



ВНИИАЭС
РОСАТОМ

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ НУКЛИДНОЙ КИНЕТИКИ В ПРОГРАММЕ MNT-CUDA

«Нейтроника-2024»/АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»

Грушин Никита Анатольевич

О.Н. Андрианова, С.А. Бычков, В.А. Варфоломеева, И.Е. Иванов

Введение

В АО «ВНИИАЭС» ведется разработка универсальной инженерной программы MNT-CUDA, ориентированной на детальные полномасштабные расчеты реакторов различного типа в многорупповом приближении методом Монте-Карло с использованием технологии параллельных вычислений на графических процессорах.

Отдельные результаты этого цикла работ представлены в следующих докладах:

- *Учет гетерогенных эффектов при подготовке многогрупповых констант для расчетов реакторов методом Монте-Карло по программе MNT-CUDA*
- *Результаты апробации программы MNT-CUDA на тепловых и быстрых системах с библиотекой БНАБ-РФ*
- ***Решение задач нуклидной кинетики в программе MNT-CUDA***

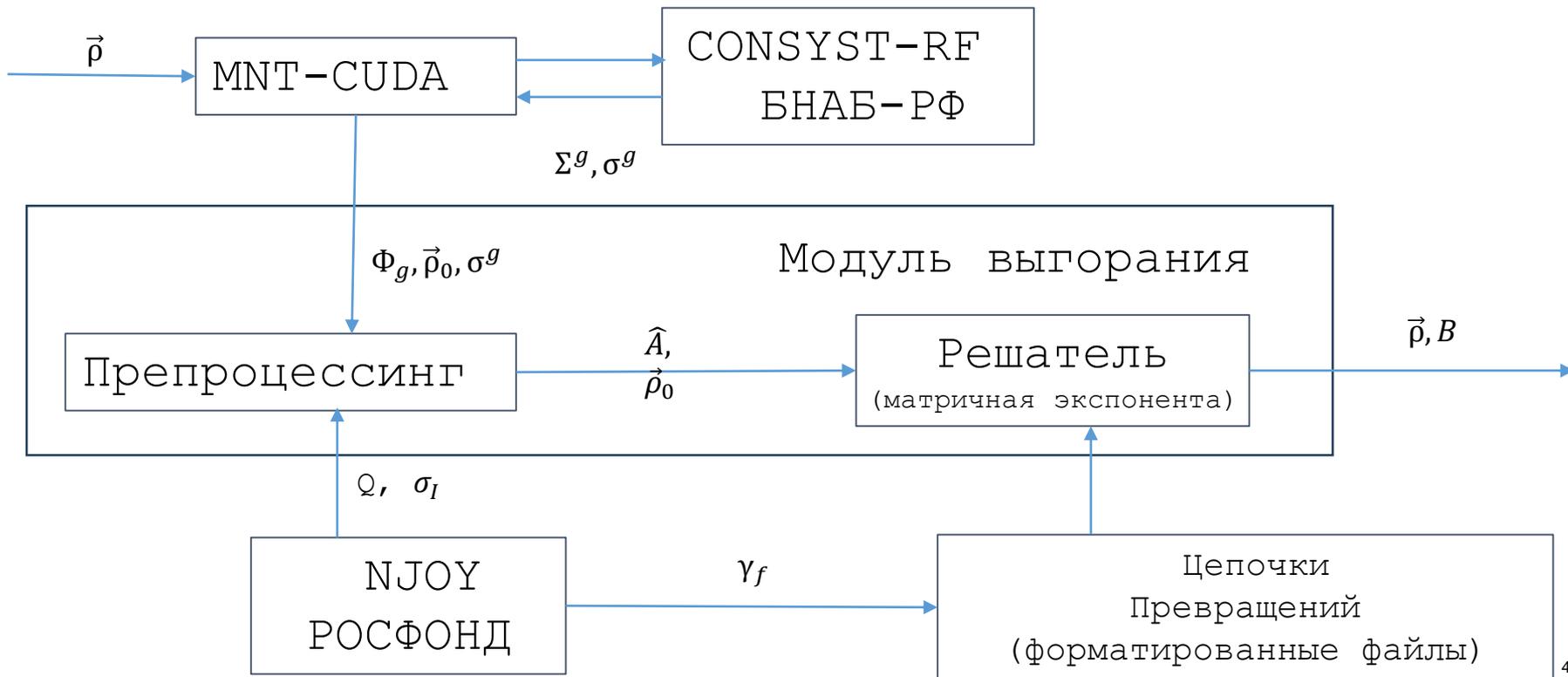
Доклад посвящен демонстрации функциональных возможностей текущей версии модуля выгорания и результатов его тестирования в расчетах кампании реакторов с тепловым и быстрым спектром нейтронов.

Постановка задачи

Накладываемые ограничения на модуль выгорания:

- 1. Высокая точность расчетов и быстродействие** (возможность выполнения расчетов как по детальным и так и по максимально упрощенным цепочкам ядерных превращений).
- 2. Удобство и наглядность** задания цепочек ядерных превращений для пользователя.
- 3. Универсальность** цепочек – возможность решения обширного круга задач без привязки к конкретному типу размножающей системы.
- 4. Гибкость** в организации вычислений - возможность легкой подстройки под конкретную задачу (выделения цепочек отдельных нуклидов, подключение/отключение различных актинидов).
- 5. Многофункциональность** модуля выгорания – возможность подключения к различным нейтронно-физическим кодам (для оценки методической погрешности расчета).

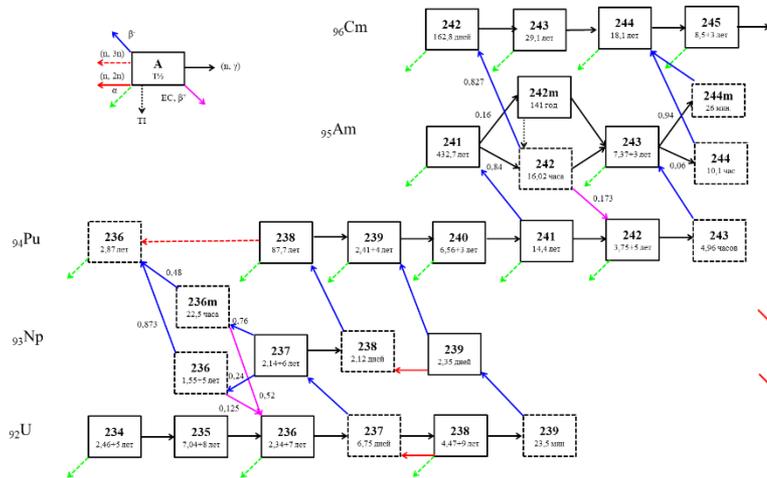
Схема работы модуля в составе MNT-CUDA



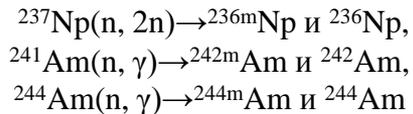
Цепочки ядерных превращений

Для выполненных тестов были приняты следующие цепочки:

1. Цепочка из 28 актинидов ($^{234-239}\text{U}$, $^{236-239}\text{Np}$, $^{236-243}\text{Pu}$, $^{241-244}\text{Am}$, $^{242-245}\text{Cm}$).

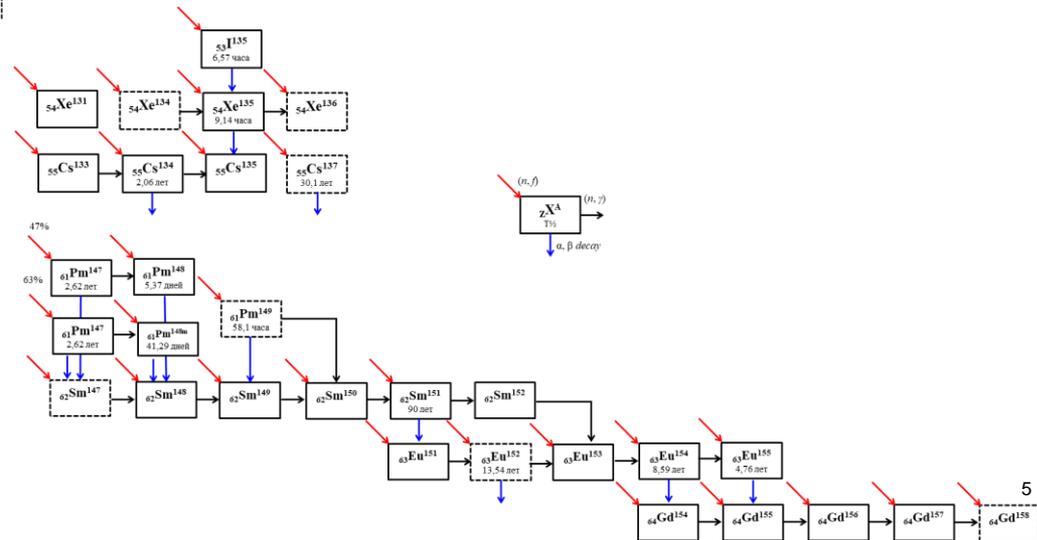


На каждом шаге пересчитываются коэффициентами ветвления образования изомеров:

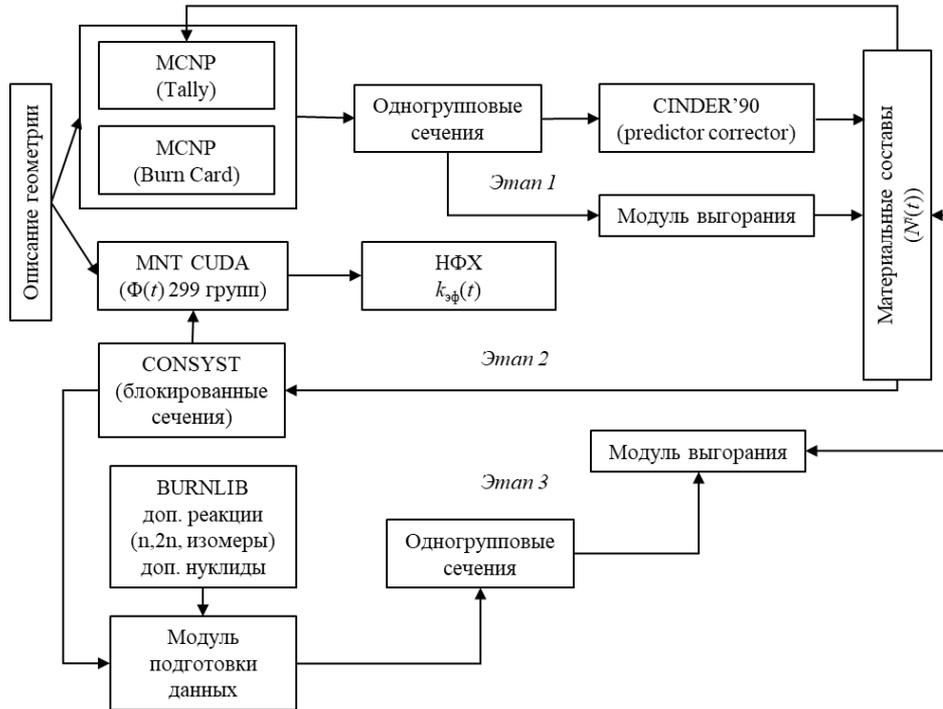


2. Для быстрых систем 162 важных ПД объединены в один обобщенный осколок с постоянными от времени долями.

3. Для тепловых реакторов – упрощенные цепочки продуктов деления (для ^{135}Xe и ^{149}Sm) и выгорающих поглотителей (Ег) вместе с кумулятивным осколком из 94 ПД.



Тестирование решения задачи нуклидной кинетики в программе MNT-CUDA

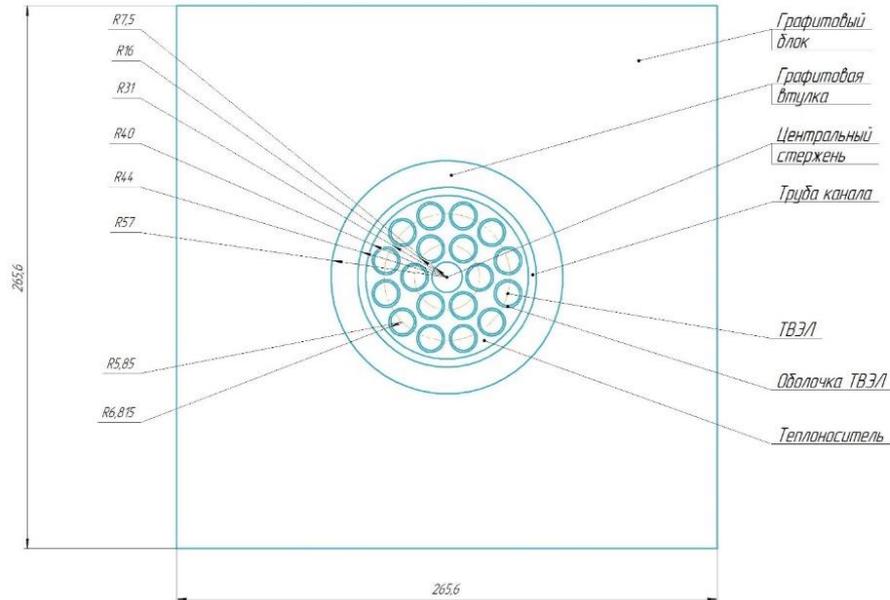


Тестирование решения задачи нуклидной кинетики в программе MNT-CUDA было разделено на три этапа:

- 1) Тестирование используемых цепочек нуклидных превращений – сравнение изотопных составов с MCNP, полученных на одинаковых сечениях и потоках нейтронов.
- 2) Оценка неопределенностей от используемых приближений (групповое приближение, кумулятивный осколок, отсутствие выгорания конструкционных материалов и пр.) – сравнение НФХ с MCNP на одинаковых изотопных составах (выгорающих зон).
- 3) Тестирование модуля выгорания в связке нейтронно-физическими расчетами по MNT-CUDA.

Краткое описание расчетных тестов

Ячейка РБМК



Характеристики топлива:

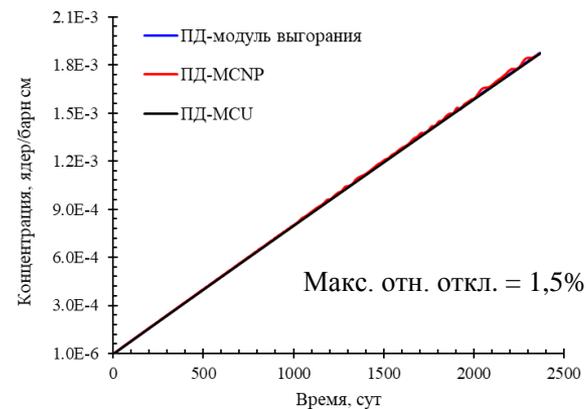
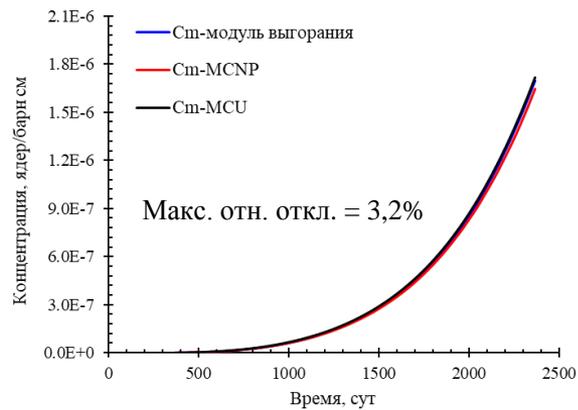
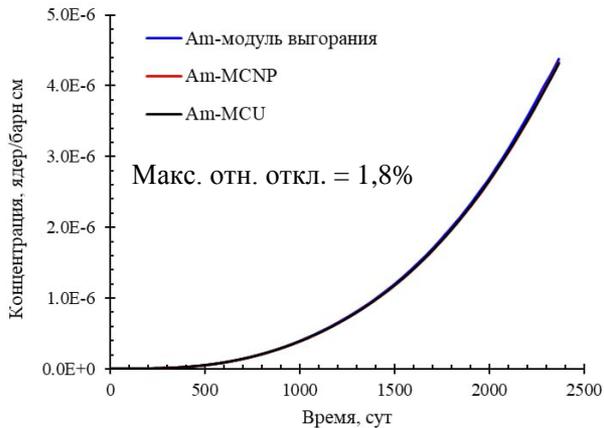
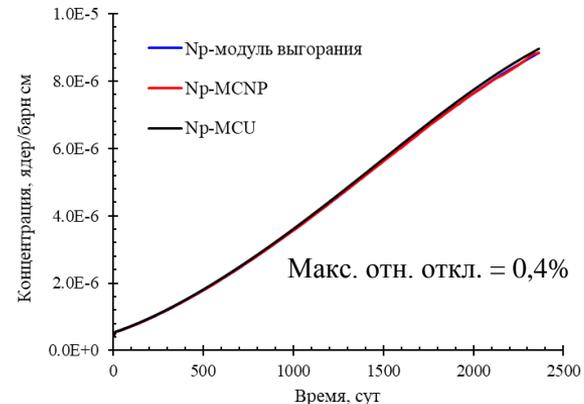
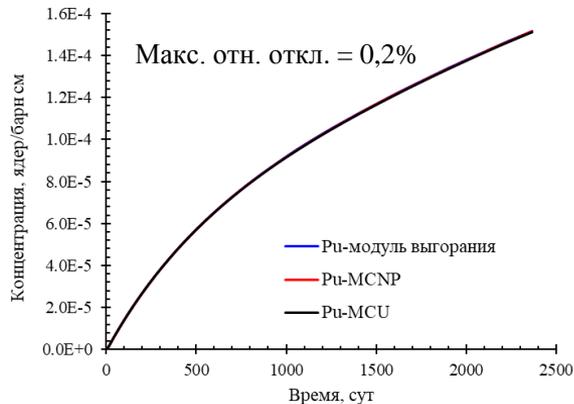
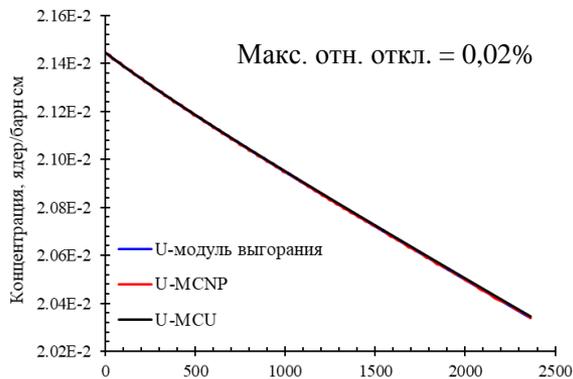
- Обогащение по ^{235}U – 2,8%
- Массовое содержание Er – 0,6%
- Плотность теплоносителя – 0,5 г/см³

Длительность кампании – 2365 суток

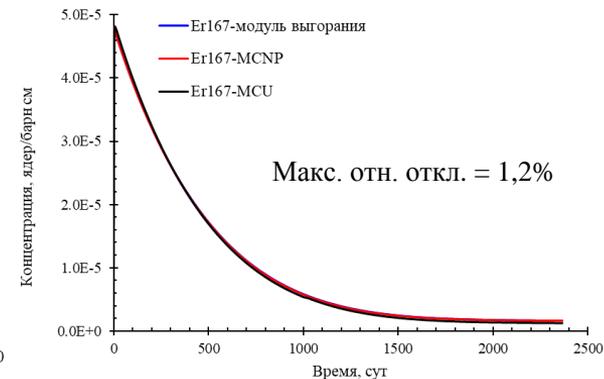
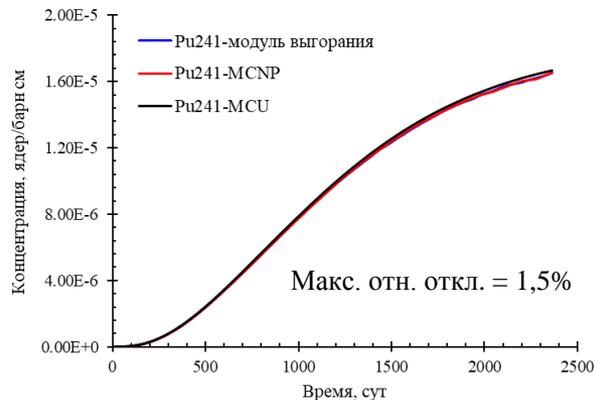
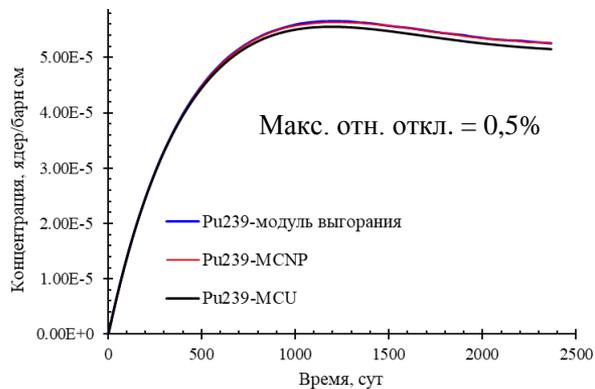
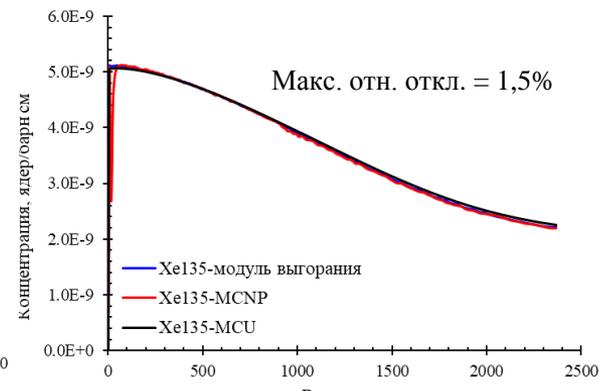
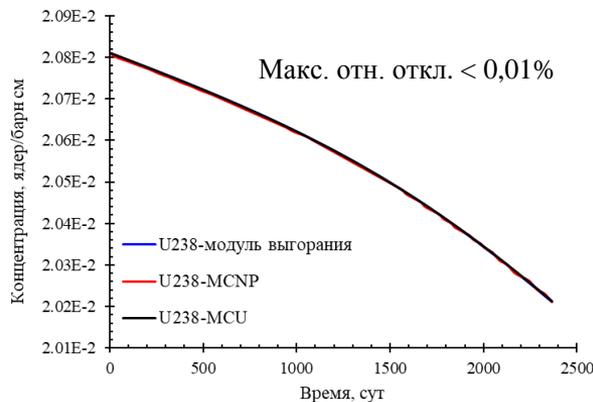
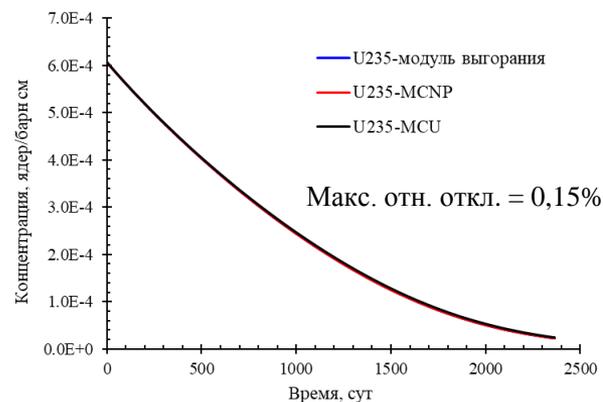
Кампания разбита на 160 временных шагов:

- 1 шаг – 5 суток
- 100 шагов по 10 суток
- 50 шагов по 20 суток
- 9 шагов 40 суток

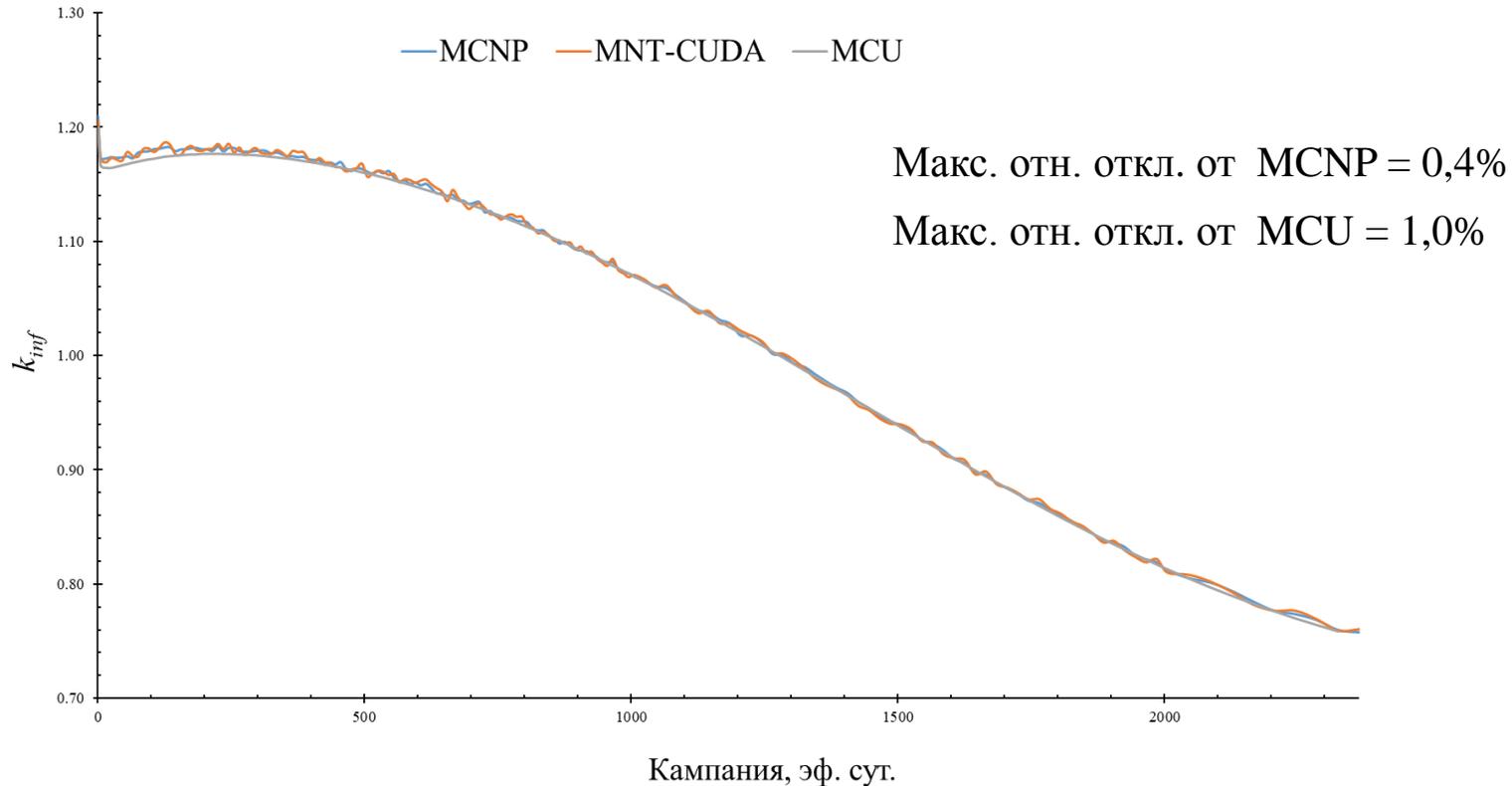
Результаты тестирования модели выгорания в расчетах кампании РБМК (1)



Результаты тестирования модели выгорания в расчетах кампании РБМК (2)



Результаты тестирования модели выгорания в расчетах кампании РБМК (3)



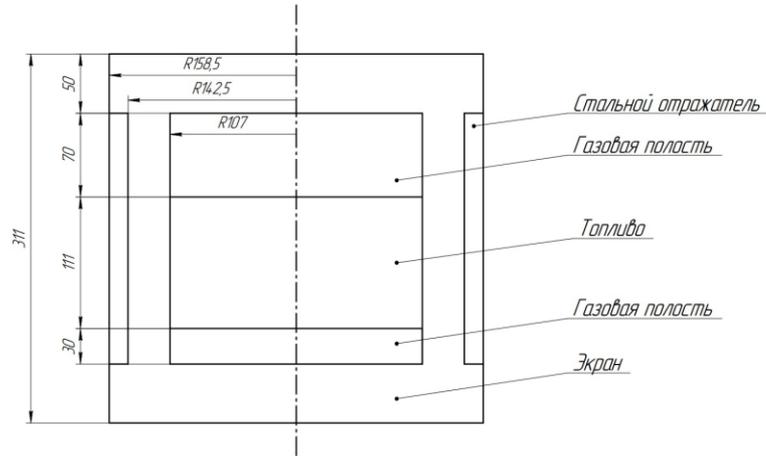
Результаты тестирования модели выгорания в расчетах кампании РБМК (4)

Отклонения групповых расчетов от детальных

1. В значениях k_{inf} : не более 0,4% от MCNP и не более 1% от MCU;
2. Максимальное отклонение в концентрациях отдельных нуклидов:
 - $^{235}\text{U} - 0,15\%$, $^{238}\text{U} - < 0,01\%$, $^{239}\text{Pu} - 0,5\%$, $^{241}\text{Pu} - 1,5\%$, $^{135}\text{Xe} - 1,5\%$, $^{167}\text{Er} - 1,2\%$;
3. В массах элементов:
 - $\text{U} - 0,02\%$, $\text{Pu} - 0,2\%$, $\text{ПД} - 1,5\%$.

Краткое описание расчетных тестов

Упрощенная модель РБН со свинцовым теплоносителем



Характеристики топлива:

- средняя плотность $12,5 \text{ г/см}^3$,
- массовая доля плутония $13,6\%$,
- массовая доля изотопа ^{235}U в обедненном уране $0,2\%$,
- состав плутония ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu , ^{242}Pu , ^{241}Am : $1,19$; $68,42$; $23,14$; $3,03$; $4,15$ и $0,3\%$ соответственно.

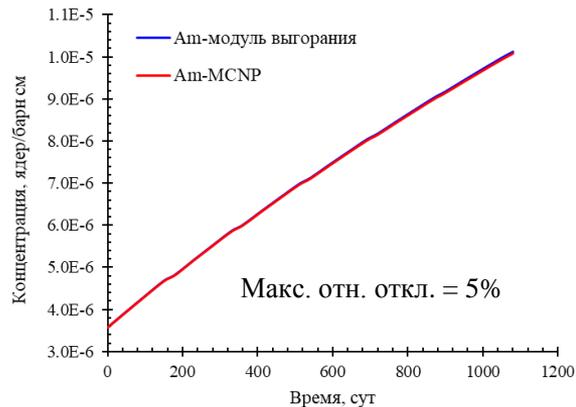
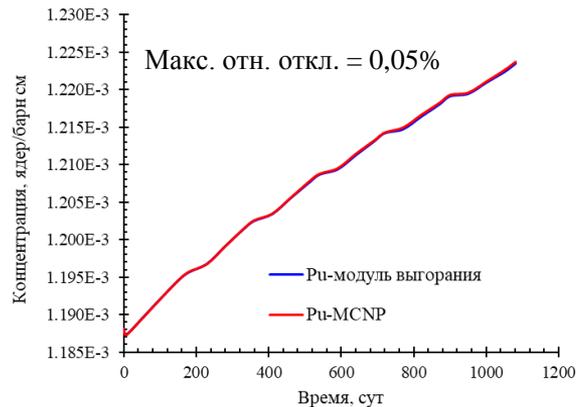
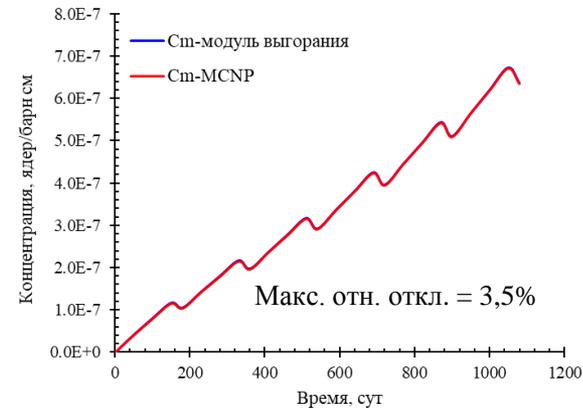
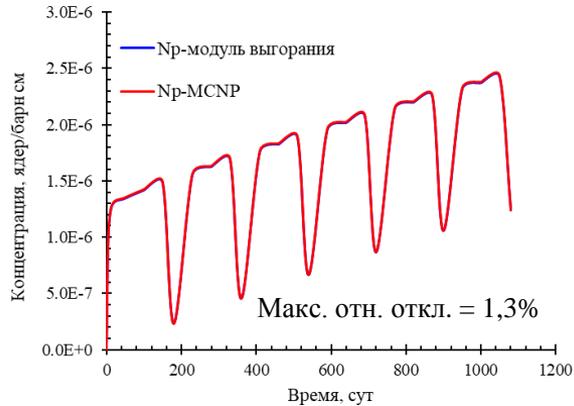
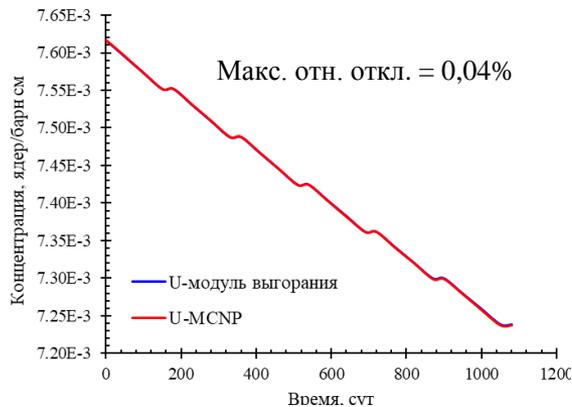
Длительность кампании - 900 суток = 6 микрокампаний по 150 суток с остановками на 30 суток = 1080 суток

1ая микрокомпания = шаг 5 суток + шаг 10 суток + шаг 35 суток + 2 шага по 50 суток + 30 суток остановка = 6 шагов
на мощности

Микрокомпания = 3 шага по 50 суток на мощности + 30 суток остановка = 4 шага

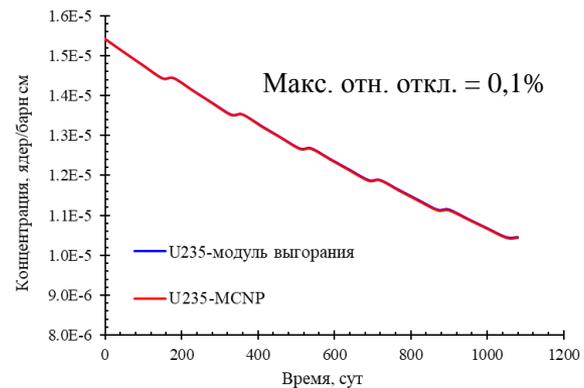
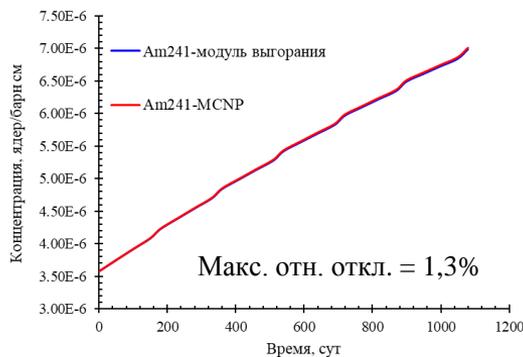
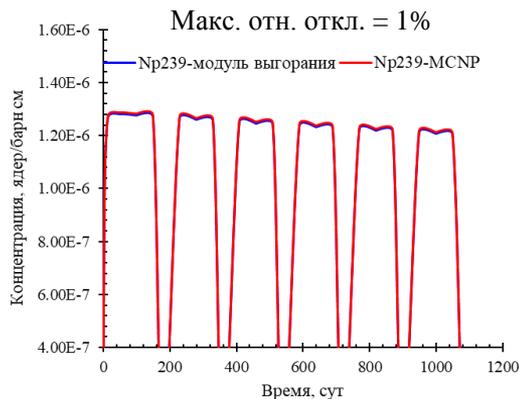
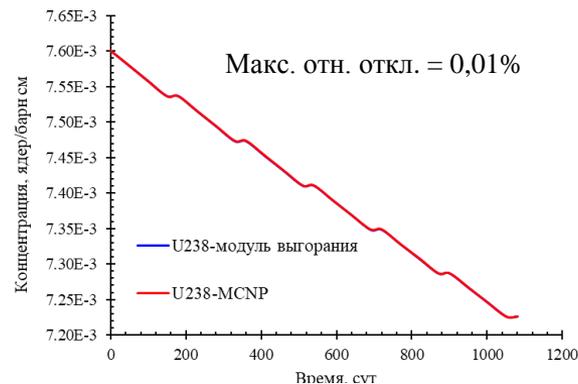
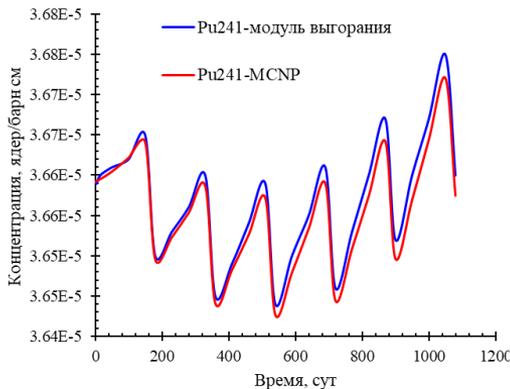
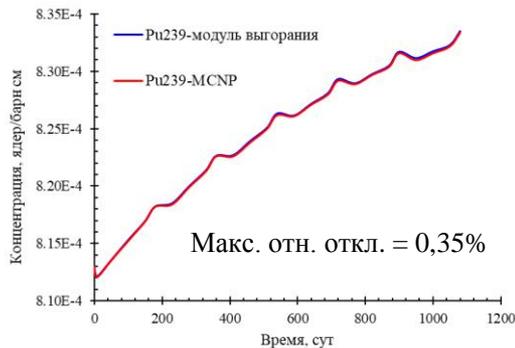
В процессе расчета кампании не моделировалось выгорание ПКР и перестановки ТВС – модель гомогенная

Результаты тестирования модели выгорания в расчетах кампании РБН (1)

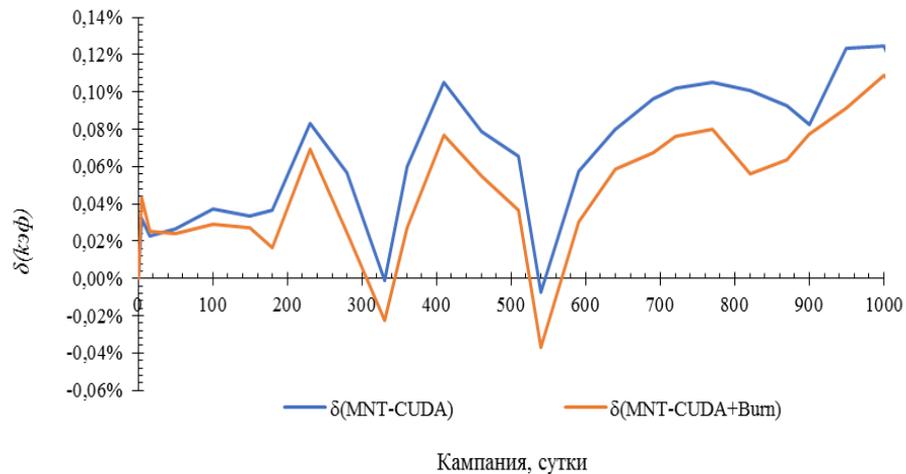
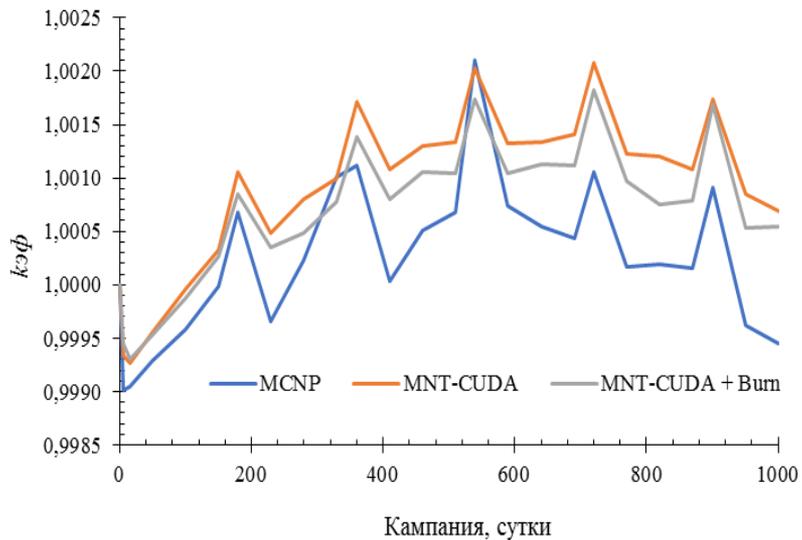


Результаты тестирования модели выгорания в расчетах кампании РБН (2)

Макс. отн. откл. = 1,3%



Результаты тестирования модели выгорания в расчетах кампании РБН (3)



Результаты тестирования модели выгорания в расчетах кампании РБН (4)

Отклонения групповых расчетов от детальных

1. В значениях $k_{эф}$: не более 0,15%
2. В одnogрупповых сечениях (сечения слабо меняются в процессе выгорания):
 - *Захват*: $^{235}\text{U} - 1,4\%$, $^{239}\text{Pu} - 2,2\%$, $^{241}\text{Pu} - 1,7\%$, $^{241}\text{Am} - 1,4\%$, $^{239}\text{Np} - 1,4\%$;
 - *Деление*: $^{235}\text{U} - 0,7\%$, $^{239}\text{Pu} - 0,6\%$, $^{241}\text{Pu} - 0,8\%$, $^{241}\text{Am} - 0,2\%$, $^{239}\text{Np} - 1,6\%$;
 - *(n,2n)*: $^{235}\text{U} - 1,1\%$, $^{239}\text{Pu} - 1,1\%$, $^{241}\text{Pu} - 0,3\%$, $^{241}\text{Am} - 2,2\%$, $^{239}\text{Np} - 0,2\%$;
3. Максимальное отклонение в концентрациях отдельных нуклидов :
 - $^{235}\text{U} - 0,1\%$, $^{238}\text{U} - 0,01\%$, $^{239}\text{Pu} - 0,35\%$, $^{241}\text{Pu} - 1,3\%$, $^{241}\text{Am} - 1,3\%$, $^{239}\text{Np} - 1\%$;
4. В массах элементов:
 - $\text{U} - 0,04\%$, $\text{Np} - 1,3\%$, $\text{Pu} - 0,05\%$, $\text{Am} - 5\%$, $\text{Cm} - 3,5\%$,

- Разработан универсальный модуль решения задач нуклидной кинетики
- Разработана архитектура подключения модуля расчета нуклидной кинетики и подготовки библиотеки однокрупных констант на каждом шаге выгорания
- Проведено трехэтапное тестирование (верификация/валидация) модуля выгорания
- Были получены следующие точности (как максимальное отклонение от прецизионных расчетов) расчета концентраций важных нуклидов:
 - В тепловом спектре: $^{235}\text{U} - 0,15\%$, $^{238}\text{U} < 0,01\%$, $^{239}\text{Pu} - 0,5\%$, $^{241}\text{Pu} - 1,5\%$, $^{135}\text{Xe} - 1,5\%$, $^{167}\text{Er} - 1,2\%$;
 - В быстром спектре: $^{235}\text{U} - 0,1\%$, $^{238}\text{U} - 0,01\%$, $^{239}\text{Pu} - 0,35\%$, $^{241}\text{Pu} - 1,3\%$, $^{241}\text{Am} - 1,3\%$, $^{239}\text{Np} - 1,0\%$;
- Время счета шага по выгоранию:
 - *MNT-CUDA + модуль выгорания*
 - *GPU – 1 единица времени (условная)*
 - *CPU – 7 единиц времени(условных)*
 - *MCNP (дет. ход) – 1000 единиц времени(условных)*

- Совершенствование методики формирования кумулятивного осколка деления
- Детализация и специализация цепочек актинидов (добавление тяжелых МА и пр.)
- Адаптация модуля под расчет активности и остаточного энерговыделения (добавление цепочек конструкционных материалов)
- Расширение функционала работы с цепочками ядерных превращений (визуализация, «сложение» цепочек и т.п.)
- Развитие функционала анализа чувствительности и неопределенностей концентраций нуклидов
- Расширение верификационной базы модуля выгорания

Список использованных источников

1. <https://docs.nvidia.com/cuda/cuda-c-best-practices-guide/index.html>
2. Аттестационный паспорт программного средства «MNT-CUDA (версия 2.0)» № 524; secnrs.ru/expertise/software-review/База_аттестационных_паспортов_ноябрь_2023.pdf
3. Грушин Н.А., Бычков С.А., Дружинин В.Е., Зинаков Д.Л., Иванов И.Е., Лысов Д.А., Плеханов Р.В., Шмонин Ю.В. Групповые расчеты реакторов методом Монте-Карло с детальным описанием геометрии. Программа MNT-CUDA версия 2.0. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2022. – № 4. – с. 46 – 58.
4. CONSYST-RF Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. – № 2016612865. – 2016.
5. БНАБ-РФ Свидетельство о государственной регистрации базы данных. – № 2016620461. – 2016.

Спасибо за внимание

Грушин Никита Анатольевич
Ведущий инженер

Тел,: +7 (495) 376-12-53
E-mail: NAGrushin@vniiAES.ru

