

В. В. Гальченко^{1,2,*}, А. А. Мишин², И. И. Шлапак¹

¹ Частное акционерное общество «Северодонецкое научно-производственное объединение «Импульс»,
Северодонецк, Украина

² Общество с ограниченной ответственностью «Институт поддержки эксплуатации АЭС»,
Киев, Украина

*Ответственный автор: v.galchenko@npp-osi.kiev.ua

КОНСТАНТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОДСИСТЕМЫ ФИЗИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ СВРК-М «ВОЯЖ»

Приведено краткое описание метода полиномиальной интерполяции нейтронно-физических малогрупповых гомогенизированных констант для реактора ВВЭР-1000. Выполнены расчеты поля энерговыделения активной зоны с применением данного метода для различных моментов времени топливной кампании. Дан сравнительный анализ результатов расчета коэффициентов неравномерности энерговыделения k_v и k_q с подготовленным константным обеспечением по представленному методу при использовании разных программных продуктов.

Ключевые слова: система внутриреакторного контроля, СВРК-М, HELIOS, константное обеспечение, ВВЭР-1000, неравномерность энерговыделения, компьютерные коды.

Распределение потока нейтронов в активной зоне ядерного реактора может быть получено как решение уравнения переноса нейтронов [1]. Однако вычисление переноса нейтронов для всей активной зоны реактора требует неприемлемо длительного времени, поэтому нейтронно-физические расчеты сложной гетерогенной системы и для сложных характеристик взаимодействия обычно разделяют на два этапа, которые предполагают пошаговое уменьшение уровня детализации расчета.

Первый этап – это гомогенизация отдельных расчетных объемов, которые являются «элементами периодичности» активной зоны – обычно тепловыделяющая сборка (ТВС). Процедура гомогенизации предполагает переход от сложной гетерогенной структуры выбранного объема к простой гомогенной геометрии, а многогруппового распределения нейтронов по энергии к малогрупповому. Обычно процедура гомогенизации выполняется при помощи ячеечных кодов (lattice codes), например WIMS, HELIOS, NESSEL, ТВС-М [2 - 4]. Результатом первого этапа является получение гомогенизированных макроскопических констант в малогрупповом энергетическом представлении для конкретного типа ТВС, а также их зависимостей от различных параметров состояния кассеты.

Второй этап – расчет распределения потока нейтронов и поля энерговыделения всей активной зоны ядерного реактора. Такие расчеты для водородных реакторов обычно основаны на малогрупповых диффузионных методах. Чаще всего используют только две энергетические группы: одна группа включает в себя термализованные нейтроны (тепловая группа), другая – все осталь-

ные нейтроны (быстрая группа). Геометрия активной зоны на втором этапе представляется в виде макроскопических гомогенизированных регионов, называемых ячейками или нодами. Расчет такой системы позволяет получить полномасштабное пространственное распределение потоков нейтронов и поле энерговыделения.

Точность и качество выполнения таких расчетов очень зависит от того, как было подготовлено соответствующее константное обеспечение.

В статье приведено описание методики подготовки константного обеспечения СВРК-М для сортов ТВС. Базируясь на приведенной методике, в дальнейшем будут проведены необходимые расчеты для возможного расширения базы условно-постоянных данных в части константного обеспечения для различных типов ТВС.

1. Общий подход

Постановка задачи. Получаемое в реальном времени поле энерговыделения в объеме активной зоны является основой внутриреакторного контроля. По полю энерговыделения определяется большинство функционалов, контроль которых обеспечивает сохранность топлива в активной зоне при стационарных и переходных режимах работы реакторной установки (РУ).

Информация о нейтронно-физических характеристиках (НФХ) топлива и константы для расчета коэффициента чувствительности детекторов прямого заряда (ДПЗ) содержится в базе условно-постоянных данных подсистемы физических расчетов (ПФР) и относится к информационному обеспечению системы внутриреакторного контроля (СВРК) [5].

© В. В. Гальченко, А. А. Мишин, И. И. Шлапак, 2018

Константное обеспечение описывает свойства конкретных типов ТВС и конкретных типов ДПЗ. В настоящее время на энергоблоках АЭС с ВВЭР-1000 Украины применяется два типа топлива: топливо типа ТВСА российского производства и топливо ТВС-WR компании «Вестингауз», а также два типа ДПЗ – российского и украинского производства. Содержащееся в базе условно-постоянных данных СВРК-М константное обеспечение описывает НФХ только ТВСА различных обогащений, а также ДПЗ, установленных в ТВСА. Внедрение нового типа топлива требует расширения базы условно-постоянных данных СВРК-М в части константного обеспечения топлива и ДПЗ.

Исследования в области подготовки малогрупповых гомогенизированных макроскопических констант ведутся достаточно давно и носят систематический характер [6, 7]. Задачу подготовки константного обеспечения в некотором приближении можно отделить от задачи расчета активной зоны в целом, что позволяет рассматривать активную зону реактора как набор отдельных элементов. НФХ этих элементов, в зависимости от материальных параметров, задаются заранее.

Гомогенизированные малогрупповые нейтронные сечения зависят от различных величин, характеризующих состав материалов и теплогидравлические условия в активной зоне, которые являются параметрами состояния. Эти макроскопические сечения для использования в расчетных программах можно представить в виде некоторой функции, с помощью которой они могут быть восстановлены для любых значений параметров состояния [6].

Цель работы. Для повышения экономичности использования топлива, а также улучшения эффективности и безопасности топливных циклов производители ядерного топлива должны проводить модернизацию ТВС, а эксплуатирующие организации – модернизацию топливных циклов. Соответственно и СВРК также должна быть оснащена средствами модернизации программного и информационного обеспечения, позволяющими эксплуатирующей организации самостоятельно вносить необходимые изменения в системы.

Методика подготовки константного обеспечения СВРК-М, которые эксплуатируются на АЭС Украины, обеспечивает возможность эксплуатирующей организации эксплуатировать топливо разных поставщиков. Показана возможность применения программного продукта HELIOS для целей подготовки соответствующих аппроксимационных коэффициентов.

2. Асимптотическое приближение

Исходной информацией для получения оценки состояния реактора на заданный момент времени служат сигналы датчиков технологического контроля, поступающие от аппаратуры СВРК и других систем, а также математические соотношения, описывающие эволюцию переменных состояния реактора и связь между ними [5].

На сегодняшний день в Украине на энергоблоках АЭС с ВВЭР-1000 эксплуатируются СВРК трех типов. Это СВРК с ПФР «Хортица», «Вояж» и «Веасон».

ПФР «Хортица» и «Вояж», основная задача которых заключается в определении поля энерговыделения, являются программными продуктами, созданными на базе семейства программ БИПР [8]. Поэтому поле энерговыделения и другие физические поля в активной зоне рассчитываются с учетом подхода, принятого для этих программ.

Получение распределения поля энерговыделения во всем объеме активной зоны производится на основе решения уравнения диффузии нейтронов в одно- или полуторагрупповом приближении по схеме, принятой в программах расчета активной зоны ВВЭР типа БИПР [9]:

$$\Delta\Phi + \chi^2\Phi = 0,$$

где Φ – поток нейтронов; χ^2 – материальный параметр.

При определении энерговыделения в кассете через поток нейтронов используется асимптотическая часть решения уравнения диффузии по зависимости

$$\Psi = \frac{kD_f E}{vM^2},$$

где k – коэффициент размножения нейтронов; D_f – коэффициент диффузии нейтронов в «быстрой» энергетической группе, см; E – энергия, которая выделяется на один акт деления, Дж; v – число нейтронов на один акт деления; M^2 – площадь миграции, см².

Асимптотическое приближение позволяет уменьшить количество необходимых сечений и коэффициентов с девяти (сечения, входящие в уравнение диффузии) до пяти, которые показаны выше. Сами сечения задаются в виде набора коэффициентов аппроксимации по выгоранию и параметрам ТВС и получаются по предварительным расчетам с помощью мелкосеточных программ.

3. Аппроксимационные коэффициенты

Один из вариантов построения модели макроскопических сечений заключается в том, что, руководствуясь знаниями о физической системе, в качестве опорной точки выбирают состояние при номинальных условиях, а затем поочередно изменяют значения каждого параметра состояния.

Другой уже применявшийся подход заключается в интерполяции или аппроксимации зависимостей макроскопических сечений с помощью тензорных произведений одномерных базисных

функций. В качестве таких функций часто используют кусочно-линейные функции.

3.1. Расчетная сетка

Аппроксимационные коэффициенты получают на сетке из пяти опорных состояний, которые соответствуют «рабочему» состоянию, состоянию с пониженным уровнем мощности, состоянию на минимально контролируемом уровне (МКУ), «холодному» состоянию и «свежей» активной зоне (табл. 1).

Таблица 1. Параметры опорных состояний

Параметр	Номер состояния				
	S1	S2	S3	S4	S5
Температура топлива, К	575,0	553,0	473,0	393,0	300,0
Температура замедлителя, К	575,0	553,0	473,0	393,0	300,0
Плотность замедлителя, г/см ³	0,7241	0,7657	0,8754	0,9508	1,0035
Концентрация природного бора в теплоносителе, г/кг	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

При этом принимается, что концентрация изотопов ¹³⁵Xe и ¹⁴⁹Sm равняется нулю.

В работе [7] показано, что изменение концентрации борной кислоты в процессе выгорания топлива практически не влияет на зависимости материального параметра (а следовательно, и коэффициента размножения). Поэтому для определения аппроксимационных зависимостей проводится один расчет выгорания топлива при средней концентрации борной кислоты в теплоносителе.

Кроме того, известно, что различные участки объема активной зоны выгорают при различных значениях температур топлива и теплоносителя. В [7] показано, что неучет характера выгорания топлива от изменения параметров состояния различных частей активной зоны может приводить к незначительным ошибкам в определении коэффициента размножения. Поэтому предполагается, что использование единого набора аппроксимационных коэффициентов, полученного из расчета выгорания при средних параметрах состояния активной зоны, не приведет к заметным ошибкам в определении длительности кампании.

Таким образом, для определения искомым зависимостей выполняются расчет гомогенизиро-

ванных характеристик при некоторых средних параметрах активной зоны реактора и расчет отклонения при изменении параметров для той же глубины выгорания. Такими параметрами для расчета выгорания являются мощность РУ (100 % номинальной), температура теплоносителя T_{cool} = 305 °С (578 К), плотность теплоносителя γ_{cool} = 0,71614 г/см³, концентрация борной кислоты в теплоносителе 3 г/кг.

Параметры теплоносителя и топлива по высоте активной зоны изменяются только при работе реактора на мощности. В других состояниях РУ, например «горячий» либо «холодный» останов, нет повысотного изменения параметров. Но все эти состояния характеризуются наличием борной кислоты в теплоносителе и ее концентрацией.

Кроме того, несложно показать, что значения коэффициентов аппроксимации по температуре теплоносителя и топлива не зависят от выбора опорного состояния, тогда как для концентрации борной кислоты такая зависимость очень существенна. Производная по концентрации бора берется во всех пяти «опорных» состояниях. Сетка таких производных по концентрации бора приведена в табл. 2.

Таблица 2. Значения концентрации природного бора C_B, г/кг, для каждого состояния

Номер состояния				
S1	S2	S3	S4	S5
C(¹³⁵ Xe) = 0, C(¹⁴⁹ Sm) = 0	C(¹³⁵ Xe) = 0, C(¹⁴⁹ Sm) = 0	C(¹³⁵ Xe) = 0, C(¹⁴⁹ Sm) = 0	C(¹³⁵ Xe) = 0, C(¹⁴⁹ Sm) = 0	C(¹³⁵ Xe) = 0, C(¹⁴⁹ Sm) = 0
0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
0,6	0,7	0,8	0,9	0,9
1,2	1,4	1,6	1,8	1,8
1,8	2,1	2,4	2,7	2,7

Параметры топлива и теплоносителя соответствуют состояниям, приведенным в табл. 1.

Производные состояния по температуре топлива и теплоносителя формируются только в узле сетки, соответствующей работе установки на

мощности (табл. 3 и 4). Параметры теплоносителя соответствуют возможному диапазону изменения по высоте активной зоны с учетом максимально нагруженной ТВС.

Таблица 3. Расчетные состояния для получения аппроксимационных коэффициентов по температуре топлива

Параметр	Значение						
Температура топлива, К	350	575	900	1060	1200	1600	1800
Температура замедлителя, К	575	575	575	575	575	575	575
Плотность замедлителя, г/см ³	0,7241	0,7241	0,7241	0,7241	0,7241	0,7241	0,7241

Таблица 4. Расчетные состояния для получения аппроксимационных коэффициентов по температуре теплоносителя

Параметр	Значение						
Температура топлива, К	560	567,5	575	582,5	590	598	605
Температура замедлителя, К	560	567,5	575	582,5	590	598	605
Плотность замедлителя, г/см ³	0,7532	0,7392	0,7241	0,7079	0,6903	0,6541	0,6464

Производные состояния по температуре теплоносителя включают в себя изменение плотности теплоносителя, что является некоторым отступлением от подхода, принятого в математической физике к решению дифференциальных уравнений в частных производных [10].

Изменение температуры теплоносителя оказывает малое влияние на НФХ системы, в то время как

изменение плотности приводит к их сильным изменениям [11]. Представленная сетка по температуре и плотности теплоносителя описывает только однофазное жидкое состояние теплоносителя.

3.2. Полиномиальное представление

Коэффициент размножения нейтронов в СВРК определяется как

$$K_0(\rho_{Sh}, \rho_{Sm}, C_B, T_U, T_{H_2O}, \rho_{Xe}) = [K_{Sh}(\rho_{Sh}) + K_{Sm}(\rho_{Sh}, \rho_{Sm})] K_B(\rho_{Sh}, C_B) + K_U(\rho_{Sh}, T_U) + K_{H_2O}(\rho_{Sh}, T_{H_2O}) + K_{Xe}(\rho_{Sh}, C_B, \rho_{Xe}),$$

где K_{Sh} – коэффициент размножения нейтронов для пяти «базовых» состояний с учетом выгорания (концентрации шлаков); $K_{Sm}(\rho_{Sh}, \rho_{Sm})$ – отклонение K_{Sh} при учете влияния самария; $K_B(\rho_{Sh}, C_B)$ – отклонение K_{Sh} при изменении концентрации бора в теплоносителе; $K_U(\rho_{Sh}, T_U)$ – отклонение K_{Sh} при изменении

температуры топлива; $K_{H_2O}(\rho_{Sh}, T_{H_2O})$ – отклонение K_{Sh} при изменении температуры теплоносителя; $K_{Xe}(\rho_{Sh}, C_B, \rho_{Xe})$ – отклонение K_{Sh} при учете влияния ксенона и при изменении концентрации борной кислоты. Расчетные состояния при изменении концентрации борной кислоты соответствуют приведенным в табл. 2 но с учетом влияния ксенона ($C(^{135}Xe) = 1$).

Площадь миграции:

$$M_0^2(\rho_{Sh}, \rho_{Sm}, C_B, T_U, T_{H_2O}, \rho_{Xe}) = M_{Sh}^2(\rho_{Sh}) + M_U^2(\rho_{Sh}, T_U) + M_{H_2O}^2(\rho_{Sh}, T_{H_2O}) + M_{He}^2(\rho_{Sh}, \rho_{Xe}) + M_{Sm}^2(\rho_{Sh}, \rho_{Sm}) + M_B^2(\rho_{Sh}, C_B),$$

где $M_{Sh}^2(\rho_{Sh})$ – площадь миграции для пяти «базовых» состояний с учетом выгорания; $M_U^2(\rho_{Sh}, T_U)$ – отклонение площади миграции при изменении температуры топлива; $M_{H_2O}^2(\rho_{Sh}, T_{H_2O})$ – отклонение площади миграции при изменении

температуры теплоносителя; $M_{Xe}^2(\rho_{Sh}, \rho_{Xe})$, $M_{Sm}^2(\rho_{Sh}, \rho_{Sm})$ – отклонение площадей миграции при наличии ксенона и самария; $M_B^2(\rho_{Sh}, C_B)$ – отклонение площади миграции при изменении концентрации бора в теплоносителе.

Получаемые отклонения параметров от опорных состояний аппроксимируются полиномами различной степени, обычно второй или третьей, в зависимости от влияния изменяющегося параметра на искомую величину.

4. Валидационные расчеты

Достаточным способом проверки корректности полученных аппроксимационных зависимостей будет создание некоей сетки состояний, где при заданных параметрах системы (тип ТВС, температура топлива и теплоносителя, плотность теплоносителя, концентрация борной кислоты, глубина выгорания) необходимо получить значения макроскопических сечений расчетными кодами и сравнить полученные значения с пересчетом по аппроксимационным коэффициентам. Но из-за отсутствия лицензии на программный продукт ТВС-М в Украине в полном объеме такой подход осуществить невозможно. Поэтому для валидации аппроксимационных коэффициентов применялся более сложный подход верификации самой методики [12] и самих констант, который включал в себя как формирование расчетной сетки состояний, так и расчет основных характеристик топливных кампаний с использованием различного набора константного обеспечения.

4.1. Расчеты разными кодами

Коэффициент размножения нейтронов является интегральной характеристикой, которая достаточно полно описывает поведение системы. Отклонение между расчетными программами в определении значения коэффициента размножения нейтронов на 1% будет приводить к отклонению прогнозирования концентрации борной кислоты на уровне 0,5 г/кг и соответственно к отклонению прогнозирования длительности кампании до 20 эф. сут, что достаточно существенно при определении характеристик топливных загрузок.

Расчет состояний для получения коэффициентов аппроксимации проводился хорошо известными программными продуктами WIMSD5B [13] и HELIOS [14], расчетные схемы ТВС которых представлены в [15, 16]. Программный продукт HELIOS верифицирован для нейтронно-физических расчетов топлива ВВЭР в Украине и включен в перечень разрешенных к использованию в ГП «НАЭК «Энергоатом» расчетных кодов.

Результаты сравнения коэффициентов размножения нейтронов для различных типов ТВС с коэффициентами размножения, рассчитанными с помощью коэффициентов аппроксимации, которые получены программным продуктом ТВС-М, приведены на рис. 1 и 2.

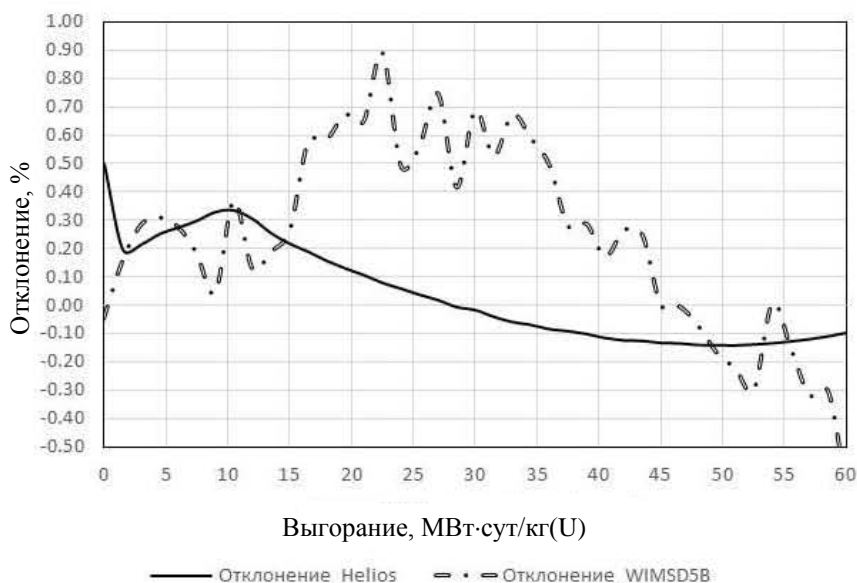


Рис. 1. Отклонение коэффициента размножения для выбранного состояния в расчете различными кодами для ТВСА 439МТ.

Из рис. 1 и 2 видно, что полученные значения коэффициента размножения нейтронов для различных состояний и с использованием различных программных продуктов достаточно хорошо коррелируют между собой.

Отклонения между результатами расчетов с помощью ТВС-М и HELIOS имеют одинаковый характер с представленными в [17].

Расчеты по WIMSD5B приведены с целью отслеживания динамики изменения характеристик. Точность расчетов WIMSD5B не отвечает требованиям по точности определения НФХ топливной кампании, но корректно прогнозирует поведение искомой величины с изменением параметров состояния [3, 14].

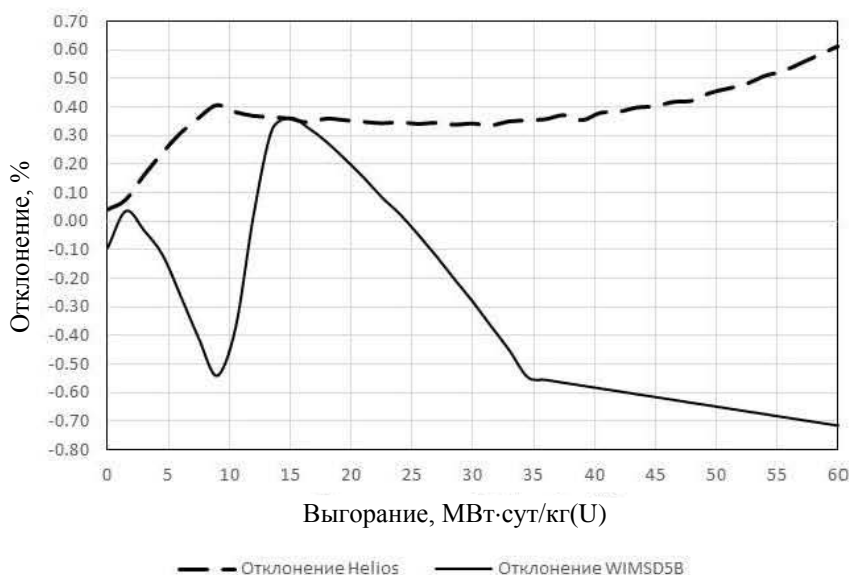


Рис. 2. Отклонение коэффициента размножения для выбранного состояния в расчете различными кодами для ТВСА 398МО.

4.2. Расчеты активной зоны

Для проверки корректности подготовки аппроксимационных коэффициентов, полученных с использованием программного продукта HELIOS, проведен огромный объем расчетов для различных топливных загрузок с разным набором константного обеспечения на полигоне СВРК компании «Импульс».

Расчеты с уже существующим набором константного обеспечения, подготовленного с использованием программного продукта ТВС-М, являлись тестовыми. Результаты таких расчетов обозначены как Н1. Результаты расчетов, полученные с использованием константного обеспечения, подготовленного кодом HELIOS, обозначены как Н2.

Задача расчетов – подтвердить, что оба набора аппроксимационных коэффициентов взаимозаменяемы (результаты расчетов с разным набором аппроксимационных коэффициентов статистично эквивалентны). То есть необходимо обеспечить значение величины среднеквадратического

отклонения (СКО) $\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(\frac{x_i^1 - x_i^2}{x_i^1} \right)^2}$ такое,

которое характеризуется в основном различиями в используемых программных продуктах. В приведенной формуле под x понимается исследуемая величина (например, k_v – объемный коэффициент неравномерности энерговыделения), а под N – количество расчетных точек (например, $N = 163.7$ для семислойного представления k_v).

Получаемые значения σ для различных кампаний, различных состояний РУ, на различные моменты кампании не превышали 2,4 %, снижаясь для состояний на конец кампании. Максимальное значение СКО в начале топливной кампании и снижение на конец объясняется тем, что задаваемые начальные распределения выгорания топлива и распределения ^{149}Sm получены с использованием данных набора Н1. Неопределенность в распределении выгорания топлива и распределения ^{149}Sm в начальных данных «устранялась» в процессе расчета выгорания другим набором, что и приводит к снижению отклонений.

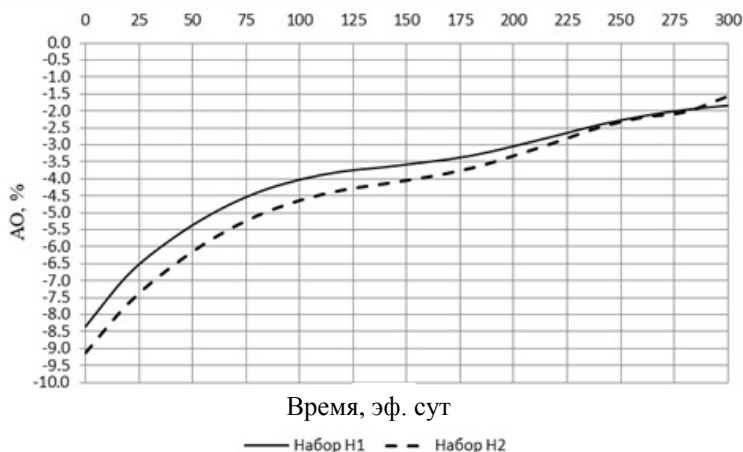


Рис. 3. Изменение аксиального офсета (АО) за кампанию.

Графики сравнения некоторых основных величин, полученные с разным набором коэффициентов аппроксимации, приведены на рис. 3 - 7).

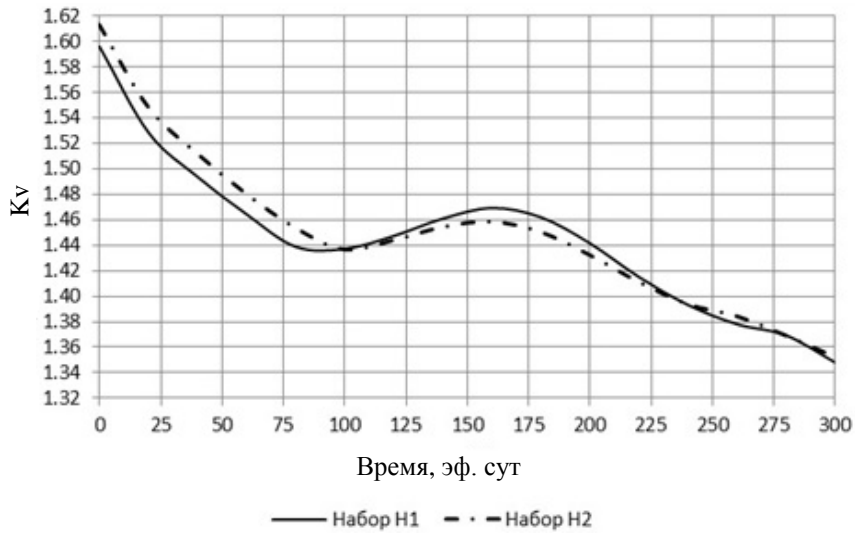


Рис. 4. Изменение максимального объемного коэффициента неравномерности (K_v) энерговыделения за кампанию.

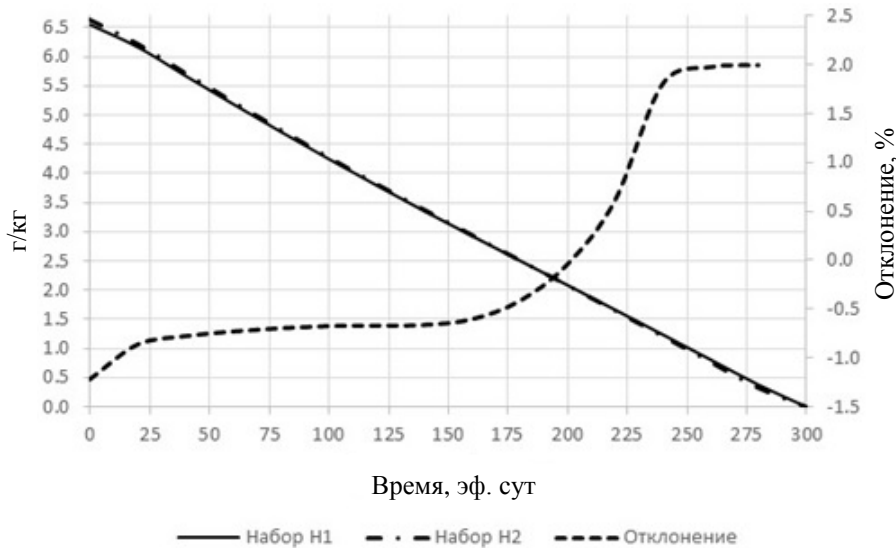


Рис. 5. Изменение концентрации борной кислоты за кампанию.

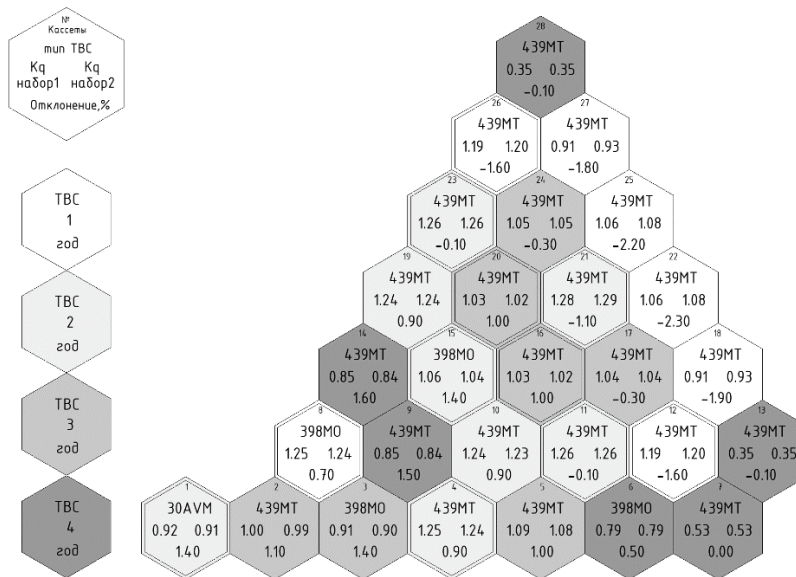


Рис. 6. Покасетное поле энерговыделения на 40 эф. сут.

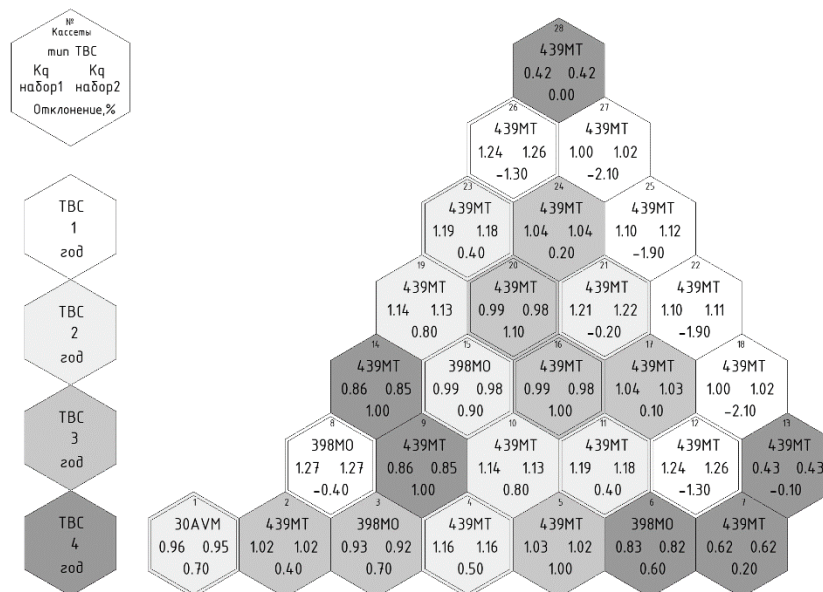


Рис. 7. Покассетное поле энерговыделения на 280 эф. сут.

Как видим, результаты расчетов с разным набором аппроксимационных коэффициентов статистически эквивалентны, а наборы взаимозаменяемы.

5. Выводы

Представлена методика подготовки константного обеспечения для использования в базе условно-постоянных данных СВРК-М «Вояж» на энергоблоках АЭС Украины с ВВЭР-1000. Константное обеспечение, разработанное по приведенной методике с использованием программного продукта HELIOS, является корректным; его можно использовать в СВРК с ПФР «Вояж» на АЭС Украины.

Показано, что расчетная сетка по температуре и плотности теплоносителя описывает только однофазное жидкое состояние теплоносителя. Двухфазная среда не описывается представленной сеткой.

СВРК, которая эксплуатируется на энергоблоках АЭС с ВВЭР, предназначена для обеспечения контроля нейтронно-физических параметров активной зоны РУ фактически в условиях нормальной эксплуатации, т.е. при работе реактора на различных уровнях мощности (включая и МКУ). Это связано как с модулем расчета и определения теплогидравлических характеристик активной зоны, так и с методикой расчета и восстановления энерговыделения.

Согласно ДСТУ ГОСТ 26635:2012, диапазон измерений должен составлять от 10 до 120 % номинальной мощности, что указывает на необходимость контроля энерговыделения и в возможных переходных процессах. Поэтому одним из этапов модернизации СВРК должно являться развитие методологии выполнения нейтронно-физических расчетов и восстановления поля энерговыделения для обеспечения контроля в различных режимах эксплуатации активной зоны.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. С.В. Широков. *Физика ядерных реакторов*. Изд. 2-е (К., 1998) 228 с.
2. I. Bilodid et al. Assessment of Spectral History Influence on PWR and WWER core. *Kerntechnik* 77(4) (2012) 278.
3. В.В. Гальченко Сравнительный анализ подготовки данных с использованием различных компьютерных кодов. Ч. 2. Ядерні та радіаційні технології 3-4 (2007) 29.
4. V.D. Sidorenko et al. Spectral Code TVS-M for Calculation of Cells, Supercells and Fuel Assemblies VVER-type Reactors. 5-th Symposium of the AER. Dobotoko, Hungary, Oct. 15 - 20, 1995.
5. В.А. Брагин и др. *Система внутрореакторного контроля АЭС с реакторами ВВЭР*. Под ред. Г.Л. Левина (М.: Энергоатомиздат, 1987) 128 с.
6. J. Watson et al. *Cross-Section Generation Methodology for Three-Dimensional Transient Reactor Simulation* (TANSAO77, 1997) 175 p.
7. Е.А. Жолкевич. Аппроксимация зависимостей нейтронно-физических характеристик решеток ВВЭР от параметров состояния активной зоны. Программа ОКА. Препринт ИАЭ-3558/5 (М., 1982) 69 с.
8. Д.М. Петрунин, Е.Д. Беляева, И.Л. Киреева. БИПР-5 – программа для расчета трехмерных полей энерговыделений и выгорания топлива в одноклассовом диффузионном приближении для реакторов типа ВВЭР. Препринт ИАЭ-2518. (М., 1975) 33 с.

9. А.А. Мараказов. Методика расчета мощностей каскет реакторов ВВЭР в двухгрупповом диффузионном приближении (М.: ИАЭ, 1977) 30 с.
10. А.Б. Бакушинский, В.К. Власов. *Элементы высшей математики и численных методов*. Под ред. И.С. Березина (М.: Просвещение, 1968) 336 с.
11. В.В. Гальченко, О.В. Неделин. Сравнительный анализ подготовки малогрупповых констант с использованием различных компьютерных кодов. Ч. 1. Ядерная и радиационная безопасность 6(3) (2003) 61.
12. О.В. Самойличенко, В.М. Мокійчук. Валідація аналітичних методик як невід’ємна частина забезпечення якості результатів випробувань. *Електротехнічні та комп’ютерні системи* 6(82) (2012) 228.
13. J.R. Askew, F.J. Fayers, P.B. Kemshell. A general Description of the lattice Code WIMS. *Journal of British Nuclear Energy Society* 5(1) (1966) 564.
14. J.J. Casal et al. HELIOS: Geometric Capabilities of a New Fuel-Assembly Program. Proc. Int. Top. Mtg. Adv. Math. Comp. Reac. Phys., Pittsburg, PA, USA, 1992. Vol. II, Sect. 10.2.1, 1-13.
15. В.В. Гальченко, А.А. Мішин. Порівняльний аналіз нейтронно-фізичних характеристик кампанії реактора з використанням різних наборів бібліотек ядерних даних для програмного продукту WIMSD5B. *Ядерна та радіаційна безпека* 3(67) (2015) 8.
16. I. Ovdiienko et al. Development of cross-section library for DYN3D code. *Nuclear and Radiation Safety* 4(64) (2014) 22.
17. A VVER-1000 LEU and MOX Assembly Computational Benchmark. Specification and results. *Nuclear Science NEA/NSC/DOC(2002)10*. 156 p.

В. В. Гальченко^{1,2,*}, А. А. Мішин², І. І. Шлапак¹

¹ *Приватне акціонерне товариство «Севєродонецьке науково-виробниче об'єднання «Імпульс», Севєродонецьк, Україна*

² *Товариство з обмеженою відповідальністю «Інститут підтримки експлуатації АЕС», Київ, Україна*

*Відповідальний автор: v.galchenko@npp-osi.kiev.ua

КОНСТАНТНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПІДСИСТЕМИ ФІЗИЧНИХ РОЗРАХУНКІВ СВРК-М «ВОЯЖ»

Коротко описано метод поліноміальної інтерполяції малогрупових констант для реактора ВВЕР-1000. Виконано розрахунки поля енерговиділення із застосуванням цього методу для різних моментів паливної кампанії. Наведено порівняльний аналіз результатів розрахунку коефіцієнтів нерівномірності k_v і k_q з підготовленим константним забезпеченням за представленим методом і використанням різних програмних продуктів.

Ключові слова: система внутрішньореакторного контролю, СВРК-М, HELIOS, константне забезпечення, ВВЕР-1000, нерівномірність енерговиділення, комп’ютерні коди.

V. V. Galchenko^{1,2,*}, A. A. Mishin², I. I. Shlapak¹

¹ *Private Joint Stock Company “Severodonetsk Research and Production Association “Impulse”, Severodonetsk, Ukraine*

² *Limited Liability Company “Nuclear Power Plant Operational Support Institute”, Kyiv, Ukraine*

*Corresponding author: v.galchenko@npp-osi.kiev.ua

CONSTANT SUPPORT OF PHYSICAL CALCULATIONS SUBSYSTEM OF IN-CORE MONITORING SYSTEM “VOYAGE”

In this study a brief description of the polynomial interpolation of few-group constants on sparse grids for VVER-1000 reactor is adduced. The calculations about various burnup instances were made for the method. Besides, comparative analysis of the irregularity factor of k_v and k_q calculation was made with the help of the preparation of constants by using this method while arranging by different software products.

Keywords: in-core monitoring system, HELIOS, VVER-1000, cross-section, power distribution, computer codes.

REFERENCES

1. S.V. Shirokov. *Physics of Nuclear Reactors*. 2-nd edition (Kyiv, 1998) 228 p. (Rus)
2. I. Bilodid et al. Assessment of Spectral History Influence on PWR and WWER core. *Kerntechnik* 77(4) (2012) 278.
3. V.V. Galchenko. Data preparation comparison analysis using difference computer codes. Part 2. *Nuclear and Radiation Technologies* 7(3-4) (2007) 29. (Rus)
4. V.D. Sidorenko et al. Spectral Code TVS-M for Calculation of Cells, Supercells and Fuel Assemblies VVER-type Reactors. 5-th Symposium of the AER. Dobotoko, Hungary, Oct. 15 - 20, 1995.
5. V.A. Bragin et al. *VVER-1000 NPP's In-core Monitoring System*. Ed. G.L. Levin (Moskva: Energoatomizdat, 1987) 128 p. (Rus)

6. J. Watson et al. *Cross-Section Generation Methodology for Three-Dimensional Transient Reactor Simulation* (TANSAO77, 1997) 175 p.
7. E.A. Zholkevich. Neutron-physics dependences approximation for VVER grid dependence from core parameters. ОКА Soft. Preprint IAE-3558/5 (Moskva, 1982) 69 p. (Rus)
8. D.M. Petrunin, E.D. Beliayeva, E.L. Kireeva. BIPR-5 – computer code for three-dimensional power distribution and burnup calculation in one-group approach for VVER reactor type. Preprint IAE-2518 (Moskva, 1975) 33 p. (Rus)
9. A.A. Marakazov. VVER reactor type fuel assemblies power calculation method in two-group diffusion approach (Moskva, IAE, 1977) 30 p. (Rus)
10. A.B. Bakushinskiy, V.K. Vlasov. *Mathematics Elements and Numerical Methods*. Ed. E.S. Berezin (Moskva: Prosveshchenie, 1968) 336 p. (Rus)
11. V.V. Galchenko, O.V. Nedelin. Comparative analysis of few-group constants preparation with the use of different computer codes. Part 1. Nuclear and Radiation Safety 6(3) (2003) 61. (Rus)
12. O.V. Samoylichenko, V.M. Mokiychuk. Analytical methods validation, like part of tested results quality provided. *Elektrotekhnichni ta Kompyuterni Systemy* 6(82) (2012) 228 p. (Ukr)
13. J.R. Askew, F.J. Fayers, P.B. Kemshell. A general Description of the lattice Code WIMS. *Journal of British Nuclear Energy Society* 5(1) (1966) 564.
14. J.J. Casal et al. HELIOS: Geometric Capabilities of a New Fuel-Assembly Program. Proc. Int. Top. Mtg. Adv. Math. Comp. React. Phys., Pittsburg, PA, USA, 1992. Vol. II, Sect. 10.2.1, 1-13.
15. V.V. Galchenko, A.A. Mishyn. Comparative analysis of reactor cycle neutron characteristics using different WIMSD5B nuclear data libraries. *Nuclear and Radiation Safety* 3(67) (2015) 8. (Ukr)
16. I. Ovdiienko et al. Development of cross-section library for DYN3D code. Nuclear and Radiation Safety 4(64) (2014) 22.
17. A VVER-1000 LEU and MOX Assembly Computational Benchmark. Specification and results. *Nuclear Science NEA/NSC/DOC(2002)10*. 156 p.

Надійшла 21.03.2018
Received 21.03.2018