

УДК 621.039.51:006.91

Подготовка и верификация модели для расчёта нейтронно-физических характеристик активных зон реакторов с быстрым спектром нейтронов и газовым теплоносителем

В.Г. Артемов, А.С. Иванов, П.А. Михеев, Н.С. Нерсисян

ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», г. Сосновый Бор Ленинградской области, Россия

Аннотация

Приведено описание нейтронно-физической модели, подготовленной с использованием комплекса программ САПФИР_РФ&RC, для расчёта малогабаритных реакторов с быстрым спектром нейтронов. Представлены результаты верификации расчётной модели при моделировании нейтронно-физических характеристик быстрой критической сборки: коэффициентов размножения, эффективности органов регулирования и распределений энерговыделения по активной зоне. Результаты расчётов, полученные с использованием комплекса программ САПФИР_РФ&RC, сопоставляются с реперными расчётами.

Ключевые слова: реактор на быстрых нейтронах, критический стенд, нейтронно-физический расчёт, комплекс программ САПФИР_95&RC

UDC 621.039.51:006.91

Preparation and verification of a model for calculating the neutron characteristics of fast neutron spectrum gas cooled reactor cores

V.G. Artemov, A.S. Ivanov, P.A. Miheyev, N.S. Nersesian

FSUE "Alexandrov NITI", Sosnovy Bor, Leningrad region, Russia

Abstract

The paper describes a neutron model for calculation of small size fast neutron spectrum reactors. The model is prepared using the SAPFIR_RF&RC program package. Results of the model verification are presented. The model is verified by simulating the neutron characteristics of a fast critical assembly: multiplication factors, control rod worth, and core power distribution. The obtained results of calculations performed with SAPFIR_RF&RC are compared to benchmarks and experimental data.

Key words: fast reactor, critical assembly facility, neutron calculation, SAPFIR_95&RC program package

Введение

В отечественной практике реакторостроения освоены два основных типа реакторов: с быстрым и тепловым спектром нейтронов. В соответствии с этими двумя направлениями разрабатываются, совершенствуются и верифицируются программные средства и необходимое для расчётов константное обеспечение.

До настоящего времени ядерные энергетические установки, испытываемые в ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова» (далее НИТИ), имели в своем составе реакторы на тепловых и промежуточных нейтронах. Создание критического стенда (КС) и проведение на нем экспери-

ментальных исследований нейтронно-физических характеристик (НФХ) активной зоны (а.з.) реактора с быстрым спектром нейтронов и газовым теплоносителем является началом нового этапа испытаний на стендах НИТИ реакторных установок. С учётом этого и в соответствии с отработанной в НИТИ концепцией испытаний [1] возникает потребность в разработке и верификации программных средств, предназначенных для сопровождения испытаний установок с реакторами на быстрых нейтронах (РБН).

Созданный в НИТИ арсенал нейтронно-физических (комплекс программ (КП) САПФИР_95&RC [2, 3]) и теплогидравлических (расчётный код КОРСАР [4]) программных средств и расчётных технологий ориентирован, прежде всего, на водо-водяные реакторы транспортного назначения. О качестве этих расчётных средств говорит тот факт, что они с успехом применяются и для гражданской энергетики [5–7].

Технология нейтронно-физического расчёта реакторов с тепловым спектром нейтронов строится на двухэтапной схеме. На первом этапе проводится расчёт спектра нейтронов и изменения изотопного состава в процессе выгорания топлива в отдельных ячейках (фрагментах) реактора, а на втором этапе рассчитывается распределение плотности потока нейтронов (ППН) и энерговыделение в а.з. в малогрупповом диффузионном приближении.

В расчётных моделях РБН до последнего времени было не принято выделять этап расчёта пространственно-энергетического распределения нейтронов в ячейках (ввиду допущения об их физической гомогенности). Однако с развитием ядерной энергетики повысились требования к точности расчёта, что, в свою очередь, привело к необходимости учёта влияния гетерогенной структуры а.з. в РБН. По этой причине целесообразно распространить технологию учёта влияния гетерогенных эффектов, отработанную для расчётов реакторов с тепловым спектром, и для расчёта РБН.

Применение такой схемы позволит ускорить сроки разработки расчётных моделей для РБН, которые планируется испытывать в НИТИ, поскольку при использовании КП САПФИР_95&RC в связке с расчётным кодом КОРСАР задача сопряженного нейтронно-физического и теплогидравлического расчёта реакторной установки решается естественным образом.

Возможность расширения области применения КП САПФИР_95&RC на расчёт НФХ а.з. реактора с быстрым спектром нейтронов продемонстрирована при моделировании экспериментов на КС «АКСАМИТ» [8]. В этой работе были проведены верификационные расчёты для проверки и обоснования алгоритмов КП САПФИР_95&RC в сравнении с реперными расчётами, выполненными по специализированной версии программы MCU [9] – MCU-KOSMOS и с результатами критических экспериментов.

Цель настоящей работы заключается в обосновании применения КП САПФИР_РФ&RC для разработки расчётной модели а.з. реактора с быстрым спектром нейтронов и газовым теплоносителем путем их верификации на тестовых задачах и экспериментальных данных, полученных на КС НИТИ. В этом комплексе для расчёта спектра нейтронов и получения эффективных групповых макросечений фрагментов а.з. и отражателя использована модифицированная версия программы САПФИР_95 – САПФИР_РФ [10].

В настоящей статье представлены результаты первого этапа работы. Приведено описание особенностей подготовки расчётной модели по двухэтапной схеме с использованием КП САПФИР_РФ&RC и результаты моделирования тестовых задач, имитирующих а.з. КС, в сравнении с результатами реперных расчётов методом Монте-Карло, полученных по программе MCU-FR [11].

Результаты нестационарного моделирования экспериментов, выполненных на КС с использованием разработанной расчётной модели, планируется представить в отдельной статье.

Модель расчёта нейтронно-физических характеристик активной зоны и элементов отражателя

Для расчёта НФХ а.з. КС и моделирования экспериментов использовалась трёхмерная диффузионная программа RC в двухгрупповом приближении, решающая уравнение диффузии нейтронов с использованием малогрупповых констант, подготовленных программой САПФИР_РФ.

В модели программы RC а.з., отражатель и стержни рабочих органов (РО) системы управления и защиты (СУЗ) моделируются шестигранными призмами с шагом твэлов в а.з. Свойства материалов шестигранных призм заданы так, чтобы сохранить массу и объём веществ. На рис. 1 схематически представлена картограмма а.з. и отражателя, использованная в расчётной модели программы RC.

Для расчёта спектра нейтронов и получения эффективных групповых макросечений фрагментов а.з. и отражателя использована модифицированная версия программы САПФИР_95 – САПФИР_РФ [11].

Программа САПФИР_РФ использует многогрупповую рабочую библиотеку, подготовленную на основе Российских файлов оцененных нейтронных данных (РОСФОНД) [12]. С её помощью проведен расчёт эффективных характеристик ячеек и подготовлена библиотека этих характеристик (констант) для уравнения диффузии нейтронов, решаемого программой RC. Разделение по энергии между группами выбрано на границе областей разрешённых и неразрешённых резонансов: первая группа от 10.5 МэВ до 10.0 кэВ, вторая группа от 10.0 кэВ и ниже в соответствии с границами с 1 по 11 группы и с 12 по 26 группы системы БНАБ [13], используемой в программе САПФИР_РФ.

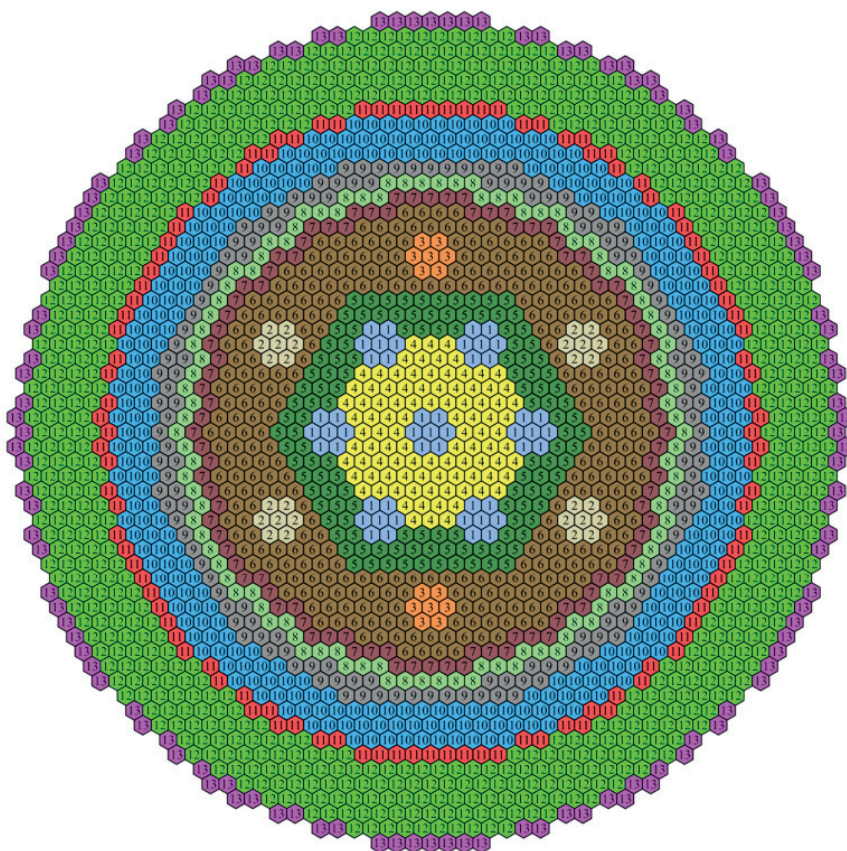


Рис. 1. Расчётная модель активной зоны и отражателя программы RC

Подготовка малогрупповых характеристик ячеек (коэффициентов уравнения диффузии нейтронов) осуществлена в два этапа. На первом этапе на основе файлов оцененных ядерных данных с учётом специфики а.з. подготовлена многогрупповая рабочая библиотека для программы САПФИР_РФ, которая решает уравнение переноса нейтронов в многогрупповом приближении.

На втором этапе с использованием программы САПФИР_РФ в элементах а.з. и отражателя рассчитан двадцатигрупповой спектр нейтронов, с весом которого усреднены сечения в две энергетические группы для эффективных зон, соответствующих этим элементам.

Малые габаритные размеры реакторов приводят к большим утечкам нейтронов из а.з. В связи с этим, в а.з. КС спектр нейтронов зависит как от свойств а.з., так и от состава и геометрии отражателя.

Для расчёта спектра нейтронов и малогрупповых констант по программе САПФИР_РФ, подготовлена двухмерная модель фрагмента 1/12 части а.з. и отражателя, которая, с учётом симметрии, отражает реальную геометрию. При этом пространственное распределение ППН рассчитано на основе решения уравнения переноса нейтронов методом вероятности первых столкновений (ВПС) с детальным описанием геометрии элементов а.з. и отражателя. В программе САПФИР_РФ при расчёте ВПС в сложных геометриях для определения траекторий нейтронов использованы геометрические модули программ, основанных на методе Монте-Карло [14], в частности, геометрический модуль SCG-5 [15], использующий комбинаторную геометрию. Широкие возможности модуля SCG-5 позволяют задавать геометрию ячеек реактора практически без искажений.

На рис. 2 на примере одной из тестовых задач, имитирующих а.з. и отражатель КС, проиллюстрирована принятая в модели программы САПФИР_РФ схема разбиения а.з. и отражателя на эффективные зоны, для которых рассчитаны малогрупповые константы. Разбиение на эффективные зоны выбрано так, чтобы спектр нейтронов и малогрупповые константы в пределах эффективной зоны можно было принять постоянными.

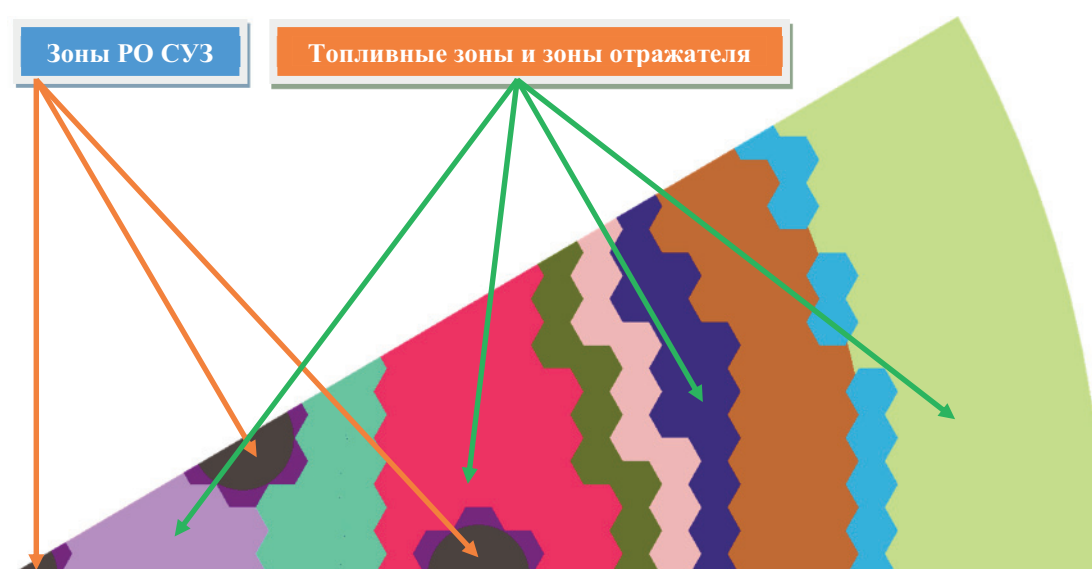


Рис. 2. Схема разбиения сектора симметрии 1/12 части активной зоны и отражателя на эффективные зоны

Для каждой из указанных на рис. 2 эффективных зон по программе САПФИР_РФ подготовлены малогрупповые константы, которые затем использованы при расчёте по программе РС.

Тестирование расчётной модели включало два этапа. На первом этапе выверялась модель для расчёта спектра нейтронов и малогрупповых констант программы САПФИР_РФ, на втором этапе проверялась двухгрупповая трёхмерная модель программы RC.

Тестирование двумерной модели программы САПФИР_РФ

Для апробации программы САПФИР_РФ были подготовлены двумерные тестовые задачи, точное решение для которых получено с использованием реперных программных средств. В них учтены геометрия, материалы и температуры ячеек а.з. газоохлаждаемого реактора с быстрым спектром нейтронов. В качестве реперной программы использовались специализированные версии программ MCU [9], MCU-FR [11]. Особенность программы MCU-FR заключается в том, что она использует библиотеку ядерных данных, подготовленную на основе РОСФОНД, также, как и программа САПФИР_РФ.

Расчёты по программе MCU-FR выполнены с использованием подмодуля FARION для проведения расчётов в быстрой области энергии нейтронов с применением детальных поточечных ядерных данных.

Апробация программы САПФИР_РФ проводилась в два этапа:

- на первом этапе была использована тестовая задача (расчёт полячейки а.з.) для определения принципиальной возможности применения программы САПФИР_РФ при расчёте спектра нейтронов и получении эффективных сечений для РБН с газовым теплоносителем, а также и для выявления некоторых особенностей подготовки ядерных данных для расчётов РБН;
- на втором этапе были проведены расчёты разработанной двумерной тестовой модели газоохлаждаемого реактора с быстрым спектром нейтронов, а также представлены результаты сравнения НФХ (коэффициентов размножения и распределения относительного энерговыделения в твэлах а.з.) между программами MCU-FR и САПФИР_РФ.

В качестве тестовой задачи рассматривается шестигранная полячейка а.з. РБН с газовым теплоносителем, которая состоит из 18 твэлов с топливным сердечником из двуокиси урана и оболочкой из молибдена. В центре полячейки находится канал для ввода поглотителя из B_4C . В межтвэльном пространстве – воздух. Геометрия полячейки (1/12 часть) тестовой задачи для расчёта спектра нейтронов РБН приведена на рис. 3.

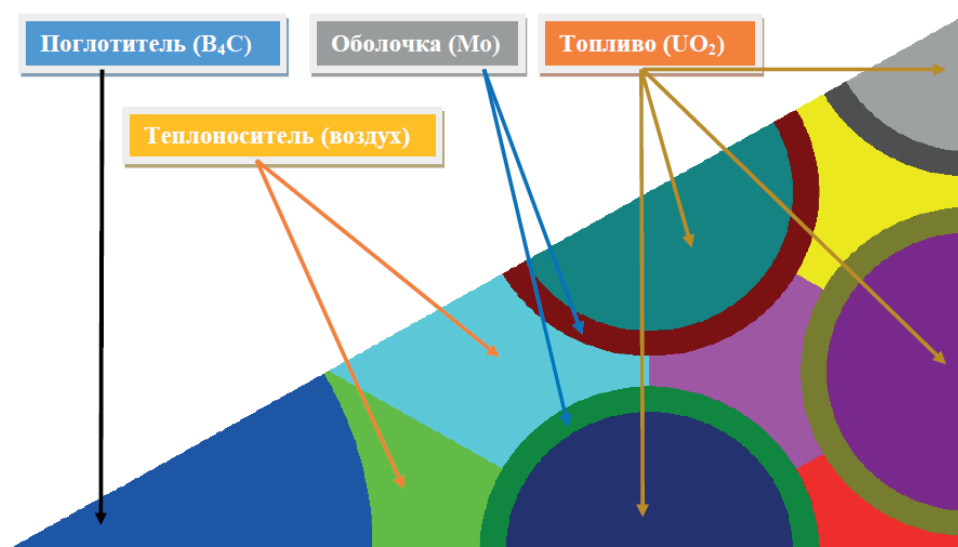


Рис. 3. Геометрия полячейки реактора на быстрых нейтронах с газовым теплоносителем

Для тестирования были рассмотрены два варианта задачи. В первом варианте рассматривается полиячейка с поглощающим элементом (ПЭЛ). Во втором варианте аналогичная полиячейка рассматривается уже без ПЭЛ. В центре ячейки находится воздух.

В табл. 1 представлены результаты расчёта коэффициента размножения нейтронов K_{∞} в бесконечной полиячейке для двух вариантов задачи.

Таблица 1

Результаты расчёта коэффициента размножения

Программа	с ПЭЛ		без ПЭЛ	
	K_{∞}	Отклонение	K_{∞}	Отклонение
САПФИР_РФ	1.03379	-0.12%	2.00340	-0.1 %
MCU-FR	1.03505	—	2.00537	—

Хорошее согласие в оценке K_{∞} наблюдается между программами САПФИР_РФ и MCU-FR.

В табл. 2 и 3 приведены результаты сравнения поглощения по зонам полиячейки с ПЭЛ и без.

Таблица 2

Сравнение скорости реакции поглощения по зонам полиячейки с ПЭЛ

Зона	САПФИР_РФ	MCU-FR	Отклонение
Топливо	4.71557E-01	4.71508E-01	+0.01 %
Оболочка	1.83987E-02	1.89331E-02	-2.82 %
Поглотитель	5.11813E-01	5.10857E-01	+0.19 %

Таблица 3

Сравнение скорости реакции поглощения по зонам полиячейки без ПЭЛ

Зона	САПФИР_РФ	MCU-FR	Отклонение
Топливо	9.58028E-01	9.55559E-01	+0.26 %
Оболочка	4.41258E-02	4.58112E-02	-3.68 %

Из данных табл. 2 и 3 следует, что между программами САПФИР_РФ и MCU-FR имеется согласие.

В табл. 4 и 5 приведены результаты сравнения скоростей реакций захвата и деления по отдельным изотопам в полиячейке с ПЭЛ и без него.

Таблица 4

Сравнение скоростей реакций по изотопам в полиячейке с ПЭЛ

Зона	Изотоп	Тип реакции	САПФИР_РФ	MCU-FR	Отклонение
Топливо	^{235}U	захват	5.95798E-02	5.88038E-02	+1.32 %
		деление	4.00883E-01	4.01898E-01	-0.25 %
	^{238}U	захват	3.95186E-03	3.92241E-03	+0.75 %
		деление	4.90181E-03	4.71164E-03	+4.04 %
	O	захват	2.24053E-03	2.17238E-03	+3.14 %
Оболочка	Mo	захват	1.83987E-02	1.89331E-02	-2.82 %
Поглотитель	^{10}B	захват	5.11747E-01	5.10796E-01	+0.19 %

Таблица 5

Сравнение скоростей реакций по изотопам в полиячейке без ПЭЛ

Зона	Изотоп	Тип реакции	САПФИР_РФ	MCU-FR	Отклонение
Топливо	^{235}U	захват	1.47808E-01	1.44710E-01	+2.14%
		деление	7.91930E-01	7.92940E-01	-0.13%
	^{238}U	захват	9.33260E-03	9.14160E-03	+2.09%
		деление	6.16557E-03	5.99860E-03	+2.78%
	O	захват	2.79241E-03	2.76959E-03	+0.82%
Оболочка	Mo	захват	4.41258E-02	4.58112E-02	-3.68%

Представленные в табл. 4 и 5 результаты для двух вариантов задачи (с ПЭЛ и без ПЭЛ) дают информацию об отклонениях в оценках скоростей реакций захвата и деления между программами САПФИР_РФ и MCU-FR для конкретного изотопа.

Следующим этапом апробации программы САПФИР_РФ стали разработка и проведение расчётов двухмерной модели газоохлаждаемого реактора с быстрым спектром нейтронов. На рис. 4 приведено сравнение результатов расчёта 26-ти группового потока нейтронов в различных областях а.з. и отражателя между программами САПФИР_РФ и MCU-FR.

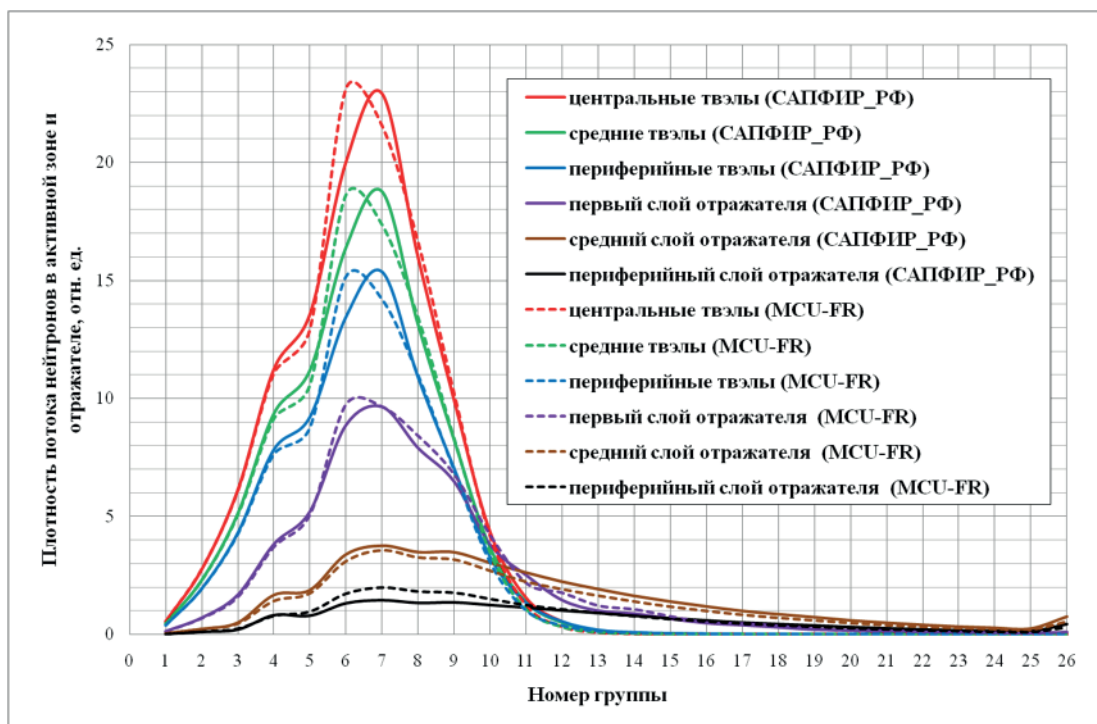


Рис. 4. Сравнение распределений плотности потока нейтронов по энергетическим группам для двухмерной модели, полученных с использованием программ САПФИР_РФ и MCU-FR

Из рис. 4 видно, что в а.з. поток нейтронов сосредоточен в первых двенадцати группах. В зонах отражателя заметное число нейтронов замедляется до 12–20 групп по энергии. Результаты расчётов, полученные с использованием программы САПФИР_РФ, достаточно хорошо воспроизводят характер изменения энергетической зависимости ППН в различных областях а.з. и отражателя, в сравнении результатами реперных расчётов MCU-FR.

Вполне удовлетворительное согласование с реперным расчётом получено и при сопоставлении результатов расчёта потвзльного энерговыделения по программе САПФИР_РФ. В большинстве твэлов различие составляет $\pm 2\%$. Максимальное занижение составляет 5.4% , а максимальное завышение 3.5% . Отличие от реперного расчёта может быть связано с погрешностью расчёта ППН в расчётной модели САПФИР_РФ при выбранном разбиении на зоны, в которых в методе ВПС используется приближение плоского источника нейтронов. Такая точность вполне достаточна для спектральных расчётов, поскольку при свертке сечений ППН присутствует и в числителе, и в знаменателе итогового соотношения.

Интегральную точность модели характеризует значение коэффициента размножения.

В табл. 6 представлены результаты расчётов $K_{эфф}$ для этой тестовой задачи.

Таблица 6

Результаты расчёта $K_{эфф}$

Программа	$K_{эфф}$ без стержней	Отклонение	$K_{эфф}$ со введенными стержнями	Отклонение
САПФИР_РФ	1.24944	-0.02%	1.04828	+0.09%
MCU-FR	1.24970	—	1.04730	—

При сопоставлении результатов расчётов $K_{эфф}$ видно, что результат программы САПФИР_РФ хорошо согласуется с результатом реперного расчёта программы MCU-FR.

Тестирование трёхмерной модели программы RC

В трёхмерной модели программы RC, в отличие от двухмерной, были заданы высоты а.з., бокового, нижнего и верхнего бериллиевых отражателей.

При проведении расчётов по трёхмерной модели программы RC были выполнены расчётные исследования по выбору оптимального числа энергетических групп. Детальный расчёт по программе САПФИР_РФ спектра нейтронов (см. рис. 4) с учётом реальной геометрии а.з. и отражателя (см. рис. 2) обеспечивает необходимую точность расчёта НФХ а.з. КС уже при двухгрупповом приближении.

Увеличение числа энергетических групп не привело к повышению точности расчётов, поэтому в качестве базовой для расчётов НФХ а.з. КС с использованием программы RC принята двухгрупповая модель а.з.

Для тестирования трёхмерной модели RC подготовлены тестовые задачи, имитирующие а.з. и отражатель КС. Расчёты коэффициента размножения выполнены для двух состояний с извлеченными и введенными органами регулирования с использованием программ RC и MCU-FR, результаты приведены в табл. 7.

Таблица 7

Результаты расчёта $K_{эфф}$

Тип теста	RC	MCU-FR	Отклонение
стержни извлечены	1.045026	1.04634	-0.13 %
стержни введены	1.009843	1.01128	-0.14 %

Приведённые результаты показывают, что различия в оценках коэффициента размножения с извлеченными и погруженными органами регулирования от реперных расчётов не превосходят $\pm 0.2\%$, что не превосходит паспортную погрешность КП САПФИР_ВВР95&RC $\pm 0.7\%$

при проведении расчётов НФХ транспортных реакторов.

Сравнение результатов расчётов распределения относительного энерговыделения в ТВЭлах а.з. для двух состояний с извлеченными и введенными органами регулирования между программами RC и MCU-FR показали, что между двумя программами имеется удовлетворительное согласие. Для теста с извлеченными стержнями максимальное завышение оценки относительного энерговыделения в ТВЭлах а.з. программы RC в сравнении с MCU-FR составляет 2.3 %, а максимальное занижение – 1.1 %. Для теста с введенными стержнями максимальное завышение составляет 4.0 %, а максимальное занижение – 5.2 %.

В табл. 8 представлены данные по эффективности отдельных стержней и групп стержней, рассчитанные с использованием КП САПФИР_РФ&RC и MCU-FR.

Таблица 8

Эффективность стержней РО СУЗ (начальное состояние – все стержни взведены)

Наименование РО СУЗ	RC	MCU-FR	Отклонение
Введен ЦКР	1.56	1.45	+7.59%
Введен 1КР	1.33	1.25	+6.40%
Введен 2АР	0.89	0.85	+4.71%
Введены 4АЗ (1АЗ, 2АЗ, 3АЗ, 4АЗ)	3.67	3.57	+2.80%
Введены 7КР (ЦКР, 1КР, 2КР, 3КР, 4КР, 5КР, 6КР)	9.55	8.76	+8.98%

На рис. 5 показано относительное расположение РО СУЗ в а.з.

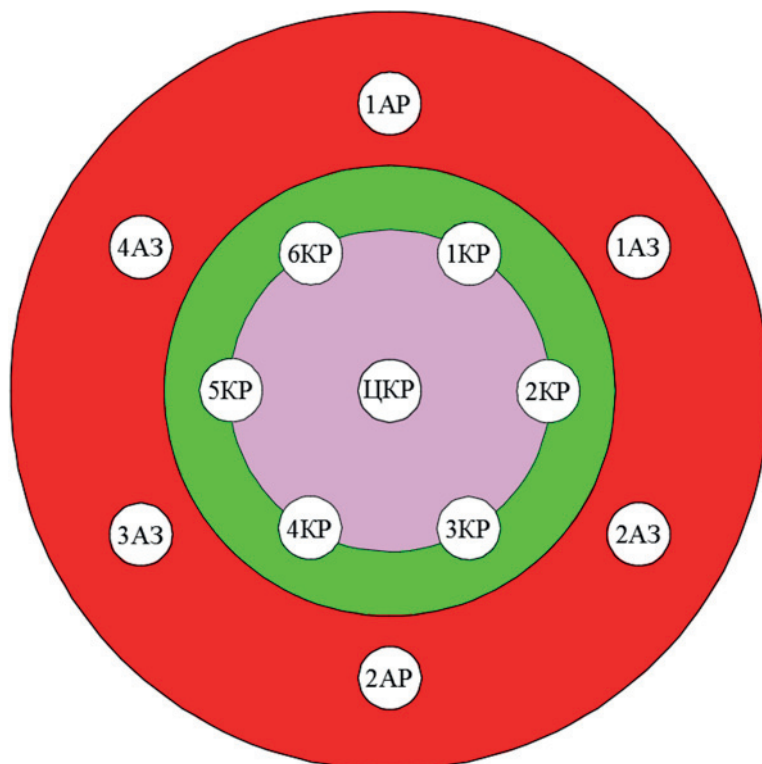


Рис. 5. Положение рабочих органов системы управления и защиты в активной зоне

Результаты расчётов, полученные по КП САПФИР_РФ&RC, демонстрируют приемлемые (менее паспортной погрешности КП САПФИР_РФ&RC – 10 %) отклонения (завышение) в оценках эффективности РО СУЗ при сравнении с реперными расчётами.

Заключение

Приведено описание и апробация нейтронно-физической модели, подготовленной с использованием комплекса программ САПФИР_РФ&RC, для расчёта малогабаритных реакторов на быстрых нейтронах с газовым теплоносителем.

С использованием программы MCU-FR подготовлена серия тестовых задач, учитывающих особенности малогабаритных реакторов на быстрых нейтронах с газовым теплоносителем.

Результаты верификационных расчётов моделирования тестовых задач показали качественное и количественное согласие между программами САПФИР_РФ и MCU-FR при сопоставлении:

- коэффициента размножения при расчёте бесконечных решеток (K_∞), состоящих из поличеек а.з. реакторов на быстрых нейтронах;
- скоростей ядерных реакций деления и захвата нейтронов для сравниваемых сред;
- коэффициента размножения $K_{эфф}$ при моделировании трёхмерных тестовых задач с извлеченными и погруженными органами регулирования;
- распределения относительного энерговыделения в твэлах а.з. при моделировании двухмерных и трёхмерных конфигураций а.з.

Результаты верификационных расчётов продемонстрировали возможность применения комплекса программ САПФИР_РФ&RC для проведения расчётов реакторов на быстрых нейтронах с газовым теплоносителем.

Литература

1. *Василенко В.А.* Концепция и технология комплексных испытаний судовых ядерных энергетических установок на наземных стендах-прототипах. – СПб.: ООО «НИЦ Моринтех», 2003. – 168 с.
2. Программа САПФИР_VBP95 с библиотекой констант БНАБ-78/С-95: аттестационный паспорт ПС № 260 от 23.09.2009.
3. Комплекс программ САПФИР_VBP95&RC: аттестационный паспорт ПС № 261 от 23.09.2009.
4. КОРСАР/BR: аттестационный паспорт ПС № 355 от 17.04.2014.
5. Программа САПФИР_95.1 с библиотекой констант БНАБ-78/С-95: аттестационный паспорт ПС № 390 от 16.12.2015.
6. Комплекс программ САПФИР_95&RC_VBЭР: аттестационный паспорт ПС № 388 от 16.12.2015.
7. КОРСАР/ГП: аттестационный паспорт ПС № 263 от 23.09.2009.
8. Результаты верификации комплекса программ САПФИР_95&RC при моделировании экспериментов на критическом стенде «АКСАМИТ» / В.Г. Артемов, А.С. Иванов, Р.Э. Зинатуллин, А.С. Карпов // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок: научно-технический сборник. – 2017. – Вып. № 3 (9). – С. 18–25.

9. Статус MCU-5 / Н.И. Алексеев [и др.] // Вопросы атомной науки и техники: Сер. Физика ядерных реакторов. – 2011. – Вып. 4. – С. 4–23.
10. *Иванов А.С.* Модернизация нейтронных библиотек и программы САПФИР_95, предназначенной для расчёта ячеек реактора / А.С. Иванов, А.С. Карпов // Вопросы атомной науки и техники: Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2018. – Вып. 1. – С. 27–34.
11. Описание применения и инструкция для пользователей ПС MCU-FR: свидетельство о регистрации программы N2016618242 / Н.И. Алексеев [и др.]. – РНЦ КИ, 2016.
12. Энциклопедия нейтронных данных РОСФОНД (Российская библиотека файлов, оцененных нейтронных данных). Полный пакет обоснований отбора оценок / АО «ГНЦ РФ-ФЭИ». – Обнинск, 2006. – URL: <http://www.ippe.ru/podr/abbn/libr/libr.php>, свободный. – (дата обращения 20.02.2020).
13. Групповые константы для расчёта реакторов и защиты: справочник / Л.П. Абагян, Н.О. Базазянц, М.Н. Николаев, А.М. Цибуля; под ред. М.Н. Николаева. – М.: Энергоиздат, 1981. – 232 с.
14. *Гомин Е.А.* О расчёте вероятностей первых столкновений в системах со сложной геометрией / Е.А. Гомин, Л.В. Майоров // Вопросы атомной науки и техники: Сер. Физика и техника ядерных реакторов. – 1982. – Вып. 8(21). – С. 62–69.
15. *Алексеев Н.И.* Геометрический модуль SCG-5: препринт ИАЭ-5616/4. / Н.И. Алексеев, М.И. Гуревич. – 1993.