

УДК 621.039.56

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОРГАНОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ РЕАКТОРОВ ТИПА ВВЭР-1000

Кавун О. Ю., д.т.н. (kavun@secnrs.ru), Кавун В. О. (vkavun@secnrs.ru),
Семишин В. В. (semishin@secnrs.ru), Смирнова А. А. (smirnova@secnrs.ru)
(ФБУ «НТЦ ЯРБ»),

Кряквин Л. В., к.т.н. (LVKryakvin@vniiaes.ru), Сизов Р. А. (RASizov@vniiaes.ru) (АО «ВНИИАЭС»)

Представлены результаты расчетов эффективности органов регулирования системы управления и защиты на примере реактора ВВЭР-1200 по различным методикам и проведен анализ выявленных расхождений.

► **Ключевые слова:** ВВЭР, система управления и защиты, аварийная защита, «Rainbow-TPP».

NUMERICAL ASSESSMENT OF THE CONTROL RODS EFFECTIVENESS FOR VVER-1000 TYPE REACTORS

Kavun O., Ph. D., Kavun V., Semishin V., Smirnova A.
(SEC NRS)

Kryakvin L., Ph. D., Sizov R.
(JSC "VNIIAES")

This article presents the results of calculations of the effectiveness of the control rods based on the VVER-1200 reactor using various methods and the analysis of the revealed deviations.

► **Key words:** VVER, control and protection system, scram, «Rainbow-TPP».

Введение

Основной целью данной работы является анализ эффективности органов регулирования ВВЭР, оцениваемой различными методами. В статье приводятся результаты расчетов эффективности органов регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ) ВВЭР-1200, полученные по программному средству (ПС) «Rainbow-TRP» [1] и по простой двумерной модели реактора. Показано незначительное отличие результатов статических и динамических расчетов в случае определения эффективности отдельных групп ОР СУЗ и существенное отличие результатов статических и динамических расчетов эффективности аварийной защиты. Этот вопрос поднимался уже неоднократно, например, в работах [2], [3], [4], и настоящая работа является дальнейшим развитием данной темы.

Исходные данные, методика расчетов

Исходные данные, принятые для расчетов в данной работе, соответствуют первой топливной загрузке энергоблока № 1 Нововоронежской АЭС-2 [5].

Нейтронно-физические расчеты были выполнены с помощью ПС «Rainbow-TRP» с библиотекой нейтронно-физических сечений, подготовленной по ПС «САПФИР-95.1» [6].

В ПС «Rainbow-TRP» решается трехмерное двухгрупповое уравнение кинетики (1, 2).

$$\frac{1}{V_1} \frac{\partial F_1}{\partial \tau} = \nabla(D_1 \nabla(F_1)) + \Psi(1-\beta) + \sum_{i=1}^n \lambda_i C_i - (\Sigma_{зам} + \Sigma_{a1}) F_1, \quad (1)$$

$$\frac{1}{V_2} \frac{\partial F_2}{\partial \tau} = \nabla(D_2 \nabla(F_2)) + \Sigma_{зам} F_1 - \Sigma_{a2} F_2, \quad (2)$$

где $\Psi = \nu_{f1} \Sigma_{f1} F_1 + \nu_{f2} \Sigma_{f2} F_2$ – источник нейтронов.

Подробное описание методики решения уравнения кинетики в ПС «Rainbow-TRP» представлено в [1].

Для пояснения методики определения $K_{эфф}$ в ПС «Rainbow-TRP» ниже приведен вывод обратного уравнения кинетики, применяемого в указанном ПС для оценки эффективного коэффициента размножения. Проинтегрировав уравнения (1) и (2) по объему активной зоны и перейдя к средней плот-

ности потока нейтронов в тепловой группе, получим уравнение точечной кинетики (3):

$$\frac{1}{V} \frac{\partial \bar{F}_2}{\partial \tau} = \bar{\Psi}(1-\beta) - \frac{1}{K_{эфф}} \bar{\Psi} + \sum (\lambda_i C_i). \quad (3)$$

Таким образом, значение эффективного коэффициента размножения в ПС «Rainbow-TRP» для динамических режимов определяется выражением (4):

$$K_{эфф} = \frac{\bar{\Psi}}{\bar{\Psi}(1-\beta) + \sum (\lambda_i C_i) - \frac{1}{V} \frac{\partial \bar{F}_2}{\partial \tau}}. \quad (4)$$

Для альтернативной оценки нейтронно-физических характеристик реактора была применена двумерная модель реактора, состоящая в плане из 163 шестигранных тепловыделяющих сборок (ТВС) ВВЭР-1200 с 121 ОР СУЗ [5]. Расчеты в данной модели выполнялись в одностационарном (по энергии нейтронов) диффузионном приближении с шестью группами запаздывающих нейтронов. В указанном приближении математическая модель стационарной задачи на собственное значение ($K_{эфф}$) описывается квазикритическим уравнением (5) [7] с нулевым граничным условием на экстраполированной границе.

$$\Delta \varphi(r) + \frac{1}{M^2} \left(\frac{K_{\infty}(r)}{K_{эфф} + \Delta K} - 1 \right) \cdot \varphi(r) = 0, \quad (5)$$

где ΔK – добавка к $K_{эфф}$, обеспечивающая исходное состояние с $K_{эфф} = 1$ перед расчетом эффективности ОР СУЗ.

На экстраполированной границе активной зоны, удаленной на расстояние половины ширины кассеты, плотность потока нейтронов полагалась равной нулю. Стационарная задача решалась методом итераций на треугольной сетке с шагом, равным шагу размещения кассет ВВЭР-1200. Значение $K_{эфф}$ рассчитывалось из отношения рождающихся в активной зоне нейтронов и убывающих из нее. Для достижения состояния, при котором $K_{эфф} = 1$, варьировалась величина ΔK .

Математическая модель пространственно-временной задачи с шестью группами запаздывающих нейтронов описывается системой уравнений (6), (7) с начальными условиями

$$\varphi(0, r) = \varphi_{st}(r), C_i(0, r) = \varphi_{st}(r) \cdot \frac{\beta_i}{\Lambda \cdot \lambda_i};$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \varphi(t, r) = \varphi(t, r) \cdot \frac{\rho - \beta}{\Lambda} + \sum_{i=1}^6 C_i \cdot \lambda_i, \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} C_i(t, r) = \varphi(t, r) \cdot \frac{\beta_i}{\Lambda} - \lambda_i \cdot C_i(t, r), \quad (7)$$

где $\varphi_{st}(r)$ – значение плотности потока нейтронов, полученное из решения стационарной задачи при $K_{эфф} = 1$.

Система уравнений (6), (7) численно решалась с постоянным шагом по времени. На каждом шаге сначала рассчитывалось изменение плотности потока в каждой кассете независимо от других кассет. Затем рассчитывалось изменение плотности потоков в кассетах за счет диффузии нейтронов. Для расчета диффузии применялся тот же итераци-

онный метод решения, что и в стационарной задаче. При этом принималось значение ΔK , рассчитанное при решении стационарной задачи. Полученные значения плотности потоков использовались для расчета $K_{эфф}$ и реактивности на данном шаге и в качестве исходных данных для следующего шага во времени. Расчет $K_{эфф}$ выполнялся тем же способом, что и при решении стационарной задачи.

Физические характеристики реактора задавались следующими параметрами: K_{∞} для ТВС каждого типа с ОР СУЗ и без них и площадью миграции нейтронов M^2 , которая считалась одинаковой для всего реактора. Значения K_{∞} рассчитаны по ПС «Rainbow-TRP». Результаты расчета K_{∞} в ТВС различных типов приведены в таблице 1. Параметры запаздывающих нейтронов принимались в соответствии с данными работы [7] для ^{235}U и приведены в таблице 2. Величина M^2 для решеток ВВЭР-1200 из ТВС-2М была рассчитана по ПС «САПФИР-95.1». В расчетах была использована средняя величина M^2 , равная 68 см^2 .

Таблица 1

Значения K_{∞} для ТВС различных типов

Тип ТВС	K_{∞}	
	Извлеченные ОР СУЗ	Погруженные ОР СУЗ
Z13	0,856	0,628
Z24	1,077	0,821
Z33Z2	1,047	0,838
Z33Z9	1,077	0,847
Z40	1,233	0,974
Z44B2	1,153	0,914

Таблица 2

Параметры запаздывающих нейтронов для ^{235}U

№ группы	Период полураспада, с	Постоянная распада, с^{-1}	Доля
1	55,72	0,0124	2,317E-04
2	22,72	0,0305	1,521E-03
3	6,22	0,111	1,397E-03
4	2,30	0,301	2,953E-03
5	0,61	1,14	9,677E-04
6	0,23	3,01	3,291E-04

Двумерная математическая модель реактора реализована в программе «MathCAD». Вначале решается стационарная задача на собственное значение до и после введения в активную зону ОР СУЗ, в результате чего по изменению $K_{эфф}$ определяется эффективность ОР СУЗ. Затем решается нестационарная задача, имитирующая процесс введения ОР СУЗ в активную зону, в результате чего определяется изменение плотности потока нейтронов во времени в каждой кассете и в реакторе в целом. По изменению интегральной плотности потока нейтронов в реакторе во времени методом обращенного решения уравнений кинетики (ОРУК) [8] определяется вводимая в динамике реактивности.

С использованием двумерной модели реактора рассчитывалась эффективность отдельных групп ОР СУЗ и аварийной защиты при падении всех ОР СУЗ, а также при «застревании» отдельных ОР СУЗ. Нестационарные расчеты выполнены на интервале времени 0 – 60 с при шаге во времени 0,2 с. Падение ОР СУЗ имитировалось линейным изменением K_{∞} в ТВС с ОР СУЗ на интервале 0 – 2 с.

Верификация используемых при расчетах ПС и методик

Для подтверждения корректности получаемых результатов было проведено сравнение полей энерговыделения, полученных по прецизионному ПС «MCNP» и по ПС «Rainbow-TRP». Сравнение про-

водилось для активной зоны со всеми взведенными ОР СУЗ и для активной зоны со всеми погруженными ОР СУЗ. Результаты расчетов приведены на рис. 1.

Сравнение полей энерговыделения, полученных по ПС «Rainbow-TRP» и по простой двумерной модели реактора, показало, что использование этой модели позволяет получать корректные результаты. При проведении данного расчета в ПС «Rainbow-TRP» был применен боковой отражатель, дающий эффективную добавку, эквивалентную экстраполированной границе активной зоны в простой двумерной модели. Результаты расчетов приведены на рис. 2.

Полученные по ПС «Rainbow-TRP» поля энерговыделения хорошо согласуются с полями, полученными по прецизионному ПС «MCNP», что подтверждает корректность используемых библиотек и адекватность модели, применяемой для проведения стационарных расчетов. Проведенное сравнение с двумерной моделью показало адекватность получаемых результатов и подтвердило возможность использования двумерной модели для альтернативной оценки нейтронно-физических свойств реактора.

Расхождение в полях энерговыделения, полученных по ПС «Rainbow-TRP», с полями, полученными на двумерной модели реактора, вызваны различными подходами, реализованными в данных моделях, и значительной упрощенностью двумерной модели реактора.

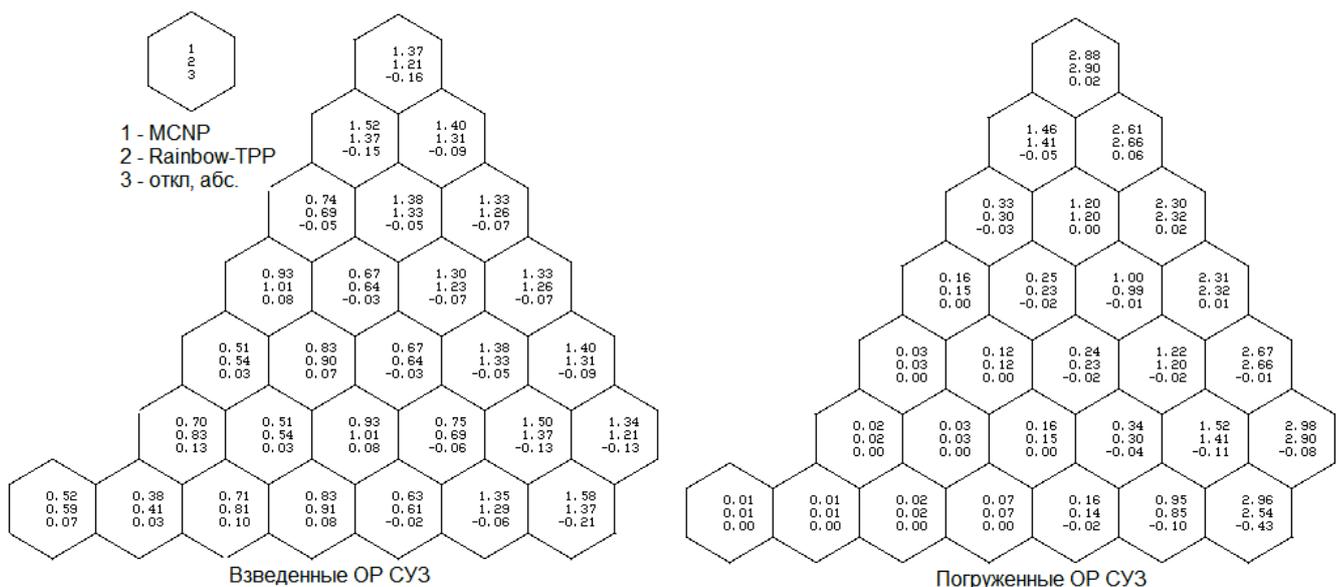


Рис. 1. Поля энерговыделения: «MCNP», «Rainbow-TRP»

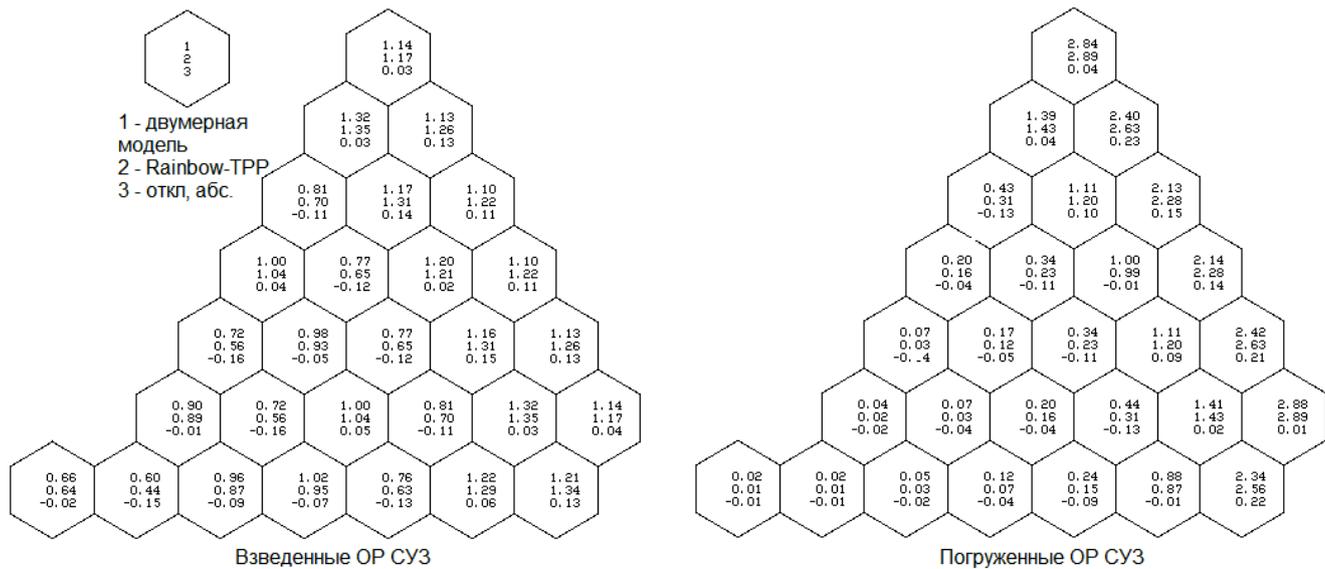


Рис. 2. Поля энерговыделения: двумерная модель, «Rainbow-TRP»

Корректность результатов, получаемых в ПС «Rainbow-TRP» при моделировании ионизационных камер и определении реактивности по их показаниям, а следовательно, и эффективности аварийной защиты, подтверждается данными статьи [5], в которой проведено сравнение результатов экспериментов по определению эффективности аварийной защиты и расчетов, выполненных по ПС «Rainbow-TRP».

Сравнение значений вводимой в реактор реактивности, определяемых по различным методикам

В ходе проведения данной работы был выполнен расчет интегральной эффективности отдельных групп ОР СУЗ. Расчеты выполнялись по ПС «Rainbow-TRP» и по двумерной модели реактора. Результаты расчетов приведены в таблице 3. При выполнении данных расчетов положение 12-й группы СУЗ составляло 80 % от низа активной зоны.

Как следует из таблицы 3, интегральная эффективность отдельных групп ОР СУЗ, а значит и подкритичность реактора при их погружении, определяемая из решения динамической задачи, систематически оказываются выше эффективности, определенной из решения стационарной задачи, как при проведении расчетов по ПС «Rainbow-TRP», так и по двумерной модели реактора.

Ниже представлены результаты расчетов вводимой в реактор реактивности при сбросе аварийной защиты. Расчет проводился для двух ситуаций: падение в активную зону всех ОР СУЗ и падение

всех ОР СУЗ с «застреванием» ОР СУЗ с координатами 02 – 29 и последующим его добросом. Таким образом, определялась полная эффективность аварийной защиты и эффективность «застрявшего» ОР СУЗ.

По ПС «Rainbow-TRP» проводились как стационарные расчеты, так и динамические по описанной выше методике. С применением двумерной модели также были проведены стационарные и динамические расчеты для альтернативной оценки степени подкритичности реактора и эффективности аварийной защиты.

Результаты расчета эффективности аварийной защиты и «застрявшего» ОР СУЗ с координатами 02 – 29 представлены в таблице 4.

На рис. 3 представлены результаты расчета вводимой в реактор реактивности при сбросе всех ОР СУЗ и с застрявшим ОР СУЗ с координатами 02 – 29, полученные из решения статической и динамической задачи с применением ПС «Rainbow-TRP».

Аналогичные данные, полученные с применением двумерной модели реактора, показаны на рис. 4. Причем расчеты введенной реактивности выполнены двумя способами: по балансу нейтронов в реакторе и путем решения ОРУК по изменению во времени суммарного потока нейтронов в реакторе.

Как следует из таблицы 3 и рис. 3 – 4, наблюдается значительное расхождение в значениях эффективности аварийной защиты, определяемой из решений стационарной и динамической задач. Причем реактивность, определяемая динамически, отличается от реактивности, получаемой из решения стационарной задачи, как с использованием ПС «Rainbow-TRP», так и двумерной модели реактора.

Таблица 3

Интегральные эффективности отдельных групп ОР СУЗ

№ группы	Полная интегральная эффективность $\Delta\rho$, %			
	Двумерная модель реактора. Стационарный расчет	«Rainbow-TPP». Стационарный расчет	Двумерная модель реактора. Динамический расчет	«Rainbow-TPP». Динамический расчет
1	1,24	1,56	1,38	1,58
2	1,30	1,56	1,48	1,61
3	0,806	1,15	0,918	1,19
4	0,806	1,15	0,918	1,19
5	0,325	0,56	0,369	0,58
6	0,509	0,67	0,592	0,72
7	0,313	0,50	0,356	0,44
8	0,117	0,18	0,132	0,23
9	0,659	1,11	0,754	1,11
10	0,821	1,06	0,934	1,08
11	0,769	0,96	0,862	0,95
12	0,294	0,38	0,334	0,38

Таблица 4

Полная эффективность аварийной защиты и «застрявшего» ОР СУЗ, %

Двумерная модель реактора. Стационарный расчет	«Rainbow-TPP». Стационарный расчет	Двумерная модель реактора. Динамический расчет	«Rainbow-TPP». Динамический расчет
Эффективность аварийной защиты $\Delta\rho$, %			
6,77	10,61	10,00	14,14
Эффективность ОР СУЗ с координатами 2 – 29 $\Delta\rho$, %			
0,44	1,01	0,90	0,34

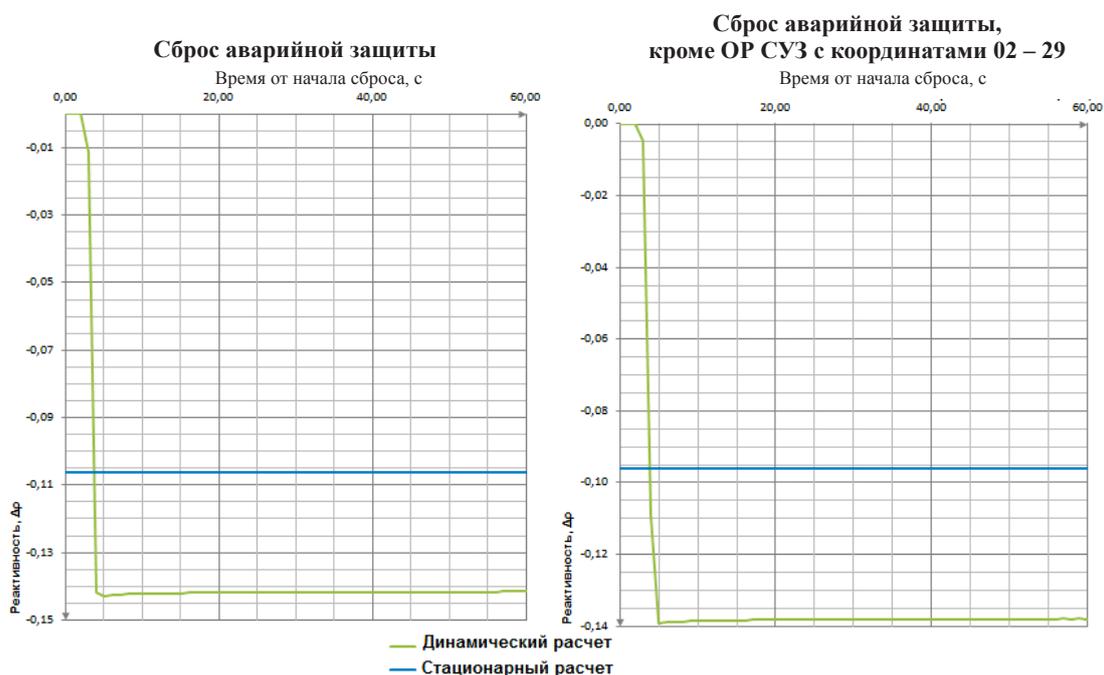


Рис. 3. Реактивность, определяемая по ПС «Rainbow TPP»

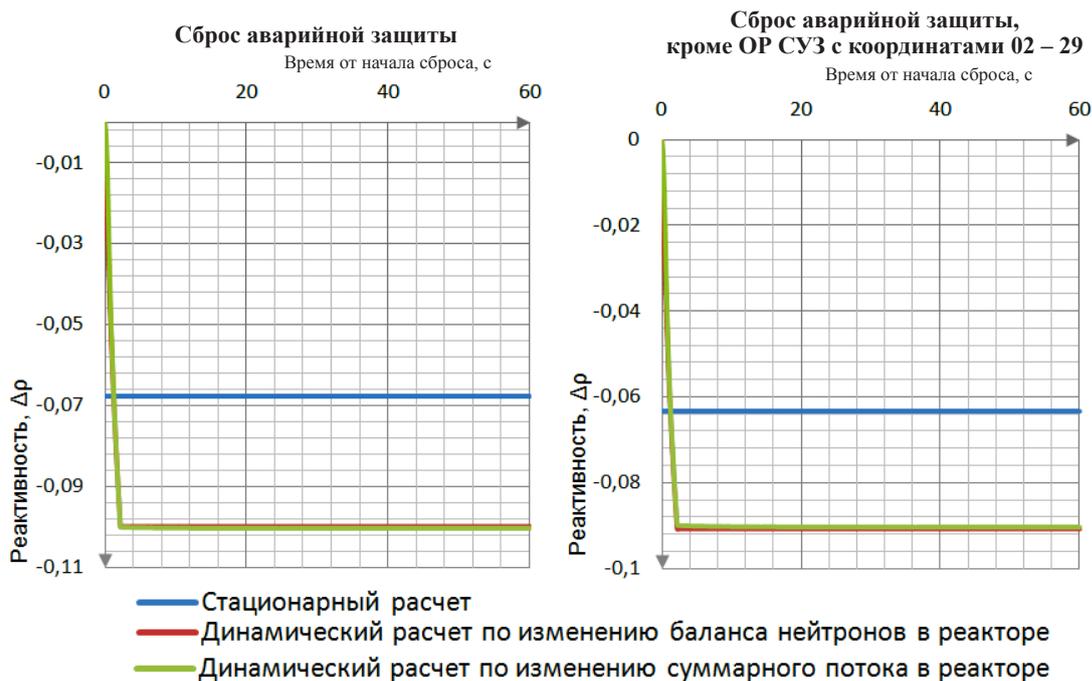


Рис. 4. Реактивность, определяемая по двумерной модели реактора

Объяснение наблюдаемого расхождения, по нашему мнению, следующее: реактор, который был в исходном стационарном состоянии, после ввода отрицательной реактивности не может оставаться в стационарном состоянии. Чтобы он снова пришел в это состояние, необходима перестройка его ней-

тронного поля, восстанавливающая баланс нейтронов в реакторе с погруженными ОР СУЗ. Поля энерговыделения, полученные по ПС «Rainbow-TRP» при проведении стационарного и динамического расчетов после сброса аварийной защиты с «застреванием» ОР СУЗ, приведены на рис. 5.

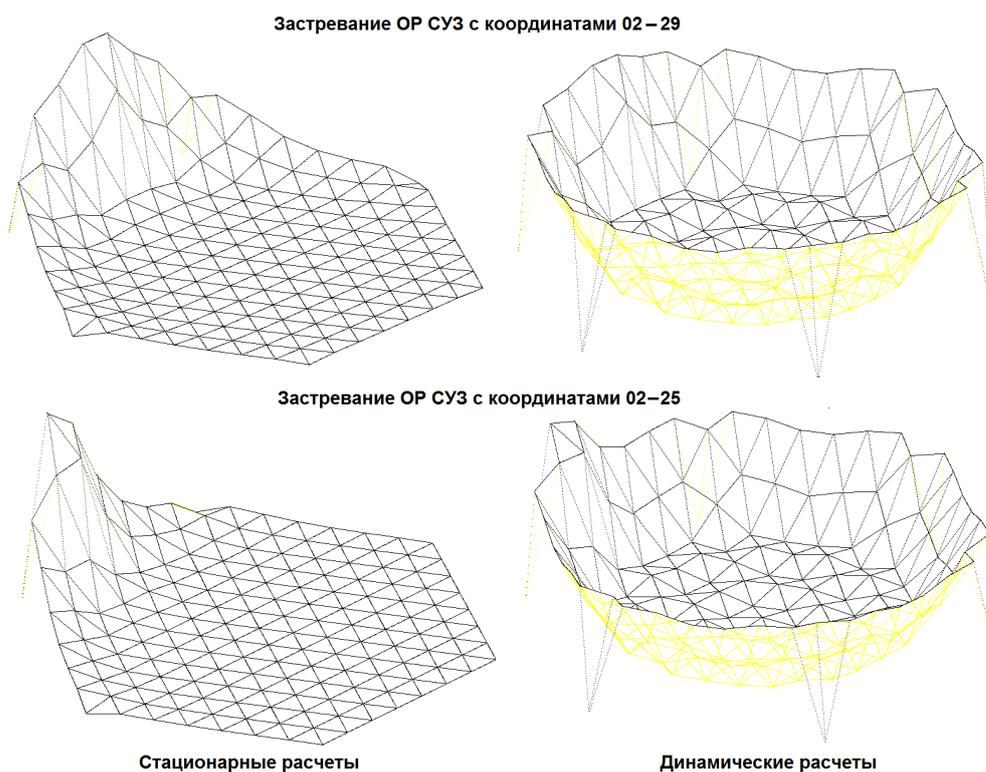


Рис. 5. Поля энерговыделения

Эта разница полей, в которых работают ОР СУЗ в стационарном и динамическом режимах, и является причиной наблюдаемого расхождения в эффективности ОР СУЗ.

Заключение

Результаты проведенной верификации подтвердили корректность используемых библиотек и адекватность модели, применяемой для проведения стационарных расчетов по ПС «Rainbow-TRP». Рассчитанные по ПС «Rainbow-TRP» поля энерговыделения показали хорошую сходимость с полями, рассчитанными по прецизионному ПС «MCNP».

Также была подтверждена возможность применения двумерной модели реактора для альтернативной оценки нейтронно-физических характеристик активной зоны.

Расчет интегральных эффективностей отдельных групп ОР СУЗ показал наличие систематического превышения эффективности, определяемой из динамических расчетов, над эффективностью, определяемой из стационарных расчетов, как при расчетах по ПС «Rainbow-TRP», так и при расчетах с применением двумерной модели реактора.

Проведенные расчеты эффективности аварийной защиты показали по двум указанным методикам аналогичное большое расхождение в получаемых результатах (до 30 %) между стационарными и динамическими расчетами. Причем наблюдаемое расхождение для реактора ВВЭР-1200 оказывается более значительным, чем для реактора ВВЭР-1000, что вызвано большим количеством ОР СУЗ в реакторе ВВЭР-1200 после срабатывания аварийной защиты, вызывающих более значительное изменение радиального нейтронного потока.

Представленные выше систематические расхождения в расчете эффективности ОР СУЗ, получаемые из решения условно-критической и динамической задач, говорят о том, что применяемая в настоящее время методика расчета эффективности ОР СУЗ, использующая решение стационарной задачи, является принципиально несовершенной. До настоящего времени вопрос о способе устранения данной систематической погрешности все еще открыт, и хотя методика определения эффективности ОР СУЗ из решения стационарной задачи дает консервативный результат и приемлема для обоснования безопасности, для реалистических расчетов эффективности ОР СУЗ представляется целесообразным использовать решение нестационарного уравнения кинетики.

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. Патент РФ 2224304, 6G21C 1/30, №2002104394. Способ экспериментального учета пространственного эффекта при измерении эффективности поглотителей в активной зоне критического ядерного реактора / Самонин В. Ю., Анненков В. Г.; заяв. 18.02.2002; опубл. 20.02.2004, Бюл. № 5.
3. Артемов В. Г., Зинатуллин Р. Э., Карпов А. С., Куракин К. Ю., Сальников А. А., Соловьев А. А., Беляков А. Ю. Оценка погрешности расчета эффективности органов регулирования и аварийной защиты в сравнении с экспериментальными данными, полученными на действующих реакторах типа ВВЭР / Материалы конференции МНТК-2009, ОКБ «ГИДОПРЕСС», Подольск, 2009 г. Режим доступа: gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2009/mntk2009-139.doc.
4. Выговский С. Б., Рябов Н. О., Чернов В. Е. Безопасность и задачи инженерной поддержки эксплуатации ядерных энергетических установок с ВВЭР. Учебное пособие. М., НИЯУ МИФИ, 2013.
5. 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, 2018.
6. 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.

7. Кипин Дж. Р. Физические основы кинетики ядерных реакторов. – М.: Атомиздат, 1967.
8. Казанский Ю. А., Матусевич Е. С. Экспериментальные методы физики реакторов. – М.: Энергоатомиздат, 1981.

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. RF Patent 2224304, 6G21C 1/30, №2002104394. Method of experimental allowance for spatial effect during absorber worth measurements in the core of critical nuclear reactor / V. Yu. Samonin, V.G. Annenkov; appl. 18.02.2002; publ. 20.02.2004, Bul. № 5.
3. V.G. Artemov, R.E. Zinatullin, A.S. Karpov, K.Yu. Kurakin, A.A. Salnikov, A.A. Belyakov, A.Yu. Belyakov. Evaluation of control and scram rod worth calculation error against experimental data obtained at operating VVER plants // Proceedings of ISTC-2009 Conference, GIDROPRESS Design Bureau, Podolsk, 2009. Access: gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2009/mntk2009-139.doc.
4. S.B. Vygovsky, N.O. Ryabov, V.E. Chernov. Safe operation of the VVER nuclear power plants and engineering support mission. Training material. M., MIFI, 2013.
5. 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, 2018.
6. V.V. Tebin, V.V. Obukhov, V.K. Sergeev, A.S. Ivanov et al. Draft software package 'SAPFIR' for reactor cell calculations // In a compilation 'Issues of nuclear science and engineering', ser. 'Phys. and eng. of nuclear reactors', issue 4, M.: CNIATOMINFORM, 1985.
7. G. R. Kipin. Basic physics of nuclear reactor kinetics. – М.: Atomizdat, 1967.
8. Yu. A. Kazansky, E.S. Matusevich. Experimental reactor physics techniques. – М.: Energoatomizdat, 1981.

