

втором сетевом подогреватели на 13,7 %; уменьшается тепловая нагрузка на потребители на 0,2 % (с 342574,4 до 341904 кВт); электрическая мощность ПТУ снижается на 3,5 %; электрическая мощность ПГУ снижается 1,8 %; абсолютный электрический КПД ПГУ снижается на 1,8 % (с 71,2 до 69,9 %); удельный расход условного топлива по отпуску электроэнергии возрастает на 1,8 %; удельная выработка электроэнергии на тепловом потреблении снижается на 1,46 % (с 1,37 до 1,35).

Сравнение показателей работы ПТУ в теплофикационных режимах позволяет сделать вывод, что введение промежуточного перегрева пара является неэффективным, так как понижает энергетические показатели ПГУ.

Окончательный выбор целесообразности введения промежуточного перегрева пара на двухконтурных теплофикационных ПГУ должен осуществляться с учетом годовых графиков теплового и электрического потребления в энергосистеме.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Диаграмма режимов ГТУ ГТЭ-160 – Энергетические характеристики ПГУ-450 Северо-Западной ТЭЦ, 2015 – 58 с.
2. Трухний А.Д. Парогазовые установки электростанций: учеб. пособие для вузов. – М.: Издательский дом МЭИ. – 2013.
3. Цанев С.В. и др. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций: Учебное пособие для вузов / Цанев С.В., Буров В.Д., Ремезов А.Н. – М.: Издательство МЭИ, 2002. – 584 с.

Научный руководитель: к.т.н. О.Ю. Ромашова, доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ.

## **ПРОВЕРКА СООТВЕТСТВИЯ ТЕХНИЧЕСКИМ ТРЕБОВАНИЯМ СИСТЕМЫ РАСХОЛАЖИВАНИЯ БАСЕЙНА ВЫДЕРЖКИ РЕАКТОРА ВВЭР-1000 ПРИ ПЕРЕХОДЕ НА РЕМИКС ТОПЛИВО**

Д.В. Погребной  
Томский политехнический университет  
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, группа 5072

После успешных эксплуатационных испытаний РЕМИКС топлива встает вопрос о готовности его использования на станциях с системами обеспечения безопасной работы, которые спроектированы для стандартного уранового топлива. Одной из таких систем является система расхолаживания бассейна выдержки. В связи с изменением состава топлива его остаточное тепловыделение поменяется. Следует убедиться, что обращение с отработавшими ТВС (далее ОТВС) будет безопасным и в модернизации данная система не нуждается.

Расчет остаточной тепловой мощности РЕМИКС топлива будет производиться по эмпирической формуле Уинтермайера-Уэллса [1, с. 136], которая учитывает вклад в остаточную тепловую мощность от распада продуктов деления  $^{235}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$ :

$$Q = 10 \cdot \left\{ (T + 10)^{-0.2} - (T + T_0 + 10)^{-0.2} - 0,87 \cdot \left[ (T + 2 \cdot 10^7)^{-0.2} - (T + T_0 + 2 \cdot 10^7)^{-0.2} \right] \right\}, \quad (1)$$

где  $T$  – момент времени после останова, на который определяется остаточное тепловыделение, с;  $T_0$  – время работы реактора, с.

Данная формула имеет следующую точность, оцененную Уинтермайером и Уэллсом для различных  $T$  [1, с. 137]:

$$\begin{aligned} &\pm 50\% \text{ для } 1 \leq T \leq 10^2; \\ &\pm 30\% \text{ для } 10^2 \leq T \leq 10^4; \\ &\pm 10\% \text{ для } 10^4 \leq T \leq 10^6; \end{aligned}$$

$\pm 50\%$  для  $10^6 \leq T \leq 10^8$ .

Для реактора ВВЭР-1000 Балаковской АЭС, топливная компания составляет 507,72 эффективных суток [2, с. 8], а по условиям проведения перегрузки топлива, с момента останова реактора должно пройти не менее 72 часов [3, с. 21].

Тепловыделение РЕМИКС ТВС в реакторе (после останова) с течением времени приведено в таблице 1.

Нагрузка на теплообменник расхолаживания бассейна выдержки, при перегрузке топлива, складывается из тепловыделения ТВС активной зоны и ОТВС, находящихся на выдержке, до их отправки на переработку.

Оценить тепловыделения ОТВС, находящихся в бассейне выдержки, можно с помощью формулы (1). Минимальное время выдерживания ОТВС в бассейне выдержки равно 3 годам [4, с. 158]. На момент 24-ой топливной загрузки реактора энергоблока №3 Балаковской АЭС в бассейнах выдержки находились 268 ОТВС (в бассейне 3TG21B01 – 157, 3TG21B02 – 71, 3TG21B03 – 40) [5].

В таблице 2 приведены результаты расчетов остаточного тепловыделения ОТВС, находящихся на выдержке в бассейнах, в зависимости от срока их выдержки.

Таблица 1. Энерговыведение ТВС в реакторе после останова с течением времени

T, сут	T, с	Q <sub>ТВС</sub> , кВт
1	86400	23038
2	172800	18475
3	259200	16090
4	345600	14514
5	432000	13356
6	518400	12449
7	604800	11710
8	691200	11089

Таблица 2. Энерговыведение ОТВС в бассейнах выдержки с течением времени

T, лет	T, с	Q <sub>ОТВС</sub> , кВт
1,5	$4,7 \cdot 10^7$	1022
3	$9,5 \cdot 10^7$	406
4,5	$1,42 \cdot 10^8$	230
6	$1,89 \cdot 10^8$	153

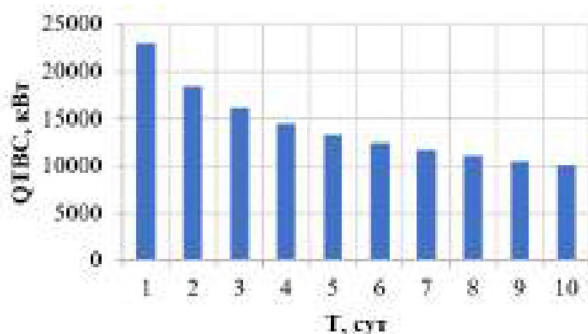


Рис. 1. Энерговыведение ТВС в реакторе после останова с течением времени

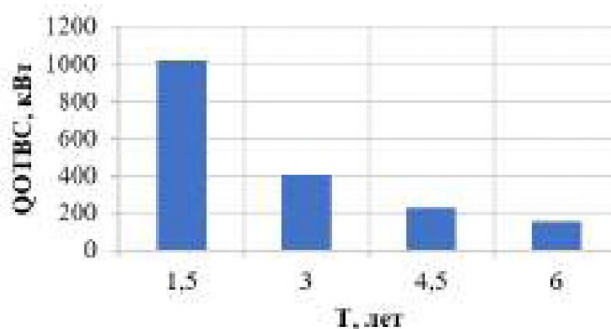


Рис. 2. Энерговыведение ОТВС в бассейнах выдержки с течением времени

Общее тепловыделение ТВС и ОТВС составляет:

$$Q_{\text{общ}} = Q_{\text{ТВС}}(T_0 = 507,72 \text{ сут}; T = 3 \text{ сут}) + Q_{\text{ОТВС}}(T_0 = 507,72 \text{ сут}; T = 3 \text{ г}) = 16496 \text{ кВт} \cdot$$

Теплообменник расхолаживания бассейна выдержки имеет следующие характеристики [4, с. 166].

Таблица 3. Технические характеристики теплообменника расхолаживания бассейна выдержки

Параметр	Величина	
	Трубное пространство	Межтрубное пространство
Расход среды, т/час (не более)	950 (техвода)	630 (РБК)
Давление расчетное, кгс/см <sup>2</sup>	10	5
Давление рабочее, кгс/см <sup>2</sup>	5	3
Объем, м <sup>3</sup>	2,48	5,2
Гидравлическое сопротивление, кгс/см <sup>2</sup>	0,83	0,72
Температура расчетная, °С (не более)	70	100
Номинальная тепловая мощность при t те- хводы 5 / 33 °С, МВт	20,12 / 10,35	
Поверхность теплообмена, м <sup>2</sup>	325	
Количество / диаметр т/о труб, мм	962 / 16x1	
Материал поверхности теплообмена	08Х18Н10Т	

При температуре техводы равной 5 °С номинальная мощность аппарата составляет 20,12 МВт. Мощность общего тепловыделения составляет  $Q_{общ} = 16496 \text{ кВт}$ . Из этого следует, что теплообменник не требует замены при переходе со стандартного уранового топлива на РЕМИКС при нормальной эксплуатации.

Для некоторых аварийных режимов данный теплообменник может быть использован для работы на другую систему, а именно, на систему аварийно-планового расхолаживания [6, с. 50]. Для необходимого теплосъема из активной зоны максимальная мощность теплообменного аппарата должна быть не ниже мощности тепловыделения активной зоны после останова и предварительного расхолаживания через парогенераторы, а именно  $Q(T = 1 \text{ сут}) = 23 \text{ МВт}$  (таблица 1).

Таким образом, нынешний теплообменник системы расхолаживания бассейна выдержки не подходит, так как его максимальная номинальная мощность не соответствует нагрузке в аварийных режимах. Подходящим решением является замена теплообменника.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Эксплуатационные режимы водо-водяных энергетических ядерных реакторов / Овчинников Ф.Я., Голубев Л.И., Добрынин В.Д., Клочков В.И., Семенов В.В. [и др.] – Москва: Атомиздат, 1977. – 280 с.
2. ИЭ.4.НФХ.ОЯБиН/02. Нейтронно-физические характеристики реактора ВВЭР-1000 – Балаково: АО «Концерн Росэнергоатом» Балаковская АЭС, 2022. – 128 с.
3. И.ОЯБиН/18. ИНСТРУКЦИЯ по обеспечению ядерной безопасности при транспортировании, перегрузке и хранении свежего и отработавшего ядерного топлива на Балаковской АЭС1000 – Балаково: АО «Концерн Росэнергоатом» Балаковская АЭС, 2016. – 62 с.
4. Балаковская атомная станция. Технологические системы реакторного отделения. Часть 1. Системы безопасности: Центр подготовки персонала, 2000. – 360 с.
5. ОЯБиН-2-01-3/786. Результат нейтронно-физических расчетов в обоснование безопасности 24-й топливной загрузки реактора ВВЭР-1000 блока № 3 Балаковской АЭС – Балаково: АО «Концерн Росэнергоатом» Балаковская АЭС 2020.
6. Балаковская атомная станция. Техническое описание «Система аварийного и планового охлаждения зоны (активная часть)»: Центр подготовки персонала, 2007. – 92 с.

Научный руководитель: доцент, к.т.н. А.В. Воробьев, доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ.