

МОДЕРНИЗАЦИЯ КОМПЛЕКСА ПРОГРАММ САПФИР_95&RC_ВВЭР ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВВЭР

**В. Г. Артемов, Л. М. Артемова, А.С. Иванов, А.С. Карпов, А.Н. Кузнецов,
А.В. Пискарев
ФГУП «НИТИ им. А. П. Александрова», Сосновый Бор, Россия**

Аннотация

В докладе представлены результаты работ по модернизации программ, входящих в комплекс САПФИР_95&RC_ВВЭР.

Для программы расчета характеристик ячеек реактора САПФИР_95.1 подготовлена многогрупповая библиотека констант на основе зарубежных и отечественных файлов, оцененных ядерных данных РОСФОНД и ENDF/B7; разработан модуль расчета выгорания, с расширенным набором изотопов; реализовано распараллеливание расчетов при подготовке библиотеки малогрупповых констант на многопроцессорных вычислительных машинах.

В программе расчета характеристик реактора САПФИР_95&RC_ВВЭР.2 реализован переход на многогрупповую версию программы, а также мелкосеточный 3-хмерный метод расчета потвэльного энерговыделения в активной зоне.

Подготовлен пакет сервисных программ, расширивших возможности комплекса по автоматизации подготовки исходных данных и обработки результатов расчетов.

Введение

Комплекс программ (КП) САПФИР_95&RC_ВВЭР используется в АО ОКБ «Гидропресс» для выбора и обоснования топливных загрузок, подготовки потвэльных характеристик для последующего анализа температурных и прочностных характеристик твэлов, а также для подготовки нейтронно-физических моделей для анализов безопасности с использованием РК КОРСАР.

Комплекс программ САПФИР_95&RC_ВВЭР аттестован для расчетов реакторов типа ВВЭР в 2005 г.

В состав КП САПФИР_95&RC_ВВЭР входят программа расчета нейтронно-физических характеристик в ячейках реактора САПФИР_95 (аттестованная для ВВЭР версия САПФИР_95.1 [1]) и программа расчета нейтронно-физических характеристик реактора САПФИР_95&RC_ВВЭР (аттестованная для ВВЭР версия САПФИР_95&RC_ВВЭР.2 [2]).

Необходимость развития программного комплекса для обоснования нейтронно-физических характеристик связана с переходом на новое топливо, с внедрением ряда новых технических решений в перспективных проектах РУ с ВВЭР, а также для сохранения конкурентоспособности КП САПФИР_95&RC_ВВЭР в сравнении с отечественными и зарубежными кодами.

Модернизация программы САПФИР_95

Входящая в состав комплекса программа САПФИР_95 рассчитывает нейтронно-физические характеристики ячеек ядерных реакторов и подготавливает малогрупповые константы для последующего расчета реактора в целом. Расчеты программы САПФИР_95 проводятся на основе библиотек оцененных ядерных данных. Стандартный набор библиотек аттестованной версии программы САПФИР_95, объединенных под условным именем БНАБ -78/С-95, включает в себя библиотеку нейтронных сечений, библиотеку параметров кинетики и библиотеку схем выгорания топлива.

Нейтронные библиотеки содержат данные для необходимого набора топливных и конструкционных материалов. Программа использует эти библиотеки на протяжении последних двадцати лет в неизменном виде. Появление новых зарубежных оцененных детальных ядерных данных ENDF/B -VII [3] и отечественных детальных данных РОСФОНД [4] потребовало обновления нейтронных библиотек программы. Необходимость решения такой задачи определяется тем, что, по мнению разработчиков отечественных библиотек ядерных данных, ни одна из предыдущих библиотек (анонсированных до библиотеки РОСФОНД) «не может быть рекомендована в качестве полной библиотеки для лицензируемых проектов, так как каждая из них обладает рядом специфических недостатков, известных разработчикам и требующих индивидуальной обработки и компиляции файлов различных библиотек, что не приемлемо для условий широкого практического применения» [4].

Подготовка библиотек нейтронных констант

На данном этапе подготовлены многогрупповые библиотеки нейтронных сечений и параметров кинетики. Система подготовки нейтронных констант на базе комплекса программ NJOY-B30 [5] позволила создать эти библиотеки для решения спектральной задачи. Процесс подготовки многогрупповых библиотек максимально автоматизирован. Сформированы две библиотеки многогрупповых нейтронных сечений и параметров кинетики на основе файлов оцененных данных из библиотеки РОСФОНД [6] и вспомогательная (для тестовых расчетов) из ENDF/B -VII.

При переходе на библиотеки современной оценки уточнены и некоторые алгоритмы программы. Исходная версия программы использует модельный спектр нейтронов деления. Новая версия программы рассчитывает константы с учетом реального спектра нейтронов основных делящихся нуклидов. Кроме того, расширен на декаду диапазон энергии, на котором может задаваться спектр нейтронов деления и матрицы переходов из-за неупругих процессов.

Модификация схемы выгорания топлива в программе САПФИР_95

Схема выгорания представляет собой специализированную библиотеку ядерных данных, в которой указаны выходы осколков деления, описаны цепочки взаимных нуклидных превращений из-за радиоактивного распада и нейтронных реакций. В этой же библиотеке находятся постоянные радиоактивных распадов, нейтронные сечения для расчета скоростей реакций и энерговыделение для делящихся актинидов.

В новой версии программы САПФИР_95 модернизирована библиотека схем выгорания и алгоритм расчета изменения нуклидного состава топлива в процессе выгорания [7]: не используется приближение эффективного осколка деления.

В приближении эффективного осколка явно учитывается ограниченное число (порядка тридцати-сорока) нуклидов-продуктов деления. В список таких осколков включены нуклиды, вносящие наибольший вклад в эффекты отравления и шлакования реактора. Все остальные осколки представляются в виде одного, так называемого, эффективного осколка. Такой подход широко применяется как в отечественных, так и в зарубежных программах нейтронно-физического расчета с середины шестидесятых годов [8, 9]. Он позволяет с удовлетворительной точностью рассчитывать основные интегральные нейтронно-физические характеристики ячеек определенного типа реактора в процессе выгорания.

Константы эффективного осколка, используемые в программе САПФИР_95, получены для водо-водяных реакторов с тепловым спектром нейтронов. Это обстоятельство может ограничить применение программы САПФИР_95 для реакторов с промежуточным и быстрым спектром нейтронов.

Кроме того, приближение эффективного осколка позволяет рассчитывать весьма ограниченный набор радиационных характеристик облученного топлива и не учитывает всего многообразия нуклидного состава выгорающего топлива. В то же время, требования к детализации нуклидного состава облученного топлива неуклонно возрастают.

Используя современные оцененные ядерные данные, можно учесть практически все нуклиды осколков деления, которые влияют на нейтронно-физические характеристики. Для облегчения создания схем выгорания топлива была разработана специальная программа, которая вошла в систему подготовки нейтронных констант программы САПФИР_95 [10]. Эта программа формирует новые схемы выгорания с учетом спектра нейтронов конкретного типа реактора.

Нуклидный состав всей схемы выгорания в новой версии программы составил около 400 осколков деления. В качестве исходных данных (микросечения, выходы продуктов деления, скорости распадов и др.) использовались файлы системы библиотек детальных ядерных данных РОСФОНД [6].

Модернизированная версия программы СФПФИР_95 получила название САПФИР_РФ. В ней явным образом рассчитываются концентрации и сечения поглощения для 384 осколков деления и младших актиноидов, получающихся в процессе выгорания. В настоящее время проводится верификация и аттестация этой программы для области применения, определённой аттестационными паспортами [1,2].

Модернизация программы САПФИР_95 для выполнения расчетов нейтронно-физических характеристик в параллельном режиме

Обоснование активных зон проектируемых реакторов основывается на многовариантных расчетах по выбору оптимальных топливных загрузок. Для расчета конкретной загрузки готовится библиотека малогрупповых констант на основе серии расчетов нейтронно-физических характеристик различных ячеек реактора при вариации параметров состояния. Процедура подготовки библиотеки малогрупповых констант на ПК занимает продолжительное время, поскольку требует выполнения нескольких тысяч расчетов.

В целях ускорения подготовки библиотеки малогрупповых констант программа САПФИР_95 модернизирована для проведения расчетов на многопроцессорных ЭВМ в режиме параллельных вычислений.

Спектральные расчеты характеристик ячеек выполняются в два этапа. На первом этапе на основе решения уравнения переноса нейтронов рассчитывается изменение концентраций изотопов в процессе выгорания топлива при некоторых базовых параметрах состояния ячеек. На основе полученных концентраций изотопов в определенных точках по кампании производится расчет вариаций состояния при изменении температур, плотностей, концентраций борного поглотителя и наличия ПЭЛ в рассчитываемой кассете. На этом этапе количество рассчитываемых состояний может достигать нескольких тысяч. Расчет отдельных состояний осуществляется независимо, что позволяет решать их на отдельных процессорах с записью получаемых диффузионных характеристик в отдельные бинарные файлы для каждого процессора.

Для реализации параллельного расчета вариаций в программу внесены изменения, касающиеся ввода исходных данных и организации записи в бинарные архивы получаемых диффузионных характеристик. Перед расчетом формируется файл, в котором заданы исходные данные для расчета всех требуемых вариаций. Каждый процессор при расчете обращается к этому файлу и ищет исходные данные для расчета вариации, которую ему нужно рассчитать. Данная схема расчета реализована с использованием библиотеки MPI. Для сбора, обработки результатов расчетов и формирования библиотеки малогрупповых диффузионных констант для

программы RC_VBЭР и РК КОРСАР разработаны специальные сервисные программы, которые включены в комплекс программ.

Результаты тестирования показали, что при подготовке констант для загрузки реактора типа ВВЭР-1000 оптимальная эффективность распараллеливания получается при использовании от 30 до 100 ядер на расчет полного набора нейтронно-физических характеристик при вариации состояний ячейки, необходимого для подготовки матрицы малогрупповых констант для одного типа кассет. При этом ускорение расчетов в сравнении с не распараллеленным вариантом составит ~ 10-20 раз, соответственно.

Развитие алгоритмов программы САПФИР_95&RC_VBЭР

В новой версии комплекса программ САПФИР_95&RC_VBЭР отрабатывается схема расчетов с увеличенным числом групп нейтронов, в том числе до трех в тепловой области энергий. Отработана модель ВВЭР с распределенной нейтронной кинетикой.

Программа позволяет моделировать нестационарные эксперименты на малых уровнях мощности, в частности, моделировать показания реактиметров в экспериментах со сбросом стержней аварийной защиты и отдельных компенсирующих групп.

Реализован вариант программы САПФИР_95&RC_VBЭР для мелкосеточного трехмерного расчета потвэльного энерговыделения. Для реализации этих возможностей внесены соответствующие изменения и в процедуру подготовки малогрупповых констант (программ САПФИР_95) и в реакторную программу САПФИР_95&RC_VBЭР.

Комбинированный метод расчета потвэльного энерговыделения в комплексе программ САПФИР_95&RC_VBЭР

В комплексе программ САПФИР_95&RC_VBЭР, аттестованном в Ростехнадзоре РФ для расчета нейтронно-физических характеристик реакторов типа ВВЭР, расчет потвэльного энерговыделения основывается на суперпозиции микрораспределения потока нейтронов в кассете и макрораспределения по реактору в целом (далее «метод суперпозиции»). Микрораспределения рассчитываются с использованием программы САПФИР_95 на основе решения уравнения переноса в бесконечной решетке ТВС методом ВПС, а изменения макропотока по активной зоне рассчитываются в диффузионном приближении по программе RC_VBЭР в 24-х точках в двухгрупповом диффузионном приближении.

Этот метод обеспечивает оперативный расчет потвэльного энерговыделения при приемлемой точности. Однако он имеет ограничения. В частности, такой подход не может корректно учесть влияние конструктивных особенностей элементов бокового отражателя на энерговыделение в твэлах на границе активной зоны.

Для дальнейшего повышения точности расчета потвэльных характеристик и контроля погрешности этих расчетов, в комплекс программ САПФИР_95&RC_VBЭР введена возможность решения уравнения диффузии нейтронов на правильной гексагональной конечно-разностной сетке, соответствующей решетке твэлов в активной зоне (далее «прямой метод»).

Прямой, потвэльный, метод расчета более сложен и громоздок, поскольку использует решение уравнения диффузии на мелкой сетке, соответствующей шагу решетки твэлов, что ведет к увеличению времени, затрачиваемого на расчет одного состояния реактора. У прямого метода есть и более существенный недостаток, связанный с методической погрешностью расчета диффузионного приближения при моделировании выгорания СВП и твэгов. Поэтому в комплексе программ САПФИР_95&RC_VBЭР предложена и реализована «комбинированная» схема расчета. Выгорание рассчитывается методом суперпозиции и является входными данными при проведении расчета микрополей энерговыделения на мелкой сетке [11]. Кроме распределения выгорания на основе расчета методом суперпозиции получают распределения

температуры топлива и плотности теплоносителя, которые также являются входными данными при расчете потвальных энерговыделений на мелкой сетке.

Схема расчета комбинированным методом показана на рисунке 1.



Рисунок 1 - Схема комбинированного метода расчета потвального энерговыделения

Такой подход позволяет уменьшить объем рассчитываемых параметров и дает возможность оперативно проводить трехмерные расчеты потвального энерговыделения без сложного расчета обратных связей, проблем моделирования выгорания твэгов и СВП, а также моделирования перегрузок ТВС.

В комбинированном методе при подготовке малогрупповых констант твэлы кассеты объединяются в несколько зон с разными диффузионными свойствами, в зависимости от типа твэл и твэг и их расположения в кассете. Выделены зоны для ПЭЛ и межкассетного зазора. Таким образом, кассета моделируется целым набором диффузионных констант. Малогрупповые константы для всех зон кассеты вычисляются на основе спектральных расчетов решетки ТВС программой САПФИР_95.

Константы элементов бокового отражателя рассчитываются также с использованием программы САПФИР_95 на основе модели, учитывающей его конструкционные особенности.

При реализации комбинированного метода расчета в комплексе программ САПФИР_95&RC_ВВЭР был разработан пакет вспомогательных программ [12], который позволил довести технологию расчетов до инженерного уровня.

Конечный результат расчета – архив распределения линейной тепловой нагрузки твэлов и других потвальных характеристик, требуемых для теплотехнических и прочностных расчетов.

Верификация

Полная матрица верификация комплекса программ включает различные типы тестов для оценки погрешности спектральной программы САПФИР_95 в сравнении с реперными отечественными и зарубежными программами и всего комплекса САПФИР_95&RC_ВВЭР при моделировании экспериментов на действующих энергоблоках [13].

Оценка влияния ядерных данных

В данном разделе, в качестве примера, приведены результаты тестирования программы САПФИР_95, иллюстрирующей влияние ядерных данных на результаты расчетов ячеек реакторов типа ВВЭР. Ранее в отечественной литературе анализировалось влияние неопределенностей библиотек ядерных данных применительно к расчетам ВВЭР. В частности, работе [14] показано, что разброс результатов расчетов коэффициент размножения, при использовании новых и старых оценок ядерных данных (ENDF/B-VII и ENDF/B-VI) для ячеек ВВЭР может составлять до ~ 0.5%.

В таблице 1 приведены результаты расчетов $K_{\text{беск}}$ для типичной ячейки PVR с урановым и MOX - топливом по программам, использующим различные библиотеки ядерных данных (JEF-2.2, ENDF/B-VII, JENDL-3.2, ENDF/B-VI), которые иллюстрируют разброс результатов, при использовании различных ядерных данных. Описание тесовых задач этого известного международного теста и результаты расчетов, полученные с использованием известных отечественных (TRIFON, UNK) и зарубежных (APOLLO-2, WIMS7A, SRAC95, MVP, WIMS_IPPE, MCNP) программ взяты из работы [15] и [16]. В качестве реперных приняты результаты расчетов по программам MCNP (VII), использующей данные ENDF/B-VII.

Таблица 1 – Сравнение расчетов $K_{\text{беск}}$

Программа	Тип ячейки			
	UOX_3.7	MOX_4.3	MOX_7.0	MOX_8.7
APOLLO-2 (JEF-2.2)	1.3271	1.1371	1.1619	1.1756
WIMS7A (JEF-2.2)	1.3221	1.1320	1.1575	1.1718
SRAC95 (JENDL-3.2)	1.3230	1.1415	1.1688	1.1837
MVP (JENDL-3.2)	1.3320	1.1399	1.1647	1.1786
TRIFON (ENDF/B-VI)	1.3270	1.1407	1.1664	1.1792
UNK (ENDF/B-VI)	1.3275	1.1330	1.1563	1.1694
WIMS_IPPE FOND-2.2)	1.3258	1.1381	1.1562	1.1693
MCNP (ENDF/B- VII)	1.3315	1.1420	1.1679	1.1824
Среднее значение	1.3273	1.1393	1.1640	1.1778
САПФИР_95.1(БНАБ-78/С-95)	1.3258	1.1363	1.1608	1.1740
Отклонение (САПФИР_95.1/среднее)	-0.12%	-0.17%	-0.17%	-0.22%
САПФИР_95.1 (РОСФОНД)	1.3302	1.1412	1.1666	1.1805
Отклонение (САПФИР_95.1 (РФ)/среднее)	0.32%	0.32%	0.41%	0.43%
Отклонение (САПФИР_95.1 (РФ)/MCNP (VII))	-0.13%	-0.08%	-0.13%	-0.19%

Приведенные данные показывают, что и для уранового, и для MOX – топлива наблюдается тенденция увеличения $K_{\text{беск}}$ для ячеек при использовании новых оценок ядерных данных РОСФОНД и ENDF/B-VII. При сопоставлении с инженерными программами, результаты расчетов для которых приведены в таблице, обе версии САПФИР_95.1 дают результаты, не выходящие за крайние значения. Результаты расчетов с библиотекой РОСФОНД близки к результатам, полученным на основе данных ENDF/B-VII, и выше значений, полученных с библиотекой БНАБ-78/С-95, т.е. наблюдается такая же тенденция, как и при сопоставлении результатов расчетов с данными ENDF/B-VII и ENDF/B-VI, отмеченная в [14].

Верификацию всего обновленного комплекса программ с новой версией САПФИР_95 планируется завершить в 2017 году.

Тестирование программы САПФИР_95&RC_ВВЭР

В данном разделе приведены результаты шестигруппового расчета выгорания первой загрузки активной зоны реактора первого энергоблока Волгодонской АЭС.

Расчет выгорания проводится для всей кампании реакторной установки, которая продолжалась 307 эфф.суток. Кампания в расчете представлялась как серия состояний с заданными параметрами. Значения рабочих параметров (положения рабочей группы, мощности, температуры на входе в активную зону, расхода и давление теплоносителя) соответствуют эксплуатационным данным, геометрия и состав ТВС, конструкция органов регулирования, отражателя моделировались в соответствии с проектными данными (подробнее см. [17]).

На рисунке 2 приведены результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных изменения критической концентрации борной кислоты.

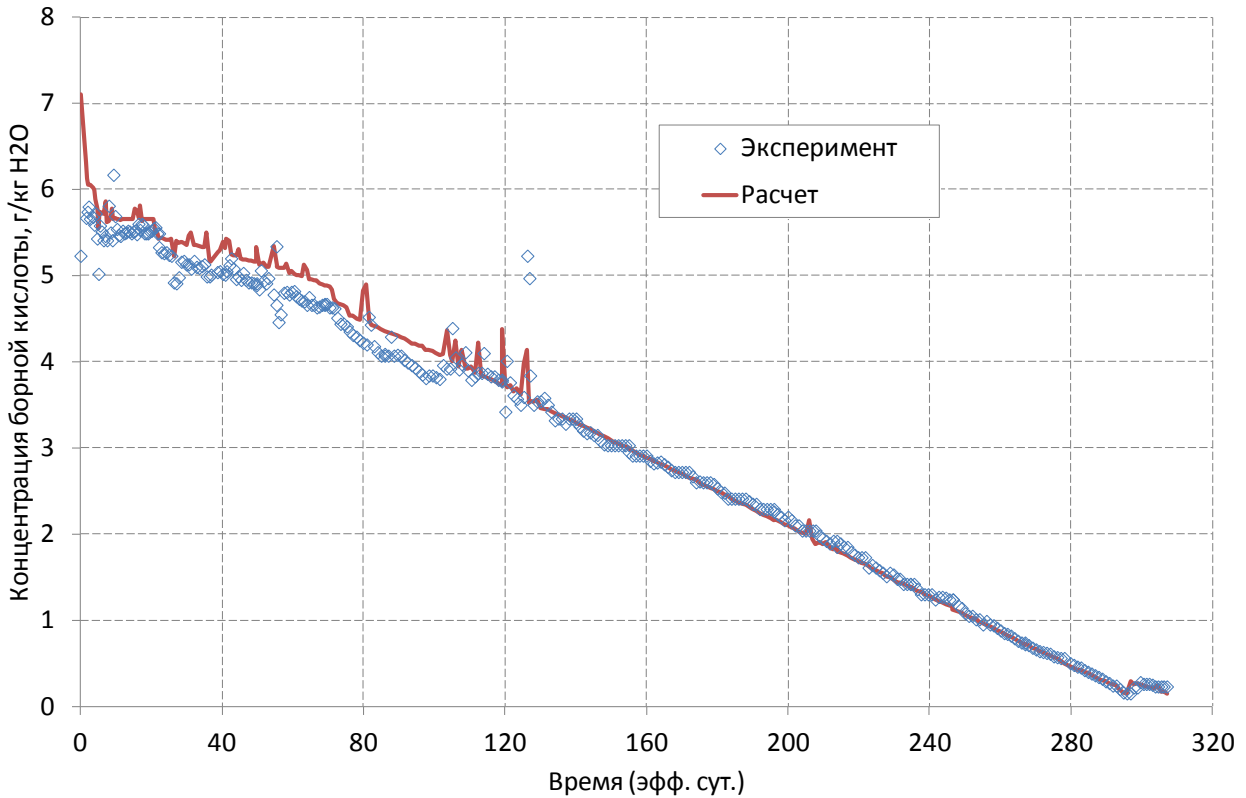


Рисунок 2 - Изменение концентрации борной кислоты по кампании

Погрешность расчета концентрации борной кислоты в стационарных состояниях в течение кампании не превышает погрешности измерений. Рассчитанная длина кампании практически совпадает с реальной.

На рисунках 3, 4 и 5 приведены распределения энерговыделения по ТВС активной зоны в сравнении с экспериментальными данными, полученными на Волгоградской АЭС.

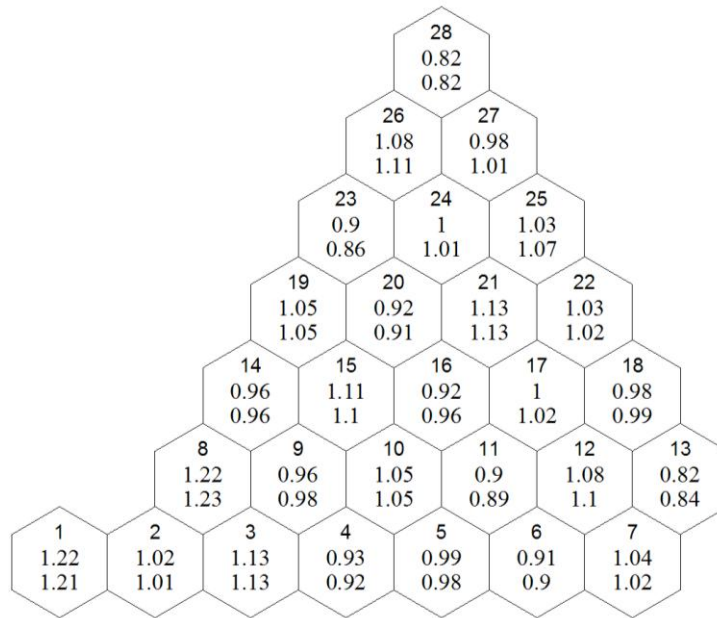


Рисунок 3 - Относительное распределение энерговыведения по ТВС (RC/Эксперимент). T=50.1 эфф.сут. Мощность 2194 МВт. Стандартное отклонение 1.73%. Отклонение в ТВС с максимальным энерговыведением – 0.81% (ТВС №8)

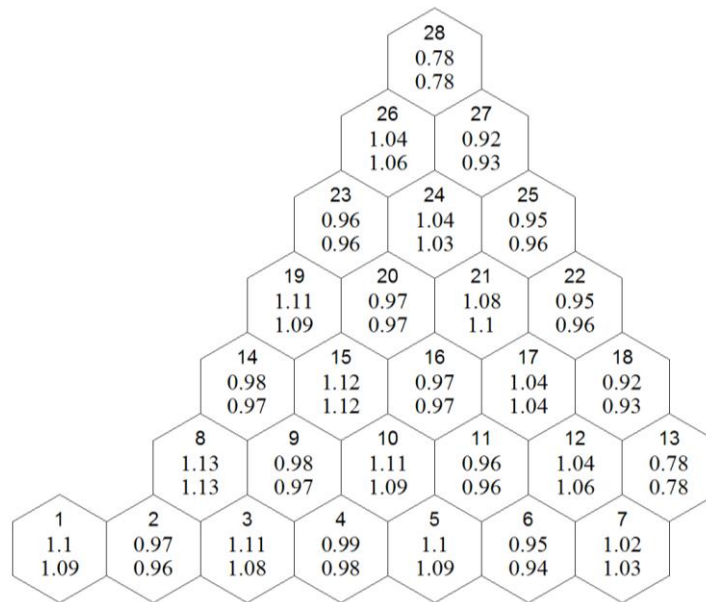


Рисунок 4 - Относительное распределение энерговыведения по ТВС (RC/Эксперимент). T=234.1 эфф.сут. Мощность 3001 МВт. Стандартное отклонение 1.07%. Отклонение в ТВС с максимальным энерговыведением – 0.0% (ТВС №8)

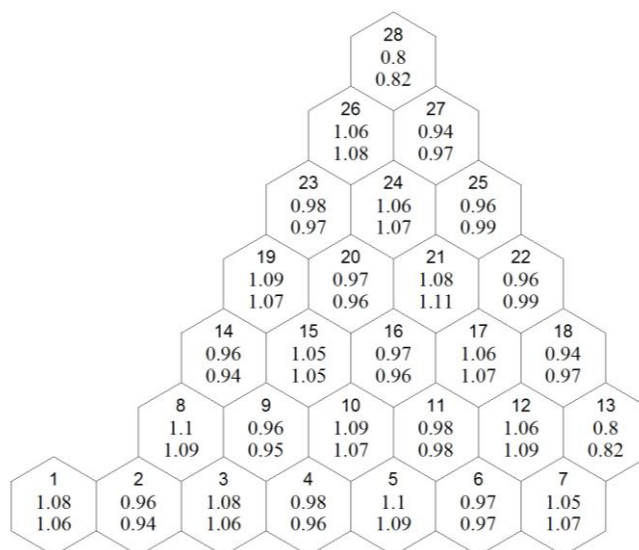


Рисунок 5 - Относительное распределение энерговыделения по ТВС (RC/Эксперимент). T=304.0 эфф.сут. Мощность 2484 МВт Стандартное отклонение 1.77%. Отклонение в ТВС с максимальным энерговыделением – -2.70% (ТВС №21)

Среднее отклонение рассчитанных значений мощности ТВС в наиболее напряженных ТВС от экспериментальных значений во всех трех расчетах составляет менее 3%, максимальное - не превышает 5%.

Нестационарная модель верифицирована на экспериментах с падением АЗ [17].

Некоторые результаты тестирования моделей, которые используются в комбинированном методе расчета потвального энерговыделения, представлены в отдельном докладе [18].

Заключение

Комплекс программ САПФИР_95&RC_ВВЭР после аттестации в Ростехнадзоре более десяти лет успешно используется для обоснования нейтронно-физических характеристик реакторов типа ВВЭР, а также для подготовки нейтронно-физических моделей при анализах безопасности с использованием РК КОРСАР. С учетом этого он взят за основу для развития при переходе на перспективные виды топлива, внедряемые и планируемые для использования в ВВЭР. Развитие комплекса связано, в первую очередь с использованием современных оценок ядерных данных, а также с повышением детальности описания диффузии нейтронов в реакторе.

Литература

1 Программа расчета нейтронно-физических характеристик ячеек реакторов САПФИР_95.1 - Аттестационный паспорт ПС №390 от 16.12.2015г Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору.

2 Программа расчета нейтронно-физических характеристик реактора. САПФИР_95&RC_ВВЭР.2 - Аттестационный паспорт. № 321 от 18.04.13 г, Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору.

3 Data Formats and Procedures for Evaluated Nuclear Data File ENDF/B-VI and ENDF/B-VII. Report Brookhaven National Laboratory NCS-44945-05-Rev. 2005

4 Забродская С. В. и др. РОСФОНД – российская национальная библиотека оцененных ядерных данных. ВАНТ, сер. Ядерные константы, вып. 1-2, 2007, с. 3-21.

5 NJOY-B30 А. С. Карпов, Тебин В.В. Система подготовки многогрупповых констант для делящихся материалов на основе оцененных ядерных данных в пакете САПФИР. Материалы X Международного семинара по проблемам физики реакторов, Москва, 1997г. Карпов А.С

6 Энциклопедия нейтронных данных РОСФОНД. Полный пакет обоснования отбора оценок. ФГУП ГНЦ РФ Физико-энергетический институт. Обнинск, 2006

7 Карпов А.С. Модернизация схемы выгорания топлива в программе САПФИР_95 // Технологии обеспечения жизненного цикла ЯЭУ. Научно-технический сборник ФЯО ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», г. Сосновый Бор, № 1 (1), 2015, С. 62-68.

8 Галанин А.Д. Аппроксимация поглощения нейтронов продуктами деления одним эффективным осколком. Атомная энергия Т 50, в 1, с 3-6.

9 Tugor J.G., Askew J.R. Vienna 1971, pp95-110.

10 Система подготовки многогрупповых констант для пакета САПФИР/А.С. Карпов, В.В. Обухов, В.В. Тебин // Нейтроника -95.- Обнинск. 2000.

11 Артёмов В.Г., Иванов А.С., Кузнецов А.Н., Шемаев Ю.П. Комбинированный метод расчета потвального энерговыделения в комплексе программ САПФИР_95&RC_ВВЭР. ВАНТ Серия: ЯДЕРНО-РЕАКТОРНЫЕ КОНСТАНТЫ, – 2014. выпуск 3, – С. 85–89.

12 В.Г. Артемов, Л.М. Артемова, А.Н. Кузнецов, П.А. Михеев, Программные средства для подготовки расчетных моделей и анализа полученных результатов расчетов потвального энерговыделения в комплексе программ САПФИР_95&RC_ВВЭР. Материалы МНТК-2017, ОАО ОКБ «Гидропресс», Подольск 2017.

13 В. Г. Артемов, Л. М. Артемова, Р. Э. Зинатуллин, А.С. Иванов, А.Н. Кузнецов, А.В. Пискарев, Ю.П. Шемаев, К. Ю. Куракин, А.Н. Тихомиров, М.В. Фатеев, Обоснование точности нейтронно-физического расчета в расширенной области допустимых значений параметров ВВЭР при работе энергоблоков на повышенном уровне мощности. Материалы МНТК-2013, ОАО ОКБ ОКБ «ГИДРОПРЕСС», г. Подольск, 2013.

14 П.Н. Алексеев, В.Д. Давиденко, А.А. Дудников, Е.В. Цибульская. Анализ неопределённостей библиотек ядерных данных Росфонд,JEFF_3.1, ENDF/B-VII применительно к расчётам реакторов ВВЭР. Препринт РНЦ «Курчатовский Институт», 2009.

15 LWR MOX Benchmark Calculations Using the BARS Code. S. Akimushkin, A. Avvakumov, V. Malofeev, A. Roslykov, NSIRNRKI 90-12/1-12-01, Moscow, 2001

16 Benchmark Calculations of Power Distribution within Fuel assemblies, NEA/NSC/DOC(2000)3November 2000.

17 Обоснование повышения точности нейтронно-физического расчета в расширенной области допустимых значений параметров активной зоны с использованием программного комплекса САПФИР_95&RC_ВВЭР: Отчет НИТИ, 2011.

18 В.Г. Артемов, А.С. Иванов, А.Н. Кузнецов К.Ю. Куракин, Расчет потвального энерговыделения в бенчмарках 'FULL-CORE' для ВВЭР-440 и MIDICORE для ВВЭР-1000 с использованием программного средства САПФИР_95&RC_ВВЭР. Материалы МНТК-2017, ОАО ОКБ «Гидропресс», г. Подольск, 2017.