



ВНИИАЭС
РОСАТОМ

Результаты апробации программы MNT-CUDA на тепловых и быстрых системах с библиотекой БНАБ-РФ

Научно-практическая конференция «Нейтронно-физические
проблемы атомной энергетики (НЕЙТРОНИКА–2024)»

28.05 - 31.05.2024

Варфоломеева Валерия Андреевна

Грушин Н.А., Иванов И.Е., Бычков С.А., Андрианова О. Н.

Программа MNT-CUDA



- MNT-CUDA – инженерная программа повышенной точности расчёта НФХ в многогрупповом приближении методом Монте-Карло с возможностью использования технологий параллельных вычислений на графических процессорах.
- MNT-CUDA 2.0 [1] разработана в АО «ВНИИАЭС», ориентирована на полномасштабные расчеты характеристик реакторов с возможностью детализации геометрии реактора или его фрагментов, верифицирована и аттестована для расчётов НФХ реакторной установки с РБМК-1000.
- В рамках НИОКР в АО «ВНИИАЭС» на базе MNT-CUDA 2.0 ведётся разработка новой универсальной программы для расчёта реакторов различных типов.

[1] “MNT-CUDA” (версия 2.0). Аттестационный паспорт программы для электронных вычислительных машин №524 от 13.11.2021

Подготовка констант

Для проведения кросс-верификации инженерной программы MNT-CUDA путем сопоставления с прецизионными и групповыми расчетами НФХ бесконечных ячеек ВВЭР и БФС использовались различные способы подготовки заблокированных макроконстант:

- свертка нейтронных макроконстант в 65 энергетических групп (P1-приближение для рассеяния) с помощью программы MSU-5.
- на основе групповой библиотеки БНАБ-РФ и программы CONSYST-RF с помощью специальной методики учета гетерогенных эффектов [2]. Блокированные макроконстанты готовятся в 299 энергетических группах (P5-приближение для рассеяния).

Учет гетерогенных эффектов в CONSYST



В системе CONSYST реализовано несколько способов учета гетерогенных эффектов при подготовке многогрупповых макроскопических сечений, основанных на принципе эквивалентности гомогенных и гетерогенных сред (т.н. принципа эквивалентности).

1. Автоматическое вычисление поправок для системы с помощью блока GETER (применяют для ячеек ВВЭР).
2. Путем задания фиктивного изотопа δ -рассеивателя (гетерогенной поправки в сечение разбавления резонансного нуклида), значение концентрации которого (D-SC) вычисляет внешняя программа (такой модуль был разработан для MNT-CUDA).
3. Выделением дополнительных фиктивных материальных зон блокировки, для изотопного состава которых будет вычислены сечения разбавления.
4. Комбинацией 2 и 3 способа (применяют для БФС).

Расчётные тесты водо-водяных ячеек

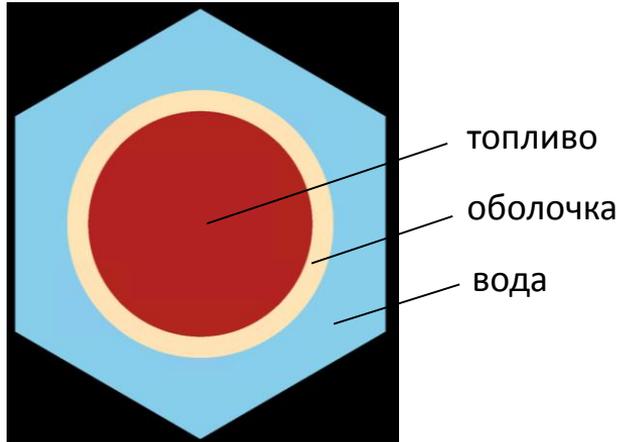


Рисунок 1. Визуализация расчётной модели ячейки ВВЭР в программе MNT-CUDA

Рассмотрено 54 варианта водо-водяных ячеек с изменяемыми параметрами:

- шаг решетки варьировался от 0,9 до 1,8 см (6 вариантов),
- плотность воды - от 0,2 до 1 г/см³ (5 вариантов),
- обогащение топлива - от 0,7 до 6 % (9 вариантов),
- различные температуры топлива (300, 558, 579, 1000, 1027K) и теплоносителя (300, 558, 579K),
- наличие/отсутствие выгорающих поглотителей в топливе и теплоносителе,
- наличие/отсутствие ксенона в топливе.

Сводные результаты расчетов ячеек ВВЭР



Расчеты были выполнены по прецизионному коду MCU-5 с подготовкой заблокированных макроконстант для MNT-CUDA.

Абсолютные отклонения групповых расчётов от прецизионных (мин – макс):

k_{inf} :	0,06 – 0,58 %
Поглощение в топливе:	0,05 – 0,25 %
Поглощение в оболочке и теплоносителя:	0,09 – 0,50 %
Генерация в топливе:	0,01 – 0,38 %

Расчеты были выполнены по прецизионному коду MCNP(РОСФОНД) и MNT-CUDA(БНАБ-РФ) с учетом резонансных гетерогенных эффектов с помощью блока GETER/CONSYST.

Абсолютные отклонения групповых расчётов от прецизионных (мин – макс):

ACE (GETER)

k_{inf} :	0,15 – 0,46 %
Поглощение в топливе:	0,02 – 0,53 %
Поглощение в оболочке:	0,07 – 0,48 %
Поглощение в теплоносителе:	0,01 – 0,06 %
Генерация в топливе:	0,01 – 0,49 %

Методика

k_{inf} :	0,08 – 0,35 %
Поглощение в топливе:	0,01 – 0,12 %
Поглощение в оболочке:	0,01 – 0,03 %
Поглощение в теплоносителе:	0,01 – 0,08 %
Генерация в топливе:	0,03 – 0,36 %

Результаты расчетов ячеек ВВЭР по MNT-CUDA с различными способами подготовки блокированных макроконстант

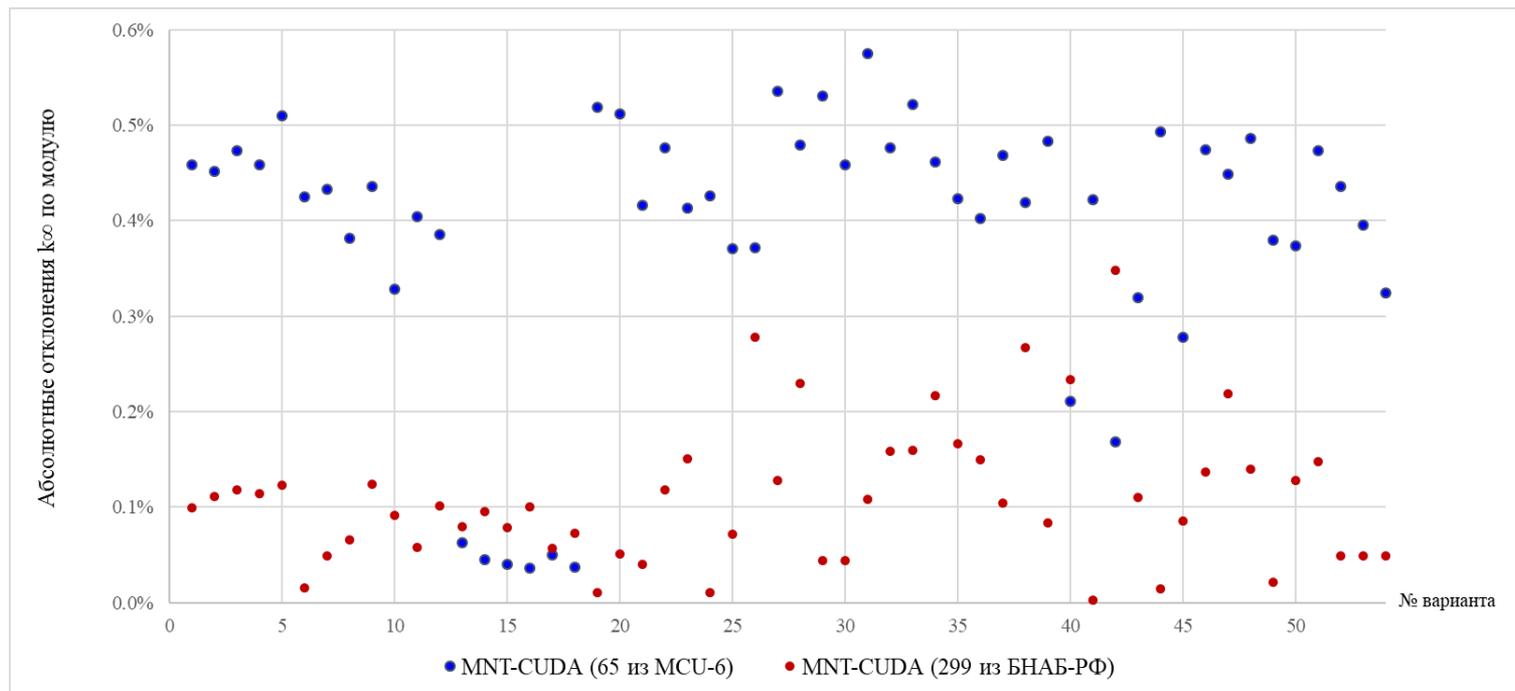


Рисунок 2. Абсолютные отклонения коэффициента размножения, полученные по программе MNT-CUDA с 65-групповыми сечениями из MCU и 299-групповыми сечениями из БНАБ-РФ от соответствующих значений прецизионных расчётов

Результаты расчетов ячеек ВВЭР с автоматической процедурой вычисления гетерогенных поправок

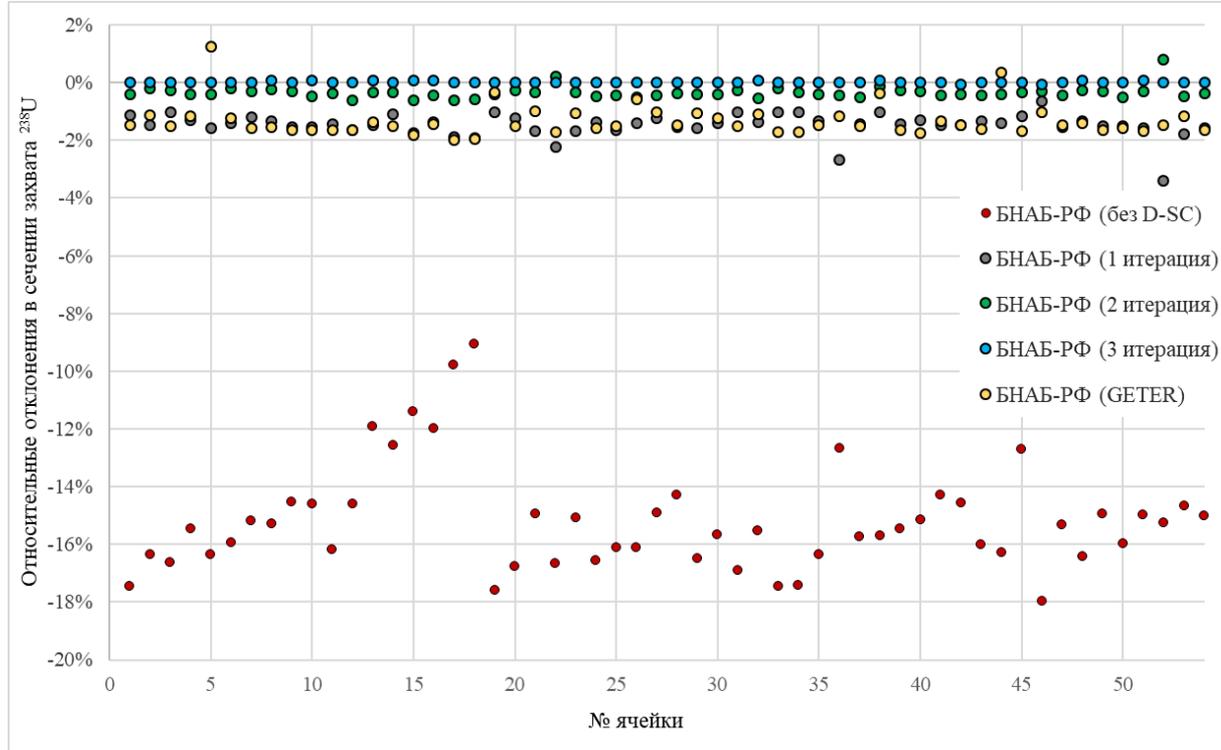


Рисунок 3. Относительные отклонения в сечении захвата ^{238}U при расчетах с групповой библиотекой БНАБ-РФ с учетом резонансных гетерогенных эффектов с помощью итерационной процедуры вычисления гетерогенной поправки

Ячейки БФС (экспериментальный бенчмарк)

Рассмотрена серия из одиннадцати экспериментов на критических стендах БФС [3] по измерению нейтронно-физических характеристик размножающих свойств систем без утечки нейтронов, т.н. коэффициента размножения нейтронов в бесконечной среде k_{∞} .

Активные зоны сборок были скомпонованы из различных таблеток уранового и плутониевого топлива в металлических или алюминиевых оболочках, составляющих многократно повторяющуюся ячейку, помещенную в стальные или алюминиевые трубы.

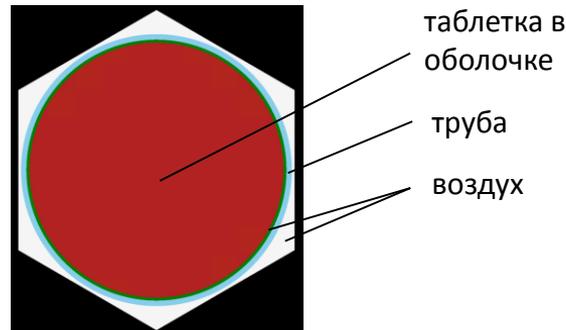
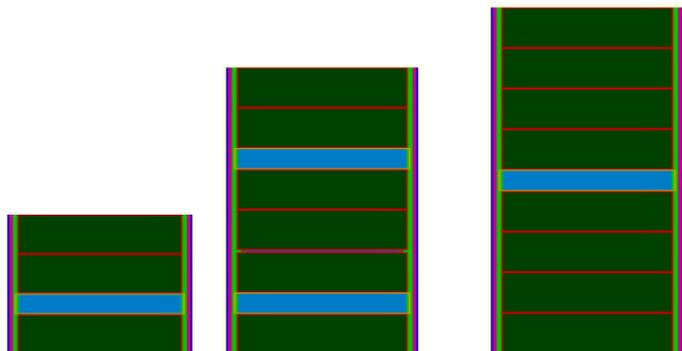


Рисунок 4. Схема расчетной модели бесконечной ячейки для сборки БФС-34-1 (на границах ячейки стоит условие зеркального отражения или периодической решетки)

Ячейки БФС с урановым топливом



а) БФС-35-1

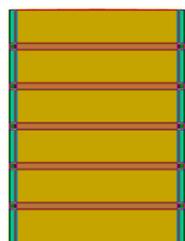
б) БФС-35-2

в) БФС-35-3

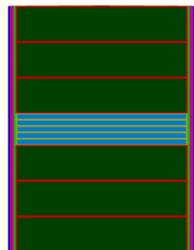
а) БФС-35-1: $2U(d) - U(36) - U(d)$, Al

б) БФС-35-2: $2U(d) - U(36) - 2U(d) - U(90)t - 2U(d) - U(36) - U(d)$, Al

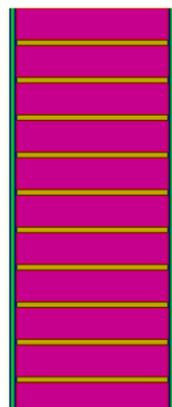
в) БФС-35-3: $4U(d) - U(90) - 4U(d)$, Al



г) БФС-33-1-1



д) БФС-33-1-3



е) БФС-33-2-1

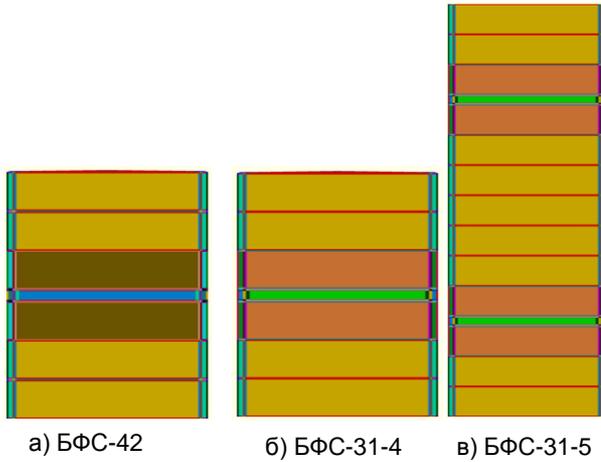
г) БФС-33-1-1: $5[U(d)O_2 - U(90)O_2] - U(d)O_2$, Steel

д) БФС-33-1-3: $3U(d)O_2 - 5U(90)O_2 - 3U(d)O_2$, Steel

е) БФС-33-2-1: $10[U(90)O_2 - U(d)O_2]$, Steel

Рисунок 5. Ячейки БФС с урановым топливом

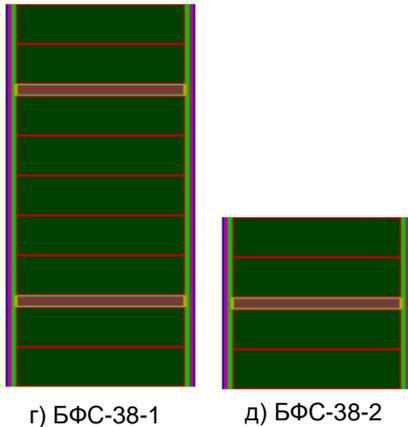
Ячейки БФС с уран-плутониевым топливом



а) БФС-42: $U(d)O_2$ - PE - $2U(d)O_2$ - Pu(95) - $2U(d)O_2$ - PE - $U(d)O_2$, Steel

б) БФС-31-4: $3U(d)O_2$ - Pu(95) - $3U(d)O_2$, Steel

в) БФС-31-5: $3U(d)O_2$ - Pu(95) - $7U(d)O_2$ - Pu(95) - $3U(d)O_2$, Steel



г) БФС-38-1: $2U(d)$ - Pu(95) - $5U(d)$ - Pu(95) - $2U(d)$, Steel

д) БФС-38-2: $2U(d)$ - Pu(95) - $U(d)$, Steel

Результаты расчетов ячеек БФС

Таблица 1. Коэффициент размножения нейтронов в бесконечной среде k_{∞} при различных гетерогенных поправках, а также при их отсутствии

$P(1)$ – прецизионный расчет,

$P(2)$ – групповой расчет без гетерогенных поправок,

$P(3)$ – групповой расчет с заданием зоны блокировки соответствующей гомогенному составу ячейки,

$P(4)$ – групповой расчет с гетерогенными поправками из бенчмарка [3].

Сборка	РОСФОНД	БНАБ-РФ (299)	$P(2)/P(1) - 1, \%$	БНАБ-РФ (гом.)	$P(3)/P(1) - 1, \%$	БНАБ-РФ [3]	$P(4)/P(1) - 1, \%$
	$P(1)$	$P(2)$		$P(3)$		$P(4)$	
БФС-31-4	1,00630	1,01034	0,40	1,0066	0,03	1,00966	0,33
БФС-31-5	0,96901	0,97283	0,39	0,9696	0,06	0,97215	0,32
БФС-33-1-1	0,96560	0,97722	1,20	0,9637	-0,20	0,97041	0,50
БФС-33-1-3	0,96444	0,97460	1,05	0,9610	-0,36	0,96699	0,26
БФС-33-2-1	0,99997	1,01169	1,17	0,9980	-0,20	1,00481	0,48
БФС-35-1	0,97097	0,97321	0,23	0,9703	-0,07	0,97018	-0,08
БФС-35-2	0,99884	1,00149	0,27	0,9982	-0,06	0,99786	-0,10
БФС-35-3	0,99099	0,99365	0,27	0,9892	-0,18	0,99146	0,05
БФС-38-1	0,96190	0,96784	0,62	0,9606	-0,14	0,96765	0,60
БФС-38-2	1,01612	1,02189	0,57	1,0141	-0,20	1,02126	0,51
БФС-42	1,01007	1,01802	0,79	1,0129	0,28	1,01827	0,81

Сводные результаты расчетов ячеек БФС

Таблица 2. Абсолютные отклонения коэффициентов размножения при прецизионных и групповых расчётах по программам MCU, MCNP, MNT-CUDA от значений из бенчмарка

Сборка	Бенчмарк	MCU (65 групп)	MNT-CUDA (65 групп)	MCNP (детальный расчёт, РОСФОНД)	MNT-CUDA БНАБ-РФ (299, АСЕ)	MNT-CUDA БНАБ-РФ (299, методика)
БФС-31-4	1,0188	-0,44 %	-0,48 %	-1,27 %	-1,22 %	-1,22 %
БФС-31-5	0,9732	0,21 %	0,15 %	-0,42 %	-0,36 %	-0,36 %
БФС-33-1-1	0,9656	-0,01 %	0,06 %	0,00 %	-0,19 %	-0,07 %
БФС-33-1-3	0,9602	0,43 %	0,39 %	0,42 %	0,08 %	0,42 %
БФС-33-2-1	0,9967	0,30 %	0,40 %	0,34 %	0,12 %	0,30 %
БФС-35-1	0,973	0,34 %	0,25 %	-0,19 %	-0,27 %	-0,32 %
БФС-35-2	1,0044	-0,08 %	-0,17 %	-0,55 %	-0,62 %	-0,62 %
БФС-35-3	0,9959	-0,02 %	-0,08 %	-0,49 %	-0,67 %	-0,67 %
БФС-38-1	0,9669	0,20 %	0,19 %	-0,48 %	-0,63 %	-0,63 %
БФС-38-2	1,0276	-0,61 %	-0,62 %	-1,16 %	-1,35 %	-1,35 %
БФС-42	1,0153	-0,08 %	-0,15 %	-0,51 %	-0,75 %	-0,75 %

Результаты

- Δ_K - абсолютное отклонение коэффициента размножения
- δ_K - относительное отклонение коэффициента размножения
- δF - относительное отклонение интегрального потока по энергии
- δ_γ - относительное отклонение жёсткости спектра

Величина:	Мах отклонение :	
	МСУ	БНАБ-РФ
ВВЭР		
Δ_K	0,6 %	0,4%
δ_K	0,3 %	0,12 %
δF	0,3 %	0,9 %
δ_γ	0,9 %	3,7 %
δ_γ в отдельных группах	2,0 %	–
БФС		
Δ_K	0,4 %	0,18
δF	0,3 %	–
δF в отдельных группах	0,1 %	–

Спасибо за внимание

Варфоломеева Валерия Андреевна
Инженер 1 категории

Тел.: +7 (499) 796 91 26

E-mail: VAVarfolomeeva@vniiAES.ru

2024 г.