

**Валидация группового физического модуля в
программе расчета нейтронной
кинетики КИР2 на основе бенчмарк-теста C5G7**

Авторы: Дьячков Иван Игоревич

Иоаннисиан Михаил Викторович



Введение

- В НИЦ «Курчатовский институт» разрабатывается программа КИР2 для моделирования стационарных и нестационарных задач прямым методом Монте-Карло. На текущем этапе разработки стоит задача верификации.
- В настоящее время существенная часть бенчмарков, описывающих процессы нейтронной кинетики, представлена в виде математических тестовых задач, и практически отсутствуют бенчмарки с полным описанием реальных экспериментальных данных. Для математических бенчмарков имеется большой объем результатов кросс-верификационных расчетов по программам, основанных на различных методах. Такой набор данных позволяет верифицировать разрабатываемый прямой метод Монте-Карло вне зависимости от типа используемых библиотек ядерных констант.
- В связи с этим, для программы КИР2 был создан и реализован алгоритм энергетической зависимости нейтронно-физических свойств через групповые макропараметры. На начальной стадии верификации модуля был выполнен расчет бенчмарк-теста C5G7. В настоящей работе представлены результаты расчета теста, их анализ и сравнение с результатами реперной программы MCNP и программ, использующие детерминистические методы.



Программные средства

КИР2 – программа, предназначенная для решения неоднородного стационарного и нестационарного и однородного уравнений переноса нейтронов аналоговыми методами Монте-Карло на основе оценённых ядерных данных в системах с трёхмерной геометрией на одноядерных и многоядерных компьютерах.

Модуль МАГМА (МАлоГрупповой Модуль с учетом Анизотропного рассеяния).



Рис.1 Схема алгоритма группового модуля



Бенчмарк-тест C5G7

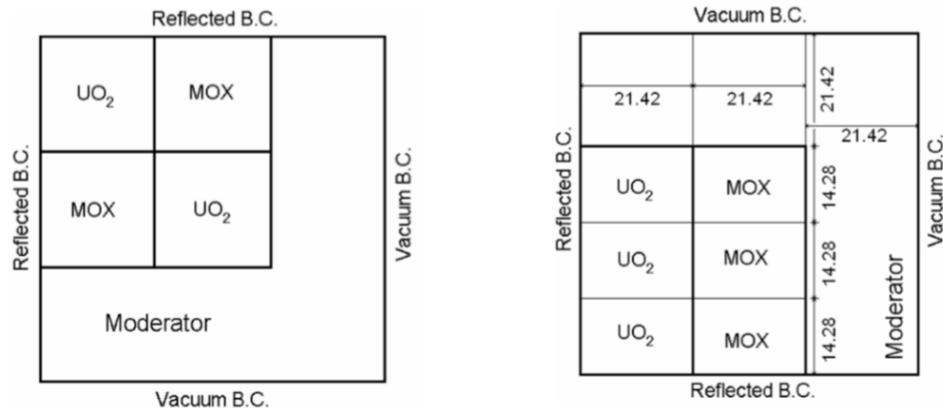


Рис.2. Схема активной зоны бенчмарк-теста C5G7

Бенчмарк C5G7 представляет собой расчет 3 вариантов состояния активной зоны:

1. Все поглощающие стержни находятся в поднятом состоянии (Unrodded).
2. Стержни ТВС 1 опускаются на 1/3 глубины (Rodded A).
3. Стержни ТВС 1 опускаются на 2/3 глубины, стержни ТВС 2, ТВС 3 опускаются на 1/3 глубины (Rodded B).

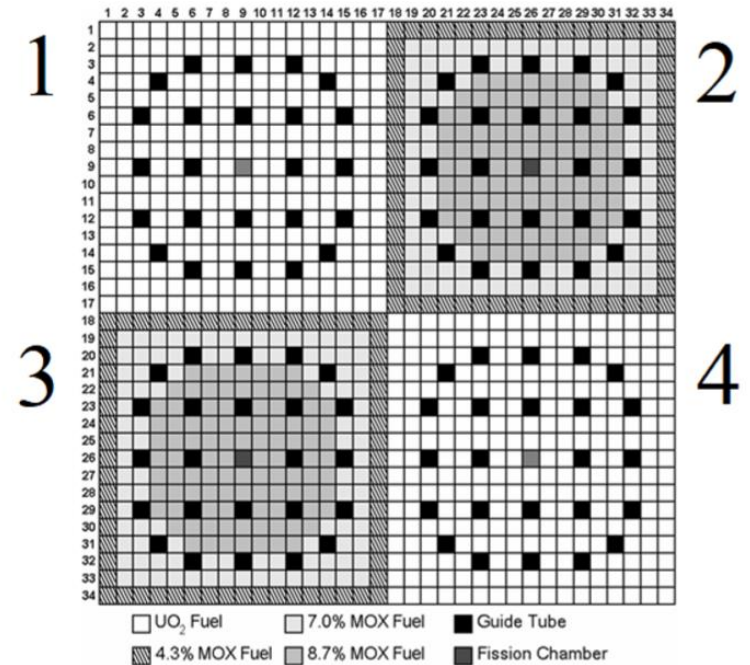


Рисунок 3. Схема расстановки элементов в сборке C5G7



Методики сравнения программ

Для сопоставления результатов расчета распределения энерговыделения по КИР2 с реперными были выбраны две методики сравнения программ:

- 1) Сравнение программ на основе процентный доли твэлов, энерговыделения которых вошли в доверительные интервалы реперной программы, которое выполняется по следующему неравенству:

$$|E_n^{MCNP} - E_n^{Code}| \leq \sqrt{(E_n^{MCNP} * e_n^{MCNP})^2 + (E_n^{CODE} * e_n^{CODE})^2}$$

где E_n^{MCNP} и e_n^{MCNP} - энерговыделение и доверительный интервал n-ого твэла программы MCNP(Ref)
 E_n^{CODE} и e_n^{CODE} - энерговыделение и доверительный интервал n-ого твэла сравниваемой программы.

- 2) Сравнение по «взвешенным» отклонениям: AVG (среднее отклонение от MCNP(Ref)), RMS (среднеквадратичное отклонение) и RME (среднее относительное отклонение), где:

$$AVG = \frac{\sum_n^N |e_n|}{N}, \quad RMS = \sqrt{\frac{\sum_n^N e_n^2}{N}}, \quad MRE = \frac{\sum_n^N |e_n| * p_n}{N * p_{avg}}$$

где e_n - процентное отклонение энерговыделения n-ого твэла от реперных значений;
 p_n - мощность n-ого твэла, p_{avg} - средняя мощность твэлов



Сравнение программ основанных на методе Монте-Карло

Процентная доля твэлов, энерговыделения которых вошли в доверительные интервалы

Программа	Конфигурация Unrodded				
	Статистика	68%	90%	98%	99.8%
KIR2*	$2,5 \cdot 10^{10}$	49,5	78,7	89,2	91,9
KIR2	$5 \cdot 10^8$	67,0	93,3	98,1	99,8
MCNP	$3 \cdot 10^8$	64,8	93,3	98,7	99,8
MCNP*	$5 \cdot 10^8$	65,7	91,3	97,6	99,8
VIM	$5 \cdot 10^8$	65,7	92,6	98	99,8
UNKMK	$2,7 \cdot 10^9$	55,2	84,6	91,7	95,6
	Конфигурация Rodded A				
	Статистика	68%	90%	98%	99.8%
KIR2*	$2,5 \cdot 10^{10}$	49,5	78,7	88,3	91,7
KIR2	$5 \cdot 10^8$	73,7	93,0	98,6	99,8
MCNP	$3 \cdot 10^8$	65,9	92,8	97,8	99,8
MCNP*	$5 \cdot 10^8$	62,8	93,1	97,4	99,6
VIM	$5 \cdot 10^8$	64,4	94,1	98	99,8
UNKMK	$2,7 \cdot 10^9$	51,7	83,7	92,6	96,7
	Конфигурация Rodded B				
	Статистика	68%	90%	98%	99.8%
KIR2*	$2,5 \cdot 10^{10}$	50,1	81,1	89,7	92,2
KIR2	$5 \cdot 10^8$	68,1	92,7	97,7	99,6
MCNP	$3 \cdot 10^8$	59,1	90,0	96,3	99,3
MCNP*	$5 \cdot 10^8$	65,7	94,1	98,7	99,6
VIM	$5 \cdot 10^8$	63,9	93,5	98,3	99,6
UNKMK	$2,7 \cdot 10^9$	55,7	85,2	94,1	97

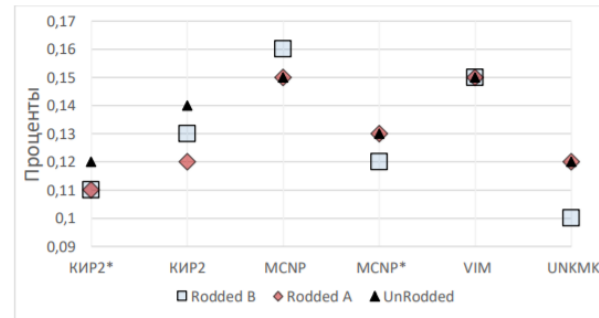


Рисунок 4. Зависимость значений AVG от программы

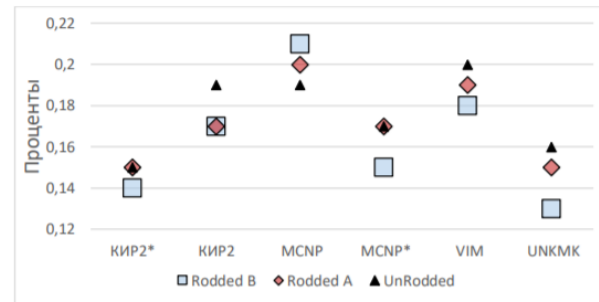


Рисунок 5. Зависимость значений RMS от программы

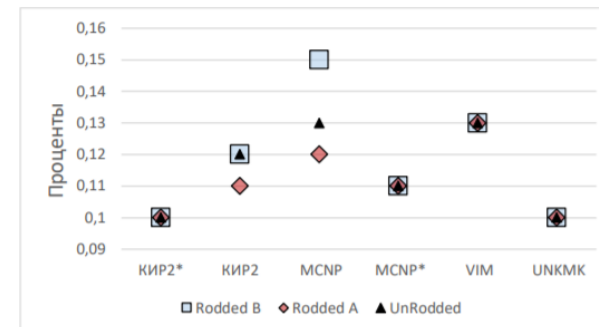


Рисунок 6. Зависимость значений MRE от программы



Использование результатов программы КИР2 в качестве реперных (1)

*Зависимость процентной доли твэлов, энерговыделения которых вошли в доверительные интервалы, для конфигурации Rodded A от статистики расчета КИР2**

Программа	Статистика расчета		
	$1 \cdot 10^8$	$5 \cdot 10^8$	$2,5 \cdot 10^{10}$
ATTILA	86%	53%	26%
CRX	71%	39%	37%
PARTISN	93%	86%	73%
TORT-PSU	81%	44%	23%
UNKGRO	21%	9%	6%

Ошибки AVG, RMS, MRE для варианта UNRODDED

Программа	AVG		RMS		MRE	
	КИР2*	MCNP(Ref)	КИР2*	MCNP(Ref)	КИР2*	MCNP(Ref)
СЛОЙ 1						
UNKMK	0,122	0,173	0,156	0,224	0,052	0,065
PARTISN	0,153	0,180	0,184	0,230	0,083	0,080
MCNP*	0,159	0,194	0,205	0,253	0,064	0,073
VIM	0,175	0,224	0,228	0,290	0,065	0,087
ATTILA	0,196	0,210	0,218	0,270	0,072	0,070
CRX	0,216	0,240	0,277	0,320	0,084	0,090
MCCG3D	0,226	0,260	0,292	0,330	0,129	0,120
UNKGRO	0,905	0,960	1,230	1,290	0,367	0,400
СЛОЙ 2						
UNKMK	0,125	0,192	0,171	0,249	0,036	0,058
MCNP*	0,170	0,218	0,224	0,283	0,051	0,066
VIM	0,195	0,192	0,254	0,249	0,059	0,058
PARTISN	0,188	0,190	0,206	0,240	0,064	0,060
ATTILA	0,211	0,200	0,236	0,260	0,062	0,060
CRX	0,226	0,260	0,282	0,350	0,066	0,070
MCCG3D	0,271	0,280	0,319	0,500	0,089	0,090
UNKGRO	0,985	1,060	1,433	1,530	0,277	0,300
СЛОЙ 3						
UNKMK	0,181	0,260	0,242	0,344	0,030	0,044
MCNP*	0,257	0,299	0,332	0,388	0,043	0,100
VIM	0,269	0,335	0,353	0,435	0,043	0,057
ATTILA	0,203	0,400	0,238	0,460	0,050	0,080
CRX	0,205	0,280	0,260	0,370	0,034	0,050
PARTISN	0,333	0,270	0,373	0,360	0,049	0,040
MCCG3D	0,551	0,440	0,635	0,560	0,090	0,070
UNKGRO	1,283	1,400	1,728	1,860	0,189	0,200



Использование результатов программы КИР2 в качестве реперных (2)

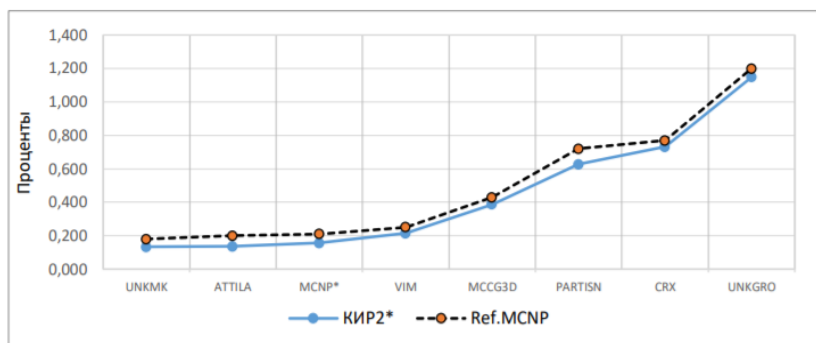


Рисунок 4. Зависимость значений AVG от программы для конфигурации Rodded B, 2 слой

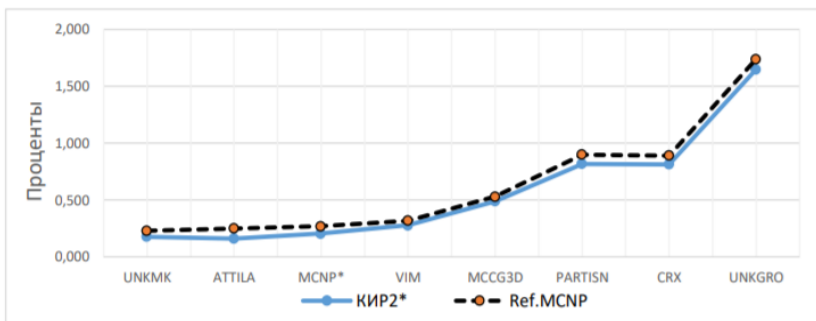


Рисунок 5. Зависимость значений RMS от программы для конфигурации Rodded B, 2 слой

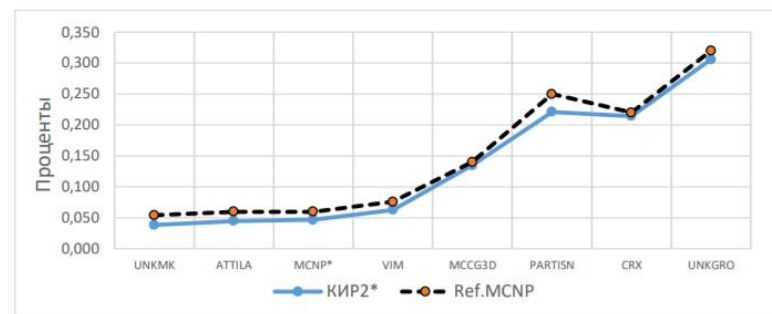


Рисунок 6. Зависимость значений MRE от программы для конфигурации Rodded B, 2 слой



Выводы:

- Таким образом, валидация программы КИР2 с разработанным групповым модулем (МАГМА) продемонстрировала корректность работы алгоритмов. Результаты расчета Кэфф и энерговыделения по КИР2 хорошо согласуются с результатами реперной программы MCNP(Ref) как в пределах доверительных интервалов, так и по отклонениям AVG, RMS и RME.
- При анализе результатов, было замечено, что при использовании в качестве реперных расчетные данные программы КИР2 со статистикой 25 млрд., то снижаются оценки отклонений AVG, RMS, RME для большинства результатов расчета по детерминистическим кодам.
- Следует отметить, что по мере увеличения расчетной статистики уменьшаются значения доверительных интервалов, и в пределе они стремятся к нулевым значениям. Тогда, использование интервалов для сопоставления становится некорректным, поскольку все сравниваемые результаты будут лежать за их границами.

Спасибо за внимание!