



УДК 621.039.56

## РАСЧЕТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕАКТОРА ЭНЕРГОБЛОКА № 1 ЛЕНИНГРАДСКОЙ АЭС-2 НА ЭТАПЕ ФИЗИЧЕСКОГО ПУСКА

Кавун О. Ю., д.т.н. (kavun@secnrs.ru), Кавун В. О. (vkavun@secnrs.ru),  
Семишин В. В. (semishin@secnrs.ru), Жылмаганбетов Н. М. (zhylmaganbetov@secnrs.ru)  
(ФБУ «НТЦ ЯРБ»),

Терешонок В. А., к.ф.-м.н. (VATereshonok@vniiaes.ru), Питилимов В. А. (VAPitilimov@vniiaes.ru),  
Кряквин Л. В., к.т.н. (LVKryakvin@vniiaes.ru), Романов П. А. (PARomanov@vniiaes.ru),  
Денисенко А. О. (AODenisenko@vniiaes.ru) (АО «ВНИИАЭС»)

*Представлены результаты расчетного моделирования экспериментов по измерению параметров энергоблока № 1 Ленинградской АЭС-2, проведенных на этапе физического пуска энергоблока. Расчеты проводились по программному средству «Rainbow-TPP».*

► **Ключевые слова:** ВВЭР, минимально контролируемый уровень мощности, моделирование, энергоблок № 1 Ленинградской АЭС-2, «Rainbow-TPP».

## NUMERICAL SIMULATION OF NEUTRON-PHYSICAL PARAMETERS MEASUREMENTS CARRIED OUT DURING THE REACTOR STARTUP TESTS OF UNIT 1 OF LENINGRAD-2 NPP

Kavun O., Ph. D., Kavun V., Semishin V., Zhylmaganbetov N.  
(SEC NRS),

Tereshonok V., Ph. D., Pitilimov V., Kryakvin L., Ph. D.,  
Romanov P., Denisenko A.  
(JSC "VNIIAES")

*The article represents the numerical simulation of experiments, carried out during the reactor physical startup of unit 1 Leningrad-2 NPP. The calculations were performed by "Rainbow-TPP" code.*

► **Key words:** VVER, minimum controlled power level, simulation, unit 1 of Leningrad-2 NPP, "Rainbow-TPP".

### Введение

В статье приводятся результаты сравнения расчетов основных нейтронно-физических характеристик активной зоны реакторной установки, выполненных по программному средству (ПС) «Rainbow-TRP» [1], с результатами измерений, выполненных на этапе физического пуска энергоблока № 1 Ленинградской АЭС-2. В работе представлены результаты расчетов следующих параметров, которые определялись в процессе физического пуска энергоблока: критическая концентрация борной кислоты, эффективность аварийной защиты, эффективность групп органов регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ) (ОР СУЗ). Было проведено моделирование эксперимента по определению эффективности аварийной защиты при застревании отдельных органов СУЗ.

### Исходные данные, методика расчетов

Первая топливная загрузка активной зоны реактора блока № 1 Ленинградской АЭС-2 укомплектована из топливных кассет с увеличенным до 374 см топливным столбом. Кассеты разрабо-

таны на основе тепловыделяющих сборок ТВС-2М, применяемых на энергоблоках ВВЭР-1000. В качестве выгорающего поглотителя используется оксид гадолиния ( $Gd_2O_3$ ). Применены твэги (твэлы с гадолиниевым поглотителем) обогащением 2,4 и 3,6 % с содержанием двуоксида гадолиния 8 или 5 % весовых. Реактор имеет 121 ОР СУЗ, каждый из которых состоит из 18 поглощающих стержней. Схема расположения ОР СУЗ в активной зоне и их распределение по группам представлены на рис. 1.

Расчеты критической концентрации борной кислоты, эффективности аварийной защиты, эффективности отдельных групп ОР СУЗ выполнялись с помощью ПС «Rainbow-TRP». Библиотека нейтронно-физических сечений была рассчитана с помощью ПС «САПФИР-95.1» [2].

### Результаты расчетов

Был проведен расчет критических состояний активной зоны реактора при различном положении отдельных групп ОР СУЗ. В таблице 1 приведены результаты, полученные по ПС «Rainbow-TRP», результаты экспериментов, проведенных на энергоблоке, и результаты, полученные по ПС «БИПР».

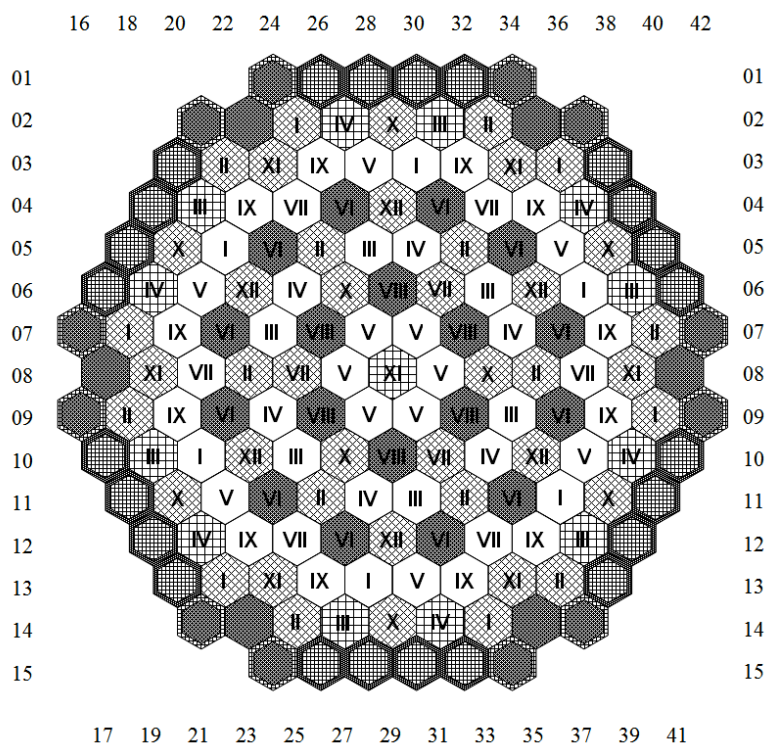


Рис. 1. Схема расположения ОР СУЗ в активной зоне

Таблица 1

## Результаты расчета критических состояний активной зоны

№ регулирующей группы	Положение регулирующей группы, %	Номера групп в крайнем нижнем положении	Сбк, г/кг		
			Эксперимент	«Rainbow-TRP»	«БИПР»
12	80	—	7,80 ± 0,3	8,10	7,96
12	72	—	7,79 ± 0,3	8,09	7,95
12	70	—	7,78 ± 0,3	8,08	7,94
12	68	—	7,78 ± 0,3	8,07	7,94
12	18	—	7,62 ± 0,3	7,90	7,78
11	67	12	7,51 ± 0,3	7,79	7,69
11	17	12	7,04 ± 0,3	7,27	7,21
10	66	11, 12	6,91 ± 0,3	7,13	7,08
10	15	11, 12	6,29 ± 0,3	6,46	6,46
10, 9	20, 74	11, 12	6,34 ± 0,3	6,45	6,50

Кроме того, проведен расчет плотностного и температурного коэффициентов реактивности при различных положениях групп ОР СУЗ. В таблице 2 приведены коэффициенты реактивности, полученные в ходе измерений на энергоблоке и по ПС «Rainbow-TRP» и ПС «БИПР». Относительная погрешность измеренных коэффициентов реактивности составляет ± 10 %.

В таблице 3 представлены интегральные эффективности отдельных групп ОР СУЗ, полученные в ходе экспериментальных исследований и при проведении расчетов по ПС «Rainbow-TRP», а также результаты расчетов эффективностей групп ОР СУЗ, полученные по ПС «БИПР». Относительная погрешность измеренных величин составляет ± 5 %.

Таблица 2

## Результаты расчета коэффициентов реактивности

Номер измерения	Температурный коэффициент реактивности, 10 <sup>-3</sup> %/°С			Плотностной коэффициент реактивности, %/г/см <sup>3</sup>		
	Эксперимент	«Rainbow-TRP»	«БИПР»	Эксперимент	«Rainbow-TRP»	«БИПР»
1	- 7,7	- 7,2	- 8,2	1,54	0,93	1,93
2	- 12,4	- 11,1	- 12,44	2,8	3,04	4,37
3	- 14	- 11,9	- 13,38	3,8	3,56	4,89
4	- 16,6	- 14,9	- 16,78	4,9	5,2	6,72
5	- 18	- 15,9	- 17,72	5,6	5,6	7,23
6	- 22	- 20,2	- 21,74	7,8	7,97	9,42

Таблица 3

**Интегральные эффективности отдельных групп ОР СУЗ**

Номер группы	Интегральная эффективность при погружении ОР СУЗ $ \Delta\rho $ , %		
	Эксперимент	«Rainbow-TRP»	«БИПР»
1	1,69	1,56	1,61
2	1,66	1,56	1,50
3	1,19	1,15	1,16
4	1,19	1,15	1,16
5	0,55	0,56	0,57
6	0,67	0,67	0,64
7	0,49	0,50	0,49
8	0,16	0,18	0,16
9	1,15	1,11	1,17
10	1,12	1,06	1,04
11	1,00	0,96	0,94
12	0,37	0,38	0,37

Ниже представлены результаты расчета интегральной эффективности 12-й, 11-й и 10-й групп ОР СУЗ при их погружении в активную зону в штатной последовательности. На рис. 2 приведены интегральные характеристики, полученные по ПС «Rainbow-TRP» и в ходе экспериментов.

Также проведено моделирование экспериментов по сбросу аварийной защиты. Всего выполнено моделирование трех процессов: сброс всех ОР СУЗ, сброс всех ОР СУЗ, исключая ОР в ТВС с координатами 02 – 29, сброс всех ОР СУЗ, исключая ОР

в ТВС с координатами 02 – 25 с последующим добросом указанных ОР СУЗ. Эффективная доля запаздывающих нейтронов принималась равной 0,74 %. Расположение камер № 8 и № 16, по показаниям которых определялась вводимая в активную зону реактивность при сбросе аварийной защиты, а также ОР СУЗ, для которых моделировалось застревание с последующим добросом в активную зону, представлено на рис. 3. Положение моделируемых камер и «застрявших» ОР СУЗ выделено красным цветом.

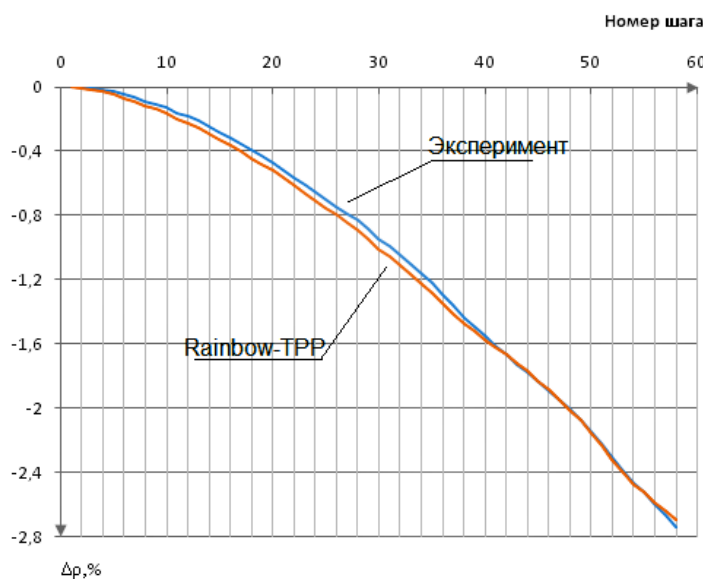


Рис. 2. Интегральная характеристика 12-й, 11-й и 10-й регулирующих групп ОР СУЗ при их погружении в активную зону в штатной последовательности

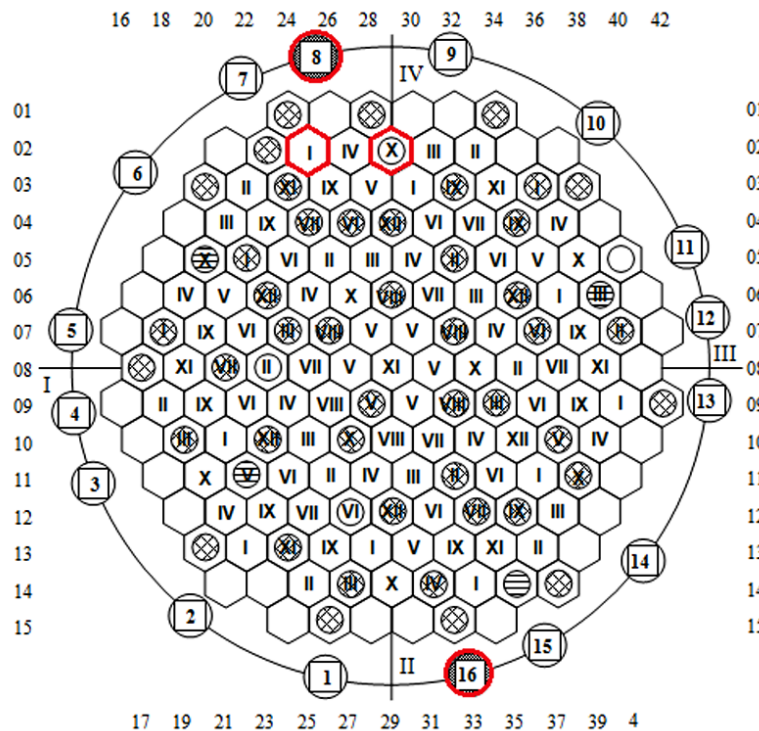


Рис. 3. Схема расположения ионизационных камер и «застрявших» ОР СУЗ

Коэффициенты влияния для ионизационных камер, используемые в данной работе, получены по методике, описанной в [3].

В таблице 4 представлены результаты определения эффективности аварийной защиты и «застрявших» ОР СУЗ в ТВС с координатами 02 – 29 и 02 – 25, полученные из измерений на энергоблоке № 1 Ленинградской АЭС-2, а также при расчетном

моделировании по ПС «Rainbow-TRP», и результаты расчетов по ПС «БИПР». Относительная погрешность измеренной эффективности аварийной защиты составляет ± 5 %.

На рис. 4 – 5 представлены зависимости реактивности от времени, полученные по измеренным токам ионизационных камер и в результате расчетного моделирования.

Таблица 4

**Эффективности аварийной защиты и «застрявшего» ОР СУЗ**

Определяемый параметр	Эксперимент	Моделирование измерения	Стационарный расчет	ПС «БИПР»
Эффективность аварийной защиты (сброс всех ОР СУЗ), %	9,12	8,95	10,61	10,17
Эффективность «застрявшего» ОР СУЗ в ТВС с координатами 02 – 29, %	0,64	0,85	1,01	0,89
Эффективность «застрявшего» ОР СУЗ в ТВС с координатами 02 – 25, %	2,28	2,29	2,34	2,02

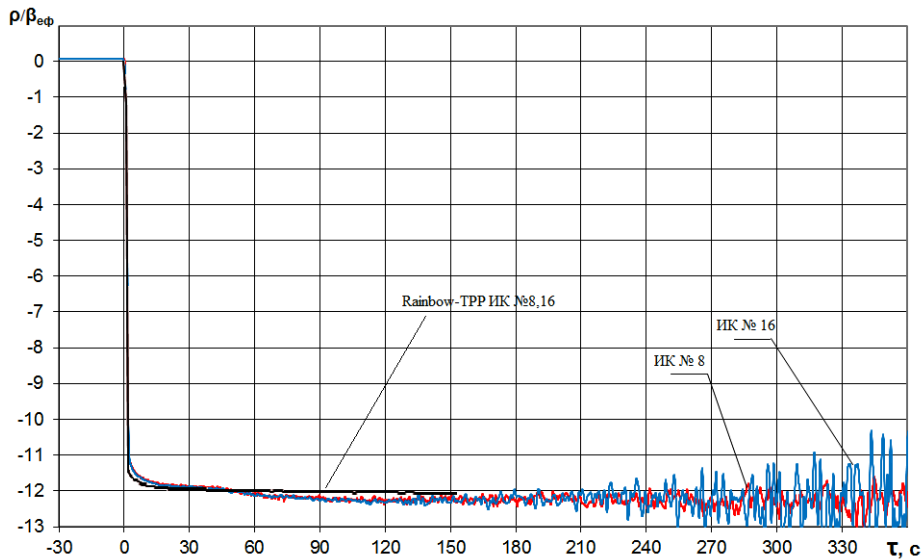


Рис. 4. Сброс аварийной защиты без «застревания» ОР СУЗ

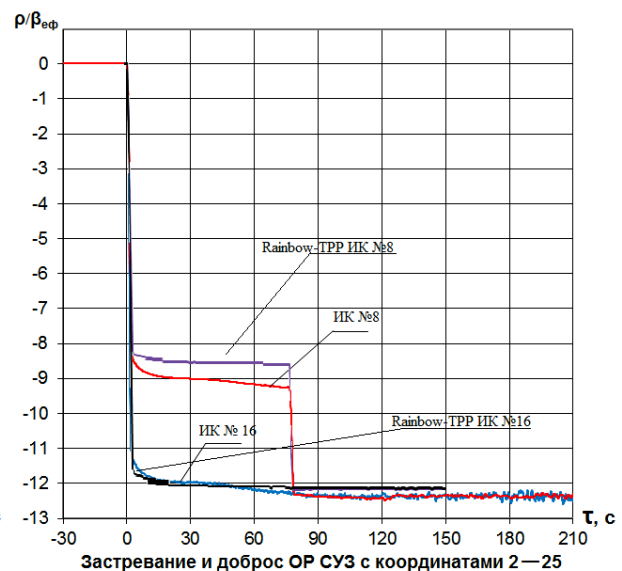
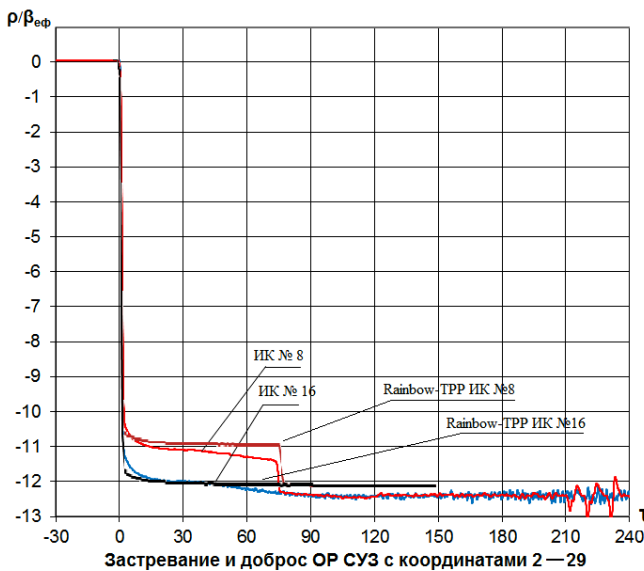


Рис. 5. Сброс аварийной защиты с «застреванием» ОР СУЗ

Как следует из таблицы 4 и рис. 4 – 5, эффективность аварийной защиты, получаемая при моделировании сброса по ПС «Rainbow-TPP», хорошо согласуется с эффективностью аварийной защиты, полученной экспериментально.

### Заключение

В данной работе представлены результаты расчетного моделирования экспериментов, проводившихся при физическом пуске энергоблока № 1 Ленинградской АЭС-2. При расчете определялись следующие характеристики: критическая концентрация борной кислоты при различных положениях групп ОР СУЗ, коэффициенты реактивности при различных положениях групп ОР СУЗ, интеграль-

ные характеристики отдельных групп ОР СУЗ. Также проводилось моделирование эксперимента по сбросу аварийной защиты и определению ее эффективности.

Результаты расчета критической концентрации борной кислоты, а также температурного и плотностного коэффициентов реактивности при различных положениях групп ОР СУЗ, полученные по ПС «Rainbow-TPP», согласуются в пределах погрешности измерений как с экспериментально полученными значениями, так и с результатами расчетов, выполненных по ПС «БИПР». Однако температурный коэффициент реактивности, рассчитанный по ПС «Rainbow-TPP», по абсолютной величине систематически меньше измеренного и рассчитанного по ПС «БИПР».

Результаты расчета интегральных характеристик отдельных групп ОР СУЗ сравнивались с измеренными в ходе экспериментов значениями и с результатами расчетов, выполненных по ПС «БИПР». Значения интегральных характеристик групп ОР СУЗ, полученные по ПС «Rainbow-TRP», согласуются в пределах погрешности измерений с результатами эксперимента и расчетов, выполненных по ПС «БИПР».

Результаты моделирования экспериментов по сбросу аварийной защиты сравнивались с соответствующими измеренными величинами. Значения измеренной эффективности аварийной защиты и

эффективности аварийной защиты, полученной путем расчетного моделирования эксперимента, хорошо согласуются.

Анализ приведенных в настоящей работе результатов свидетельствует о том, что используемое в ФБУ «НТЦ ЯРБ» ПС «Rainbow-TRP» с библиотекой нейтронно-физических сечений, подготовленной по ПС «САПФИР-95.1», обеспечивает приемлемую точность расчетов таких важных с точки зрения безопасности нейтронно-физических характеристик активной зоны, как критическая концентрация борной кислоты, коэффициенты реактивности, эффективности ОР СУЗ и аварийной защиты.

### Список литературы

1. Кавун О. Ю. Методика моделирования динамики энергоблока АЭС, реализованная в программном комплексе РАДУГА-ЭУ // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика ядерных реакторов, вып. 2, М., 1999.
2. Тебин В. В., Обухов В. В., Сергеев В. К., Иванов А. С. и др. Проект пакета программ САПФИР для решения задач расчета ячейки реактора // В сб. ВАНТ с. ФиТЯР, вып. 4, М.: ЦНИИАТОМИНФОРМ, 1985.
3. Куликов В. И., Куракин К. Ю., Семенова Т. В., Жылмаганбетов Н. М., Кавун О. Ю., Огнерубова А. А., Попыкин А. И., Шевченко Р. А., Шевченко С. А., Щукин Н. В. Расчетное моделирование измерений на этапе физического пуска энергоблока № 1 Нововоронежской АЭС-2 // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика ядерных реакторов, вып. 1, М., 2018.

### References

1. O.Yu. Kavun. Methodology for simulation of nuclear plant dynamics implemented in RADUGA-EU software // Science and engineering issues. Ser.: Physics of nuclear reactors, issue 2, M., 1999.
2. V.V. Tebin, V.V. Obukhov, V.K. Sergeev, A.S. Ivabov et al. Draft software package 'SAPFIR' for reactor cell calculations // In compilation 'Issues of nuclear science and engineering', ser. 'Phys. and eng. of nuclear reactors', issue 4, M.: CNIATOMINFORM, 1985.
3. V.I. Kulikov, K.Yu. Kurakin, T.V. Semyenova, N.M. Zhilmaganbetov, O.Yu. Kavun, A.A. Ognerubova, A.I. Popykin, R.A. Shevchenko, S.A. Shevchenko, N.V. Schukin. Simulation of first criticality neutronics measurements at Novovoronezh NPP-2 Unit 1 // Science and engineering issues. Ser.: Physics of nuclear reactors, issue 1, M., 2018.

