

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Choi E.-Y., Jeong S.** Electrochemical processing of spent nuclear fuels: an overview of oxide reduction in pyroprocessing technology. — *Progress in Nucl. Energy Mater. Intern.*, 2015, v. 25, p. 572—582.
2. **Kim I., Oh S., Im H. e.a.** Distillation of LiCl from the LiCl—Li₂O molten salt of the electrolytic reduction process. — *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 2013, v. 295, p. 1413—1417.
3. **Westphal B., Marsden K., Price J., Laug D.** On the development of a distillation process for electrometallurgical treatment of irradiated spent nuclear fuel. — *Nucl. Engng Technol.*, 2008, v. 40, p. 163—174.
4. **Choi E.-Y., Won C., Kang D.-S. e.a.** Production of uranium metal via electrolytic reduction of uranium oxide in molten LiCl and salt distillation. — *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 2015, v. 304, p. 535—546.
5. **Roine A.** HSC Chemistry 7.0 Thermochemical Database. Finland: Outokumpu Research Oy, 2009.
6. **Yaws C.** Thermophysical Properties of Chemicals and Hydrocarbons. Norwich, New York: William Andrew, 2008.
7. **Kang H., Choi E.-Y., Kim S.-W. e.a.** Distillation characteristics of LiCl—Li₂O electrolyte for UO₂ electrolytic reduction process. — *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 2016, v. 310, p. 1165—1171.

Поступила в Редакцию 8.10.18

УДК 621.311.25

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ СЕПАРАЦИОННОЙ ЧАСТИ СЕПАРАТОРОВ-ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЕЙ СМОЛЕНСКОЙ АЭС

Егоров М.Ю. (Санкт-Петербургский политехнический ун-т, г. Санкт-Петербург)
e-mail: mikhail.yu.egorov@gmail.com

Промежуточные сепараторы-пароперегреватели входят в состав турбоустановок АЭС. Однокорпусные вертикальные аппараты СПП-500-1 включают входную камеру — в нее поступает влажный пар из цилиндра высокого давления, крупнодисперсная влага сепарируется от пара, сепарационную часть, в которой происходит дальнейшая сепарация влаги, и перегревательную, в которой осушенный пар перегревается до температуры, обеспечивающей надежную работу цилиндра низкого давления. Сепаратор расположен в верхней части аппарата, две ступени перегрева — в нижней. Пароперегревательная поверхность выполнена из жесткотрубных теплообменников-модулей. Первая ступень перегревателя расположена в периферийной части поперечного сечения аппарата. Греющий пар раздается по модулям от двух входных камер, расположенных на противоположных сторонах корпуса. Длина труб различается в несколько раз из-за особенностей разводки. Это приводит к различию температуры по периметру поворотной камеры, расположенной между первой и второй ступенью пароперегревателя, и повреждению модулей и трубок разводки первой ступени перегрева.

Одно из требований, предъявляемых к сепараторам-пароперегревателям, — эффективная и надежная работа сепарационных устройств во всех режимах работы энергоблока АЭС [1].

Цель работы — повышение эффективности работы сепараторов-пароперегревателей турбин АЭС.

Повышенная влажность пара за сепарационными блоками наблюдается с начала эксплуатации СПП-500-1. Так, средняя влажность пара за сепарационными блоками на Смоленской АЭС составляла более 1,8% [2] (рис. 1). Наибольшая влажность 2% отмечалась в аппаратах турбоустановок ТГ-1—ТГ-4 первых двух энергоблоков, т.е. выше проектной в 4 раза. Представляется, что это связано с особенностями конструкции сепарационной части.

Проведенные ранее исследования влажности нагреваемого пара в СПП-500-1 показали наличие крупнодисперсной влаги. Такие эффекты наблюдались на поверхности, противоположной входному ресиверу, и проявлялись уже

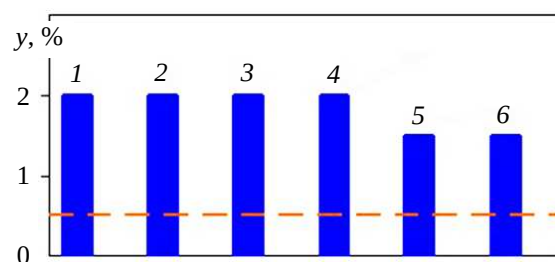


Рис. 1. Влажность пара у за сепарационными блоками СПП-500-1 турбоустановок ТГ-1—ТГ-6 Смоленской АЭС до модернизации [2] (■) и проектная (---): 1—6 — номер турбоустановки

при работе турбоустановки АЭС на мощности 300 МВт. С ростом мощности эффекты усиливались. Прохождение влаги через первую ступень перегрева наблюдалось при мощности более 350 МВт и усиливалось с ее ростом. Исследования температурного поля в поворотной камере позволили выявить зоны выноса крупнодисперсной влаги. Наличие крупнодисперсной влаги проявлялось в виде снижения температуры нагреваемого пара до 130—140 °С, близкой к температуре насыщения. Как показал опыт эксплуатации, наличие крупнодисперсной влаги приводит к повреждению трубок разводки греющего пара по модулям первой и второй ступеней перегрева и, как следствие, к вынужденному останову энергоблока АЭС [3].

Общая схема модернизации сепарационной части СПП-500-1. Цель модернизации СПП-500-1 — повышение эффективности работы и надежности сепараторов-пароперегревателей и турбоустановки в целом [4]. Модернизация заключалась в изменении схемы движения пара во входной камере, расположения сепарационных элементов и системы коллекторов, а также в установке жалюзийных устройств Powervane (Германия) [5]. Изменение конструкции сепарационной части улучшило условия работы жалюзийных устройств. Перегревательная часть модернизации не подвергалась, но были даны предложения по интенсификации теплообмена [1].

Проект модернизации СПП-500-1 реализован на Смоленской, Ленинградской и Курской АЭС [6] (рис. 2). Пар поступает во входную камеру, образованную крышкой и дырчатым листом с коническими лунками малой глубины. Лунки обеспечивают сбор и отвод крупнодисперсной влаги при минимальном гидравлическом сопротивлении. Выбор диаметра отверстий, их конфигурации и шага между отверстиями основан на моделировании сепарации на экспериментальном стенде [7]. Через отверстия 6 был организован независимый отвод влаги, осаждающейся на стенках входной камеры, во внешний круговой коллектор. Пар из входной камеры направляется в 12 сепарационных блоков типов А, В, С, D, E, F с жалюзийными устройствами Powervane, представляющими собой наборы волнообразных профилей. Сепарационные блоки, расположенные в кольцевом пространстве между корпусом и выходной трубой, разли-

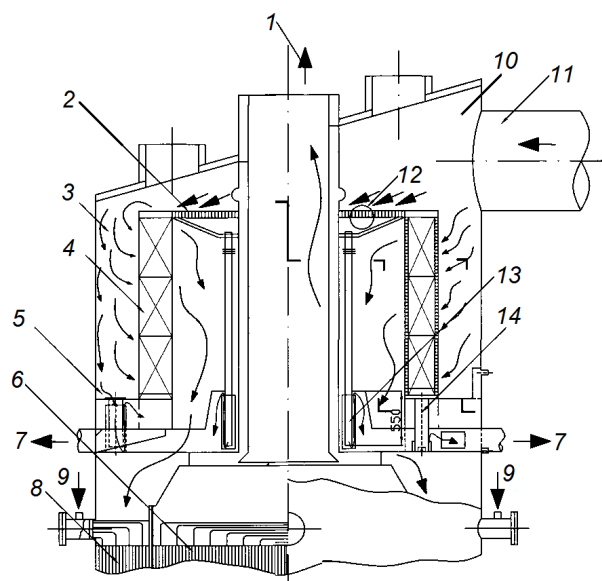


Рис. 2. Общий вид модернизированной сепарационной части СПП-500-1: 1 — выходная труба сепаратора-пароперегревателя; 2 — дырчатый лист; 3 — внутренний кольцевой коллектор; 4 — сепарационные блоки; 5 — отверстия для отвода влаги со стенок во внешний кольцевой коллектор; 6, 8 — модули второй и первой ступени соответственно; 7 — отвод сепарата в сепаратосборник; 9 — подвод греющего пара второй ступени; 10 — входная камера; 11 — вход влажного пара из цилиндра высокого давления; 12 — лунки; 13 — трубки для отвода влаги, отделившейся на дырчатом листе, во внутренний кольцевой коллектор; 14 — отверстия для отвода сепарата от сепарационных пакетов во внутренний кольцевой коллектор

чаются степенью перфорации металлических листов на входе влажного пара. Различный уровень перфорации выравнивает поток влажного пара через блоки. Наибольшей является площадь сечения перфорации блоков F, расположенных с противоположной стороны по отношению к входному патрубку. Блоки состоят из сепарационных пакетов типа I, II, III. Типы пакетов также различаются степенью перфорации входных листов, которая зависит от изменения давления пара по высоте сепарационного блока. Угловая неравномерность удельного расхода пара на входе в сепарационные устройства Powervane снижена вследствие подбора степени перфорации входных листов. Влага, отсепарированная на жалюзийных устройствах, стекает во внутренний сливной кольцевой коллектор и далее в сепаратосборник.

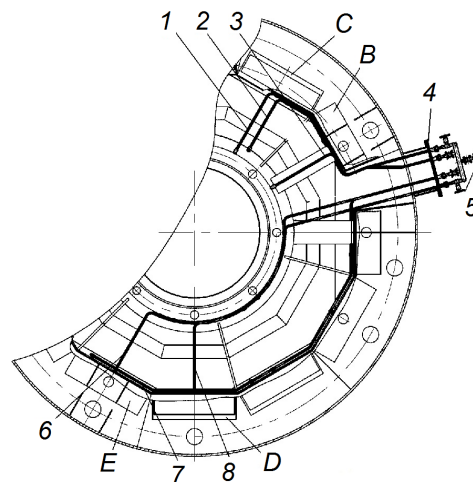
Создание отдельных отводов влаги, осаждающейся на стенках и дне входной камеры, через перфорированный лист с лунками предот-

вратило ее попадание обратно в поток. Снижение влажности пара на входе в сепарационные блоки и улучшение распределения потока по периметру аппарата уменьшило нагрузку на жалюзийные устройства, что обеспечило высокую эффективность осушения пара.

В ходе модернизации совершенствовались конструкции кольцевых камер сбора сепарата. Для исключения выноса влаги из кольцевой камеры в паровое пространство из-за колебания давления нагреваемого пара на двух из 12 сепарационных блоках удалены гидрозатворы, т.е. соединены паровое пространство и кольцевая камера.

Модернизированные аппараты СПП-500-1 турбоустановок ТГ-1 и ТГ-2 первого энергоблока Смоленской АЭС были испытаны.

Влажность нагреваемого пара за сепарационными блоками. Ее определяли на выходе из сепарационных блоков с помощью дроссели-калориметра. Зонды для отбора влажного пара вводили через люк, снабженный модернизированной крышкой. Ранее пар после сепарационных блоков отбирали из пространства на центральной оси люка. Но полученные таким образом данные не позволяли сделать вывод об эффективности сепарационных устройств Powervane — отсепарированный пар отбирали из зоны с предположительно минимальной влажностью. Для более точной оценки работы сепарационных блоков была разработана и установлена на Смоленской АЭС система, позволяющая определять влажность отсепарированного пара в шести точках по периметру аппарата (рис. 3). Трубки для отбора пара заведены через крышку люка в паровое пространство. Каждый зонд снабжен тремя трубками, разнесенными одна от другой на 150 мм. Это позволило определять среднюю влажность пара после блока. Отборы № 2 и 5 расположены напротив блоков С и D со срезанным гидрозатвором, отборы № 3 и 4 размещены рядом с блоками В и Е с гидрозатворами. Отбор № 6 установлен непосредственно возле стенки опускного канала. Он позволяет контролировать возможное наличие на стенке стекающей пленки жидкости. С помощью отбора № 1, расположенного напротив блока С, но на 670 мм ниже отбора № 2, регистрировалось наличие вторичного срыва влаги в паровое пространство.

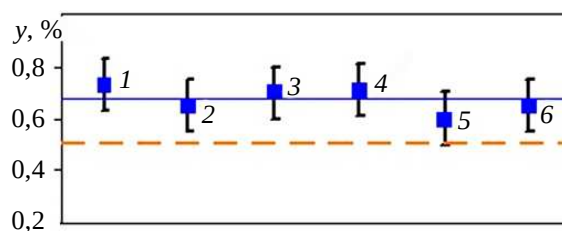


Р и с. 3. Расположение отборов для определения влажности пара на выходе из сепарационных блоков: 1—3, 6—8 — отбор; 4 — крышка люка; 5 — отвод к дроссели-калориметру

Искомую влажность пара определяли методом дросселирования влажного пара из двухфазной области в область перегретого пара. При низком давлении в конце дросселирования энтальпия пара почти не зависит от давления, на нее в основном влияет температура перегретого пара. Таким образом, влажность пара рассчитывалась по измерению трех независимых параметров: давления влажного пара, температуры и давления перегретого пара в конце дросселирования.

Адиабатичность процесса в калориметре обеспечена паровой рубашкой. Испытания на стенде показали, что его абсолютная ошибка не превышает $\pm 0,1\%$ влажности.

Испытания модернизированных сепараторов-пароперегревателей. В испытаниях определена влажность отсепарированного пара (рис. 4). Анализ показывает, что влажность находится в диапазоне 0,6—0,8% и распределяется равномерно по периметру. При сопоставлении этого диапазона с влажностью в аппаратах



Р и с. 4. Фактическая (■), проектная (—), средняя фактическая по всем отборам влажность отсепарированного пара (—) в СПП-14: 1—6 — отбор № 6, 4, 5, 3, 2, 1 в области стенки канала возле блока E, D, B, C, C соответственно

турбоустановки ТГ-1 до модернизации $y \sim 2\%$ видно, что в результате изменения конструкции сепарационной части влажность снизилась более чем в 3 раза. С помощью отборов № 1 и 2 установлено равномерное распределение влаги по высоте парового пространства возле блока С. Отбор № 6, расположенный вдоль внешней стенки опускного канала, не показал повышенной влажности. Это свидетельствует об отсутствии стекающей жидкости. Не обнаружено заметного влияния особенностей сепарационных блоков на влажность. Средняя влажность на выходе из сепарационных блоков по результатам испытаний составила 0,6%, что близко к проектной.

Выводы. Модернизация промежуточных сепараторов-пароперегревателей СПП-500-1 с применением жалюзийных пакетов Powervane и изменением схемы движения нагреваемого пара устранила неравномерность распределения влажности по периметру и высоте парового пространства за сепарационными блоками и приблизила влажность к проектной. Разработанная система определения влажности отсепарированного пара по периметру парового пространства сепараторов-пароперегревателей позволила существенно увеличить объем получаемой информации о рабочих процессах и дала возможность выполнения подробного анализа сепарации.

Измерение влажности на турбоустановках Смоленской АЭС показало, что после модернизации неравномерность распределения влажности по периметру и высоте парового пространства за сепарационными блоками снизилась. Измеренная влажность близка к расчетной $\sim 0,5\%$. Заметного влияния на влажность индивидуальных особенностей сепарационных блоков не обнаружено.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Егоров М.Ю.** Анализ эксплуатации и пути совершенствования сепараторов-пароперегревателей российских АЭС, связанные с интенсификацией теплообмена. — Новое в российской электроэнергетике, 2018, № 4, с. 15—28.
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. // **Davidenko N.N., Solomeev V.A., Kruglikov P.A. et al.** Improvement of technical and economic indicators of technological equipment at operating nuclear power stations. — Thermal Engng, 2008, v. 55, № 1, p. 18—21.
3. **Егоров М.Ю., Готовский М.А., Федорович Е.Д.** Повышение эффективности систем сепарации и перегрева пара в турбинах АЭС. — Надежность и безопасность энергетики, 2011, № 14, с. 57—64.
4. **Давиденко Н.Н., Соломеев В.А.** Модернизация турбинного оборудования АЭС. — Теплоэнергетика, 2009, № 5, с. 45—47. // **Davidenko N.N., Solomeev V.A.** Modernization of turbine equipment at nuclear power stations. — Thermal Engng, 2009, v. 56, № 5, p. 405—407.
5. **Kolev N.I.** Multiphase Flow Dynamics 5: Nuclear Thermal Hydraulics. London: Springer, 2015.
6. **Готовский М.А., Фокин Б.С., Бельский М.Я. и др.** Результаты испытаний модернизированных сепараторов-пароперегревателей турбоустановки К-500-65/3000 энергоблока № 4 Ленинградской АЭС. — Теплоэнергетика, 2012, № 2, с. 27—32. // **Gotovskii M.A., Fokin B.S., Belen'skii M.Ya. et al.** Results of tests of modernized separator-superheaters of the K-500-65/3000 turbine in № 4 unit of the Leningradskaya NPP. — Thermal Engng, 2012, v. 59, № 2, p. 113—118.
7. **Егоров М.Ю.** Повышение эффективности сепараторов-пароперегревателей турбин АЭС путем их модернизации на основе физического моделирования. — Атомная энергия, 2018, т. 124, вып. 2, с. 115—117. // **Egorov M.Yu.** Efficiency upgrade of separator-superheaters in NPP turbines by Physical-Modeling Based Modernization. — Atomic Energy, 2018, v. 124, № 2, p. 139—142.

Поступила в Редакцию 17.08.18

УДК 661.879

УНИФИКАЦИЯ ПЕРЕРАБОТКИ РУДНЫХ УРАНОВЫХ ПУЛЬП МЕТОДОМ СОРБЦИОННОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ

*Молчанова Т.В., Смирнов К.М., Крылова О.К. (АО «ВНИИХТ», г. Москва)
e-mail: molchanovavt@vniiht.ru*

Технологические схемы переработки урановых руд гидрометаллургических заводов остаются достаточно громоздкими, сложными, трудоемкими и требуют дальнейшего совершенствования.

Выщелачивание урана из руд — одна из основных операций гидрометаллургии, имеющая своей целью перевод в водный раствор ценных компонентов руды посредством воздействия на нее разных реагентов (растворителей). Основ-