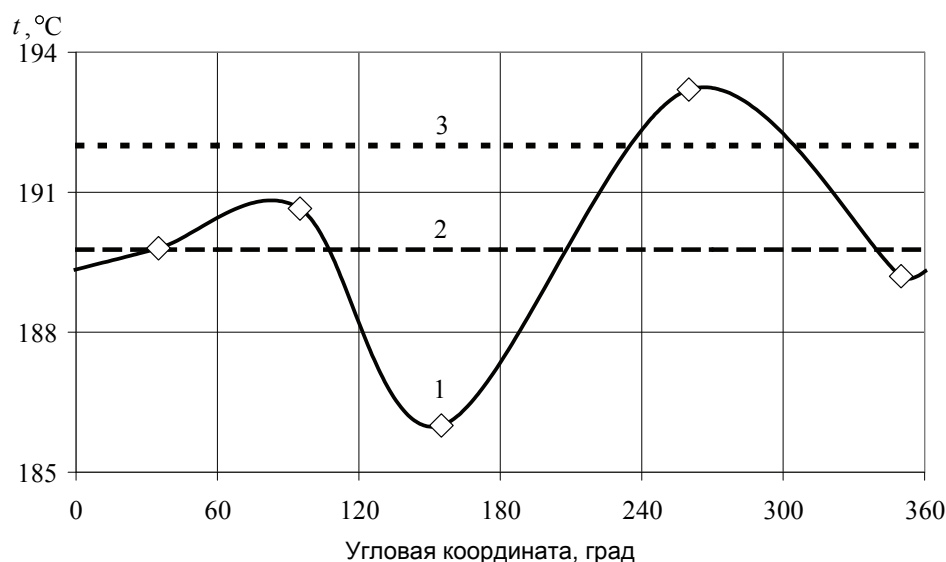


Рис. 4. Результаты измерения распределения температуры нагреваемого пара  $t$  в поворотной камере СПП-74: 1 – фактические значения температуры; 2 – среднее значение фактической температуры; 3 – проектное среднее значение температуры

**Измерения расхода сепарата и конденсата греющего пара первой ступени.** На СПП турбоустановки № 7 были проведены измерения расхода сепарата и конденсата греющего пара первой ступени с помощью ультразвукового расходомера РТ 878 фирмы GE Panametrics.

Перед каждым СПП установлен пленочный предсепаратор – дополнительное сепарационное устройство для отделения влаги со стенок трубопровода, подводящего нагреваемый пар к СПП. В ходе испытаний измерялись расходы сепарата на пленочных предсепараторах  $G_{пс}$ , результаты которых для предсепаратора СПП-74 приведены на рис. 5.

Испытания проводились на четвертом блоке Ленинградской АЭС группой специалистов ОАО «НПО ЦКТИ» (М.А. Готовский, М.Я. Беленький, М.А. Блинов, К.В. Соколов), Ленинградской АЭС (Г.А. Кайсин) с участием автора.

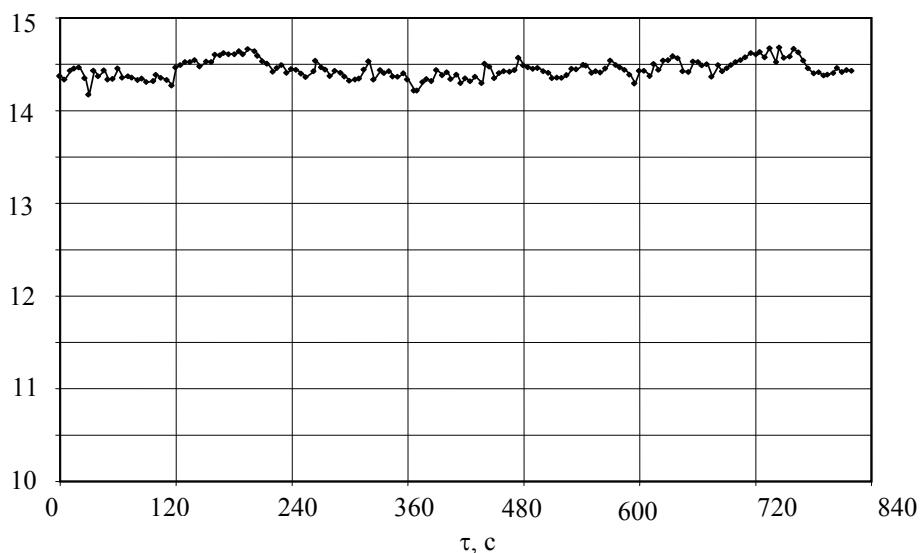


Рис. 5. Результаты измерения расхода сепарата предсепаратора СПП-74

### Заключение

Анализ результатов выполненных промышленных испытаний модернизированных аппаратов, позволяет сделать следующие выводы.

1. В результате проведенной модернизации путем замены сепарационных блоков старой конструкции на блоки с жалюзийными пакетами «Powervape» и изменения схемы движения нагреваемого пара удалось устранить неравномерность влажности по периметру и высоте парового пространства за сепарационными блоками, доведя ее значения до величин, близких к проектным.

2. Система определения влажности отсепарированного пара по периметру парового пространства и замера температурных полей в поворотной камере позволила существенно увеличить объем получаемой информации и обеспечила возможность выполнения более детального анализа исследуемых процессов.
3. Результаты определения влажности показали, что проведенная модернизация позволила снизить неравномерность распределения влажности по периметру и высоте парового пространства за сепарационными блоками, так что все ее замеренные значения оказались близкими к проектным.
4. Результаты измерения температуры в поворотной камере показали, что распределение температуры обусловлено тем обстоятельством, что разные группы перегревателей имеют различную длину линий подвода греющего пара.
5. Расчеты показывают, что одним из способов дальнейшего повышения температуры нагреваемого пара является шайбование труб подвода греющего пара, приводящее к выравниванию расходов.

#### **Литература**

1. Егоров М.Ю., Федорович Е.Д. Совершенствование системы промежуточной сепарации и перегрева влажнопаровых турбин АЭС: анализ теплогидравлических процессов в конструкциях сепараторов-пароперегревателей на основе опыта эксплуатации // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2007. – № 37. – С. 339–350.
2. Давиденко Н.Н., Соломеев В.А., Кругликов П.А. и др. Совершенствование технико-экономических показателей технологического оборудования действующих АЭС // Теплоэнергетика. – 2008. – № 1. – С. 14–16.

*Егоров Михаил Юрьевич*

– Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, аспирант, egorov12m2u@mail.ru