

НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ВО ВРЕМЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ

А. С. Буглаков

*Белорусский государственный университет, г.Минск;
buglakov2009@yandex.ru; науч. рук. – Л. А. Аветисян*

В ходе выполнения работы были рассмотрены виды нейтронно-физических расчетов проводимых на Атомных электрических станциях. Выявлено, что расчет пусковой концентрации борной кислоты относится к категории «оперативные эксплуатационные расчеты, выполняемые непосредственно в процессе работы реакторной установки». Для проведения данных расчетов был рассмотрен состав Альбома нейтронно-физических характеристик и в частности требования к содержанию его раздела «пусковая концентрация борной кислоты». Используя методику расчета пусковой концентрации борной кислоты, и исходные данные, взятые из Альбома нейтронно-физических характеристик, был выполнен оценочный расчет пусковой концентрации борной кислоты. В качестве программного средства для верификации расчета пусковой концентрации борной кислоты использовалась программа Имитатор Реактора, входящая в состав системы комплексного анализа и использующая данные системы внутриреакторного контроля, которая является универсальным средством расчетного моделирования работы водо-водяного энергетического реактора. Результаты согласуются с полученными по программе Имитатор Реактора.

Ключевые слова: пусковая концентрация; борная кислота; программа Имитатор Реактора; водо-водяной энергетический реактор; атомная электрическая станция.

ВВЕДЕНИЕ

В данной работе рассматриваются нейтронно-физические расчеты во время эксплуатации реакторной установки типа ВВЭР. Расчеты выполняются как в процессе проектирования, так и на стадии эксплуатации водо-водяного корпусного энергетического ядерного реактора, в той их части, которая связана с определением собственно нейтронно-физических характеристик активной зоны реактора: параметров критичности, запасов, эффектов и коэффициентов реактивности, эффективности органов регулирования, распределения мощности в активной зоне и их изменений при переходных процессах на ксеноне-135 и самарии-149, маневрировании мощности, выгорании и перегрузках топлива, а также длительностей топливных кампаний, изотопного состава выгружаемого топлива, эффектов пространственно-временной кинетики в активной зоне [1, 2]. Стандарты устанавливают требования к проведению физических расчетов активных зон корпусных водо-водяных энергетических реакторов типа ВВЭР – к их организации, объему и детальности, используемой методике, точности и оформлению результатов [3]. Резуль-

таты настоящих расчетов могут применяться для обоснования безопасности реакторной установки (в частности, ее ядерной безопасности) и принятия решений, определяющих экономичность использования ядерного топлива.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Расчёт пусковой концентрации борной кислоты основывается на знании величины концентрации её в контуре в ближайший предшествующий по времени момент, когда реактор был последний раз критичен – в момент предшествующего пуску останова реактора. При этом подразумевается, что основные характеристики состояния реактора в момент останова известны.

Поскольку в оба рассматриваемых момента (в момент останова и в момент пуска) реактор находится в критическом состоянии, то в обоих случаях его реактивность $\rho=0$. И, следовательно, изменение реактивности за период времени между остановом и пуском $\Delta\rho = 0$. Его можно рассчитать как сумму всех происходящих за этот период времени изменений реактивности реактора, которые обусловлены следующими физическими процессами: переотравлением реактора ксеноном, температурным изменением реактивности, изменением реактивности за счёт неодинакового положения рабочей группы органов регулирования системы управления защиты (ОР СУЗ) в моменты пуска и останова, изменением реактивности за счёт разницы концентраций борной кислоты в теплоносителе первого контура в моменты останова и пуска реактора, нестационарным переотравлением реактора самарием за время стоянки [4].

Алгоритм расчета пусковой концентрации борной кислоты по программе Имитатор Реактора (ИР) [5] по исходным данным, включает в себя следующие:

- моделирование работы реактора на момент топливной кампании, в который было запланировано срабатывание аварийной защиты;
- моделирование срабатывания аварийной защиты;
- моделирование «стоянки» реактора;
- моделирование выхода реактора на минимально контролируемый уровень мощности (МКУ) с последующим расчетом пусковой концентрации борной кислоты.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Расчет пусковой концентрация борной кислоты проведен с учетом различного времени стоянки реактора – длительность остановки принята равной 8 и 72 ч. для моментов топливной кампании, соответствующих 60, 160 и 220 эффективным суткам (табл. 1–3). Средний подогрев по активной зоне на 100 % мощности принят равным 30,4 °С.

Таблица 1

Параметры РУ в момент пуска и останова для рассматриваемых моментов топливной кампании

Параметры РУ в момент пуска и останова*	Момент топливной кампании, соответствующий 60 эфф.сут.	Момент топливной кампании, соответствующий 160 эфф.сут.	Момент топливной кампании, соответствующий 220 эфф.сут.
N_p на момент пуска, МВт	МКУ		
$T_{ср}$ в а.з. на момент пуска, °С	280		
H_{10} на момент пуска, %	60		
N_p на момент останова, МВт	2250	3000	3000
$T_{ср}$ в а.з. на момент останова, °С	296,0	300,7	300,7
H_{10} на момент останова, %	80	90	90
$C_{крит.}$, $\frac{г}{кг}$	4,49	2,47	1,34

*

N_p на момент пуска, МВт – уровень мощности на момент пуска реактора;
 $T_{ср}$ в а.з. на момент пуска, °С – средняя температура теплоносителя в реакторе в момент пуска;
 H_{10} на момент пуска, % – положение рабочей группы ОР СУЗ в момент пуска;
 N_p на момент останова, МВт – уровень мощности на момент останова реактора;
 $T_{ср}$ в а.з. на момент останова, °С – средняя температура теплоносителя в реакторе в момент останова;
 H_{10} на момент останова, % – положение рабочей группы ОР СУЗ в момент останова;
 $C_{крит.}$, $\frac{г}{кг}$ – концентрация борной кислоты в теплоносителе первого контура в момент останова.

Таблица 2

**Расчетные значения пусковой концентрации борной кислоты
для 8-ми часовой стоянки реактора в зависимости от момента кампании**

	Момент топливной кампании, соответ- ствующий 60 эфф.сут.	Момент топливной кампании, соответ- ствующий 160 эфф.сут.	Момент топливной кампании, соответ- ствующий 220 эфф.сут.
Пусковая концен- трация борной кислоты по методике / по программе ИР $C_n, \frac{\text{г}}{\text{кг}}$	3,82/3,89	1,61/1,61	0,54/0,34

Таблица 3

**Расчетные значения пусковой концентрации борной кислоты
для 72-х часовой стоянки реактора в зависимости от момента кампании**

	Момент топ- ливной кампании, соответствующий 60 эфф.сут.	Момент топлив- ной кампании, соот- ветствующий 160 эфф.сут.	Момент топлив- ной кампании, соот- ветствующий 220 эфф.сут.
Пусковая concentra- ция борной кислоты по методике / по про- грамме ИР $C_n, \frac{\text{г}}{\text{кг}}$	6,40/6,68	4,84/5,04	3,34/3,72

Согласно Аттестационному паспорту программы ИР погрешность расчета пусковой концентрации борной кислоты C_n составляет $\delta C_n = 0,4 \frac{\text{г}}{\text{кг}}$. Расчет по методике является оценочным и согласно полученным данным попадает в доверительный интервал ΔC_n , который состоит из рассчитанного по программе ИР значения пусковой концентрации с учетом погрешности $\delta C_n : \Delta C_n = C_{\text{кр}}^{\text{по ИР}} \pm \delta C_n$.

Полученные по методике значения пусковой концентрации борной кислоты в зависимости от момента кампании с учетом различной стоянки реакторной установки принадлежат интервалу ΔC_n (табл. 4).

Таблица 4

**Показательное сравнение значений пусковой концентрации борной кислоты
(г/кг), рассчитанных по методике, с интервалом возможных значений,
полученных с помощью программы ИР**

Момент кампании, эфф.сут.	Время стоянки реактора, ч.	
	8	72
60	3,82 ∈ [3,49 ÷ 4,29]	6,40 ∈ [6,28 ÷ 7,08]
160	1,61 ∈ [1,21 ÷ 2,01]	4,84 ∈ [4,64 ÷ 5,44]
220	0,54 ∈ [0 ÷ 0,74]	3,34 ∈ [3,32 ÷ 4,12]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам расчета был проведен сравнительный анализ данных, полученных по методике и по программе ИР.

В ходе анализа было выявлено, что значения оценочного расчета по методике принадлежат доверительному интервалу значений пусковой концентрации борной кислоты, рассчитанным по программе ИР, что в свою очередь говорит о том, что методика позволяет получить достоверное значение пусковой концентрации борной кислоты для принятия оперативного решения на блочном щите управления по безопасному выводу реакторной установки на МКУ.

Библиографические ссылки

1. *Климов А. Н.* Ядерная физика и ядерные реакторы : учебник для вузов. М., 2002.
2. *Нигматулин И. Н., Нигматулин Б. И.* Ядерные энергетические установки : учебник для вузов. М., 1986.
3. *Овчинников Ф. Я., Семенов В. В.* Эксплуатационные режимы водо-водяных энергетических реакторов. М., 1988.
4. Системы внутриреакторного контроля АЭС с реакторами ВВЭР / под ред. Г. Л. Левина. М., 1987.
5. Руководство оператора. Прикладное программное обеспечение программы ИР.