



ОКБ
ГИДРОПРЕСС
РОСАТОМ

Выжигание малых актинидов в водо-водяных реакторах с использованием РЕМИКС- топлива

28-31 мая 2024 г.

Карпович Глеб Владиславович
отдел нейтронной физики и радиационной защиты

Научно-практическая конференция «Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики (Нейтроника-2024)»,
АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»

Выжигание малых актинидов: варианты РУ

Реакторы на быстрых нейтронах БН, БРЕСТ

Достоинства:

- ✓ использование малых актинидов в качестве топлива закладывается на этапе проектирование РУ;
- ✓ сечения деления и радиационного захвата у различных изотопов малых актинидов различаются не сильно;

Недостатки:

- технологии реакторных установок или прошли этап опытно-промышленной эксплуатации (БН), или находятся в стадии разработки (БРЕСТ);
- наличие изотопов с порогом деления в интервале 100 кэВ – 1 МэВ создает проблему положительного пустотного эффекта реактивности.

Реакторы на тепловых нейтронах ВВЭР

Достоинства:

- ✓ освоенная технология с наработкой более 1500 реактор*лет (только ВВЭР, без учета PWR);
- ✓ некоторые из малых актинидов являются делящимися ядрами с сечениями, больше чем у ^{235}U .

Недостатки:

- использование малых актинидов в составе топлива требует дополнительного обоснования и НИОКР;
- широкий разброс сечений деления и радиационного захвата в тепловом спектре, некоторые изотопы малых актинидов практически не делятся при облучении тепловыми нейтронами.



Постановка задачи

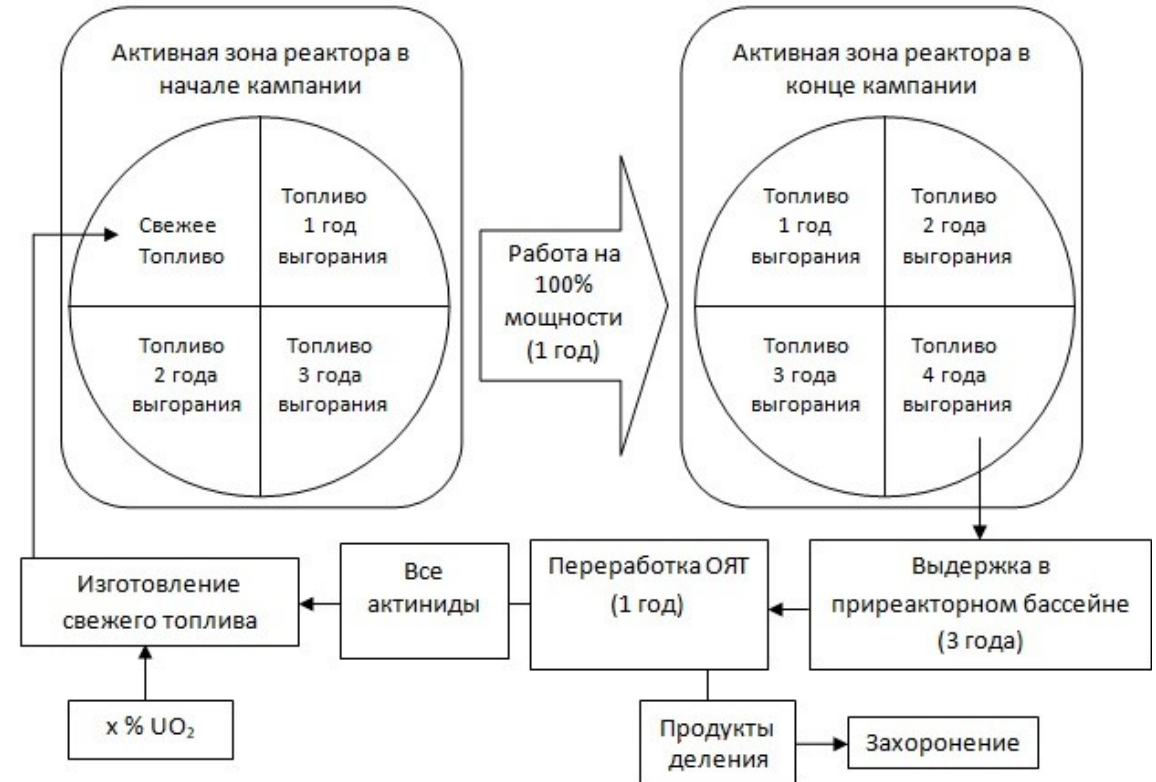
Цель работы состоит в проверке возможностей выжигания малых актиноидов во ВВЭР с соблюдением следующих условий:

- сохранение длительности кампании реактора;
- малые актиноиды, извлеченные из ОЯТ, возвращаются в реактор в составе свежего топлива;
- отказ от селективного выделения актиноидов при переработке ОЯТ;
- соблюдение уставки по тепловыделению свежего ядерного топлива на уровне до 5 кВт/ТВС.

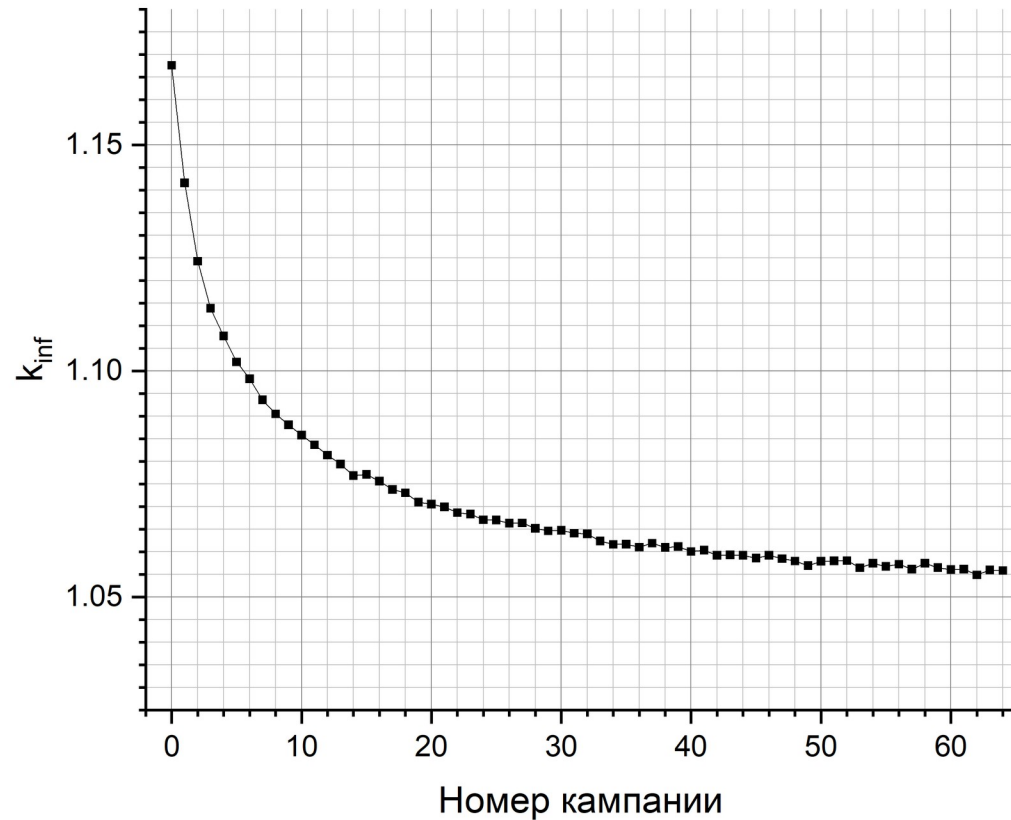
Моделируемый топливный цикл



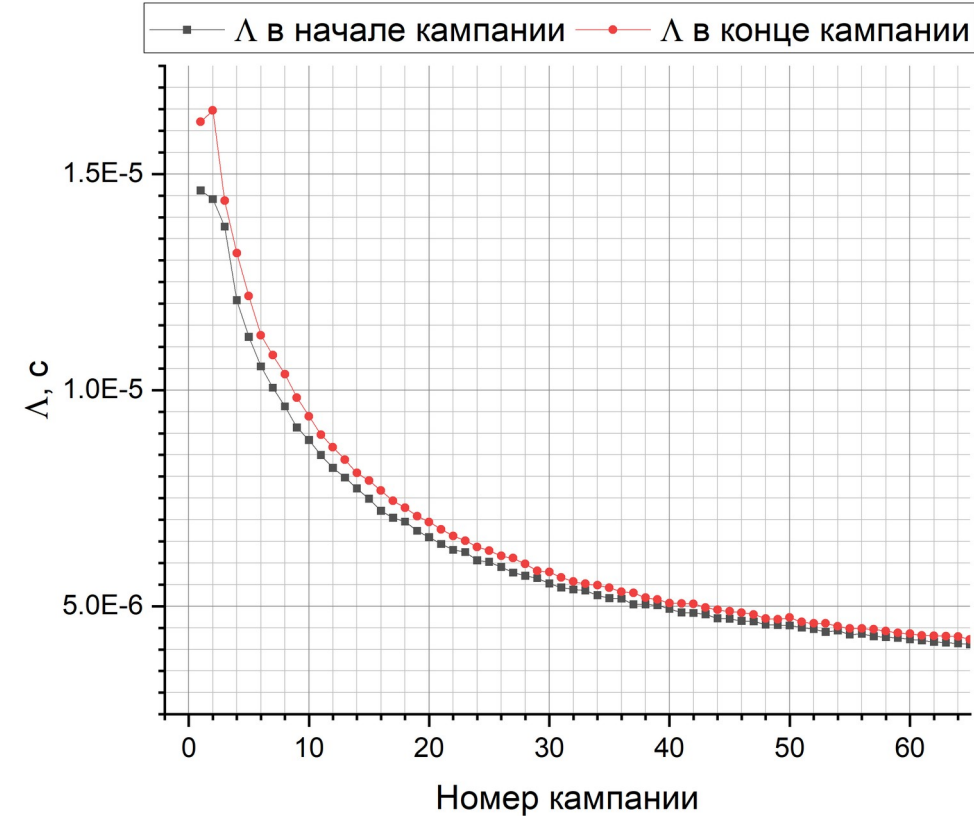
- Моделируется топливный цикл реактора ВВЭР-1200 с ежегодными перегрузками $\frac{1}{4}$ активной зоны.
- Вместо полной модели реактора используется модель единичной ТВС в бесконечной решетке с разделением твэлов на 4 группы с различными глубинами выгорания. При перегрузке наиболее выгоревшее топливо заменяется на свежее.
- Нейтронно-физические характеристики рассчитываются методом Монте-Карло, выгорание – путем решения уравнений изотопной кинетики. Средства расчета: программа TDMCC с базами оцененных ядерных данных ENDF-B/VI.8.
- Моделирование проводится для двух сценариев:
 - старт с обычного уран-оксидного топлива с $x=4,95\%$ и получение равновесного состава актиноидов
 - старт со смеси из 7% урана и Np, Pu, Am, Cm , массы которых соответствуют составам из первого сценария, а изотопный состав – из ОЯТ ВВЭР-1200 с выгоранием 57 МВт*сут/кг (загрузка со склада делящихся материалов)



Динамика k_{inf} и времени генерации нейтронов



Зависимость k_{inf} в начале кампании от ее номера



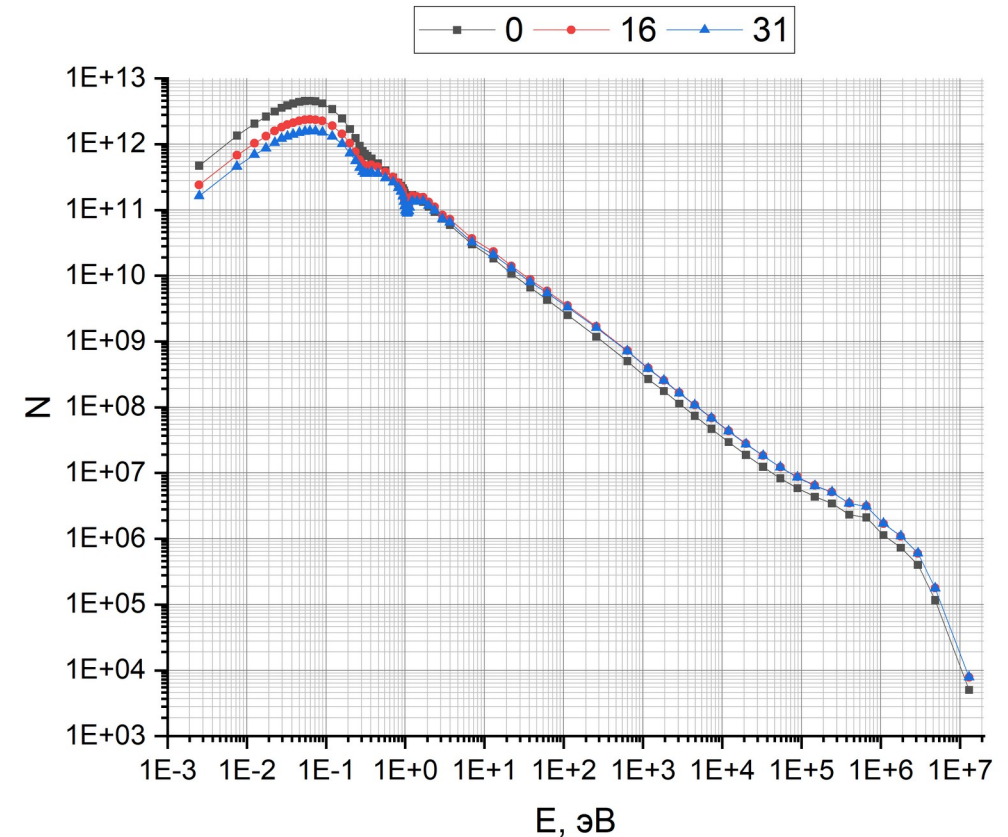
Зависимость времени генерации нейтронов от номера кампании.

Изменение спектра нейтронов по мере накопления малых актинидов



Причиной трехкратного падения времени генерации нейтронов является ужесточение их спектра. Это является следствием накопления изотопов плутония и малых актинидов. Некоторые из этих изотопов (^{241}Pu , $^{242\text{m}}\text{Am}$, ^{243}Cm , ^{245}Cm) имеют сечения деления в тепловой области, превосходящие ^{235}U .

Ужесточение спектра нейтронов влечет за собой рост наработки ^{239}Pu из ^{238}U , а также повышение выхода вторичных нейтронов при делении.

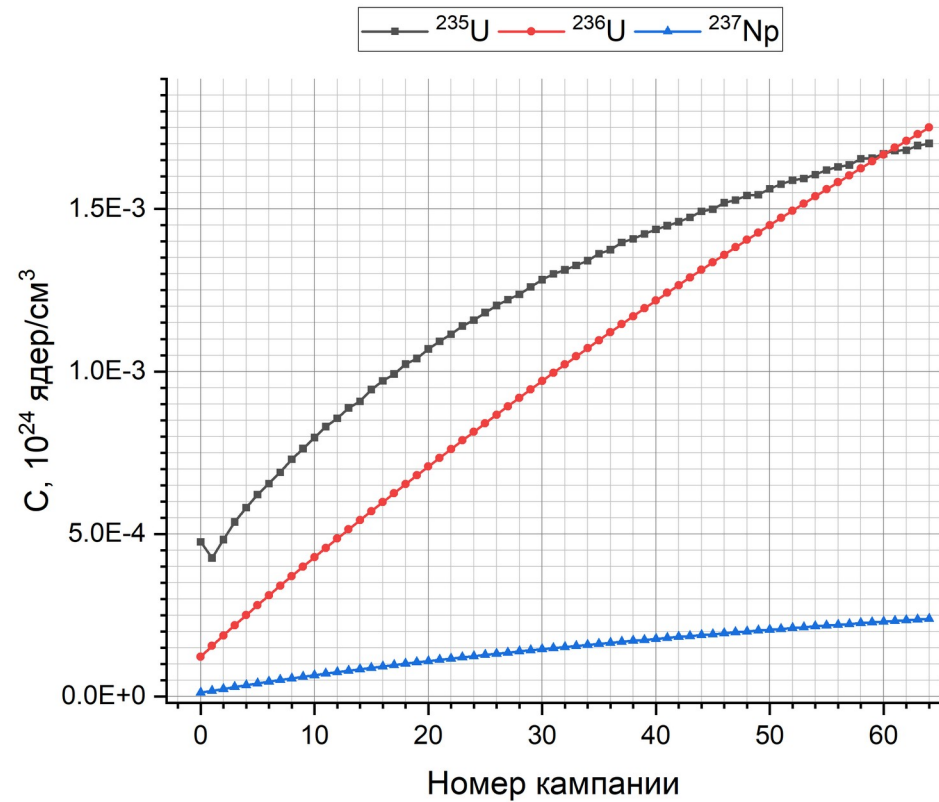


Усредненный спектр нейтронов в реакторе ВВЭР-1200 для разных кампаний

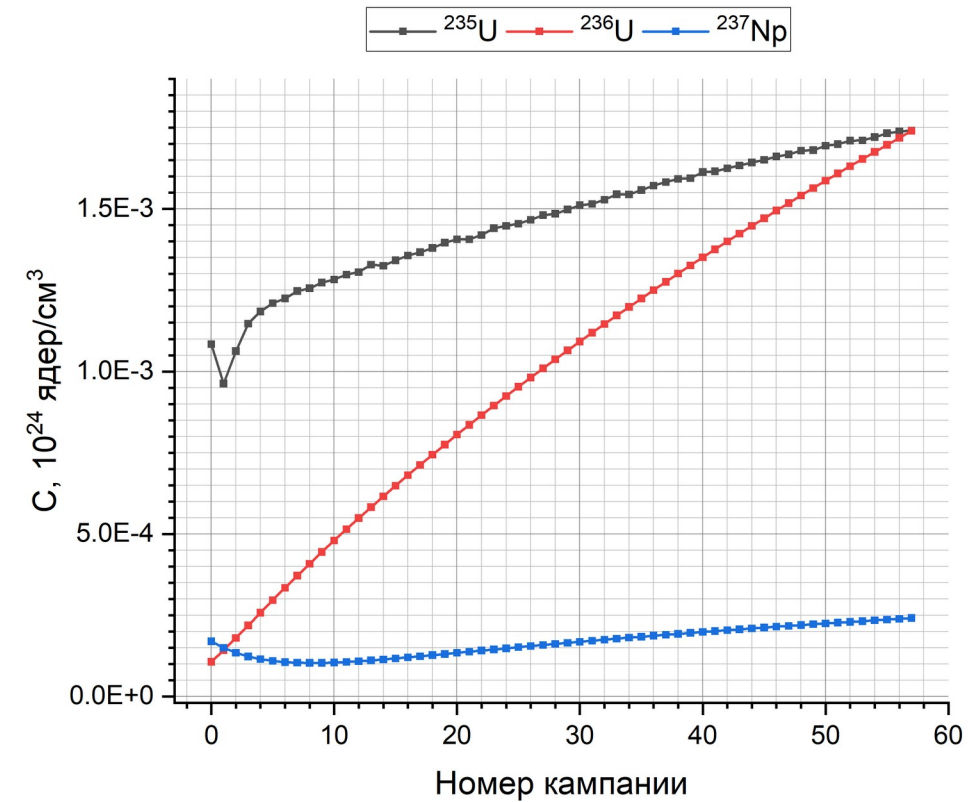
Изменение изотопного состава топлива для двух сценариев. Уран и нептуний



ОКБ
ГИДРОПРЕСС
РОСАТОМ

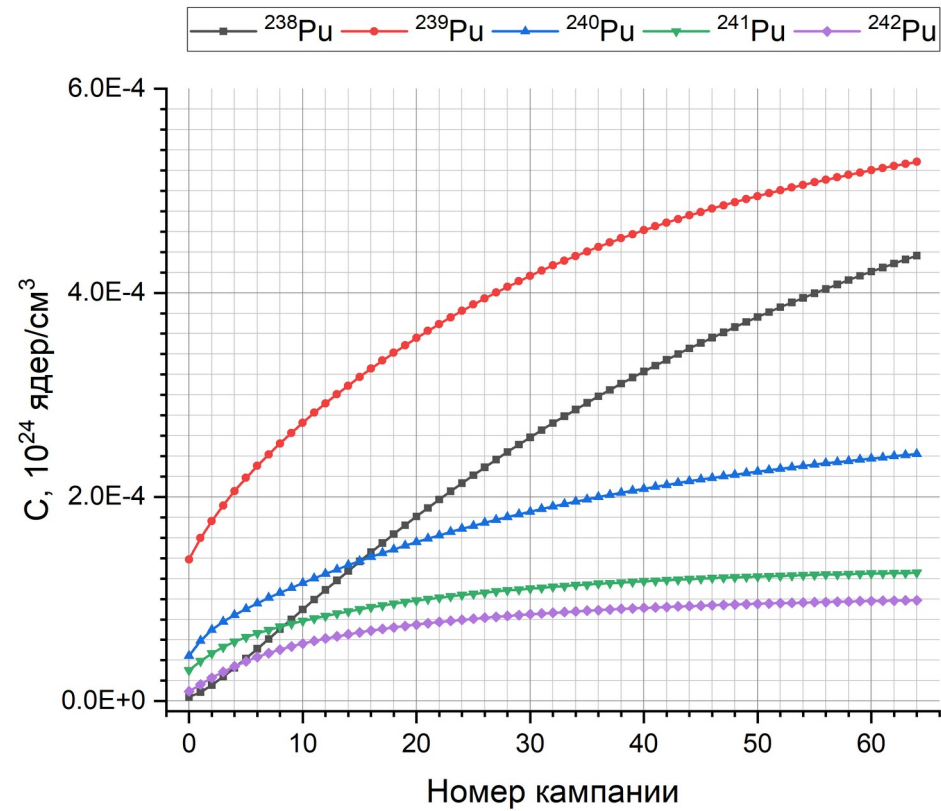


Зависимость концентраций ²³⁵U, ²³⁶U, ²³⁷Np от номера кампании, сценарий старта с уран-оксидного топлива с $x=4,95\%$

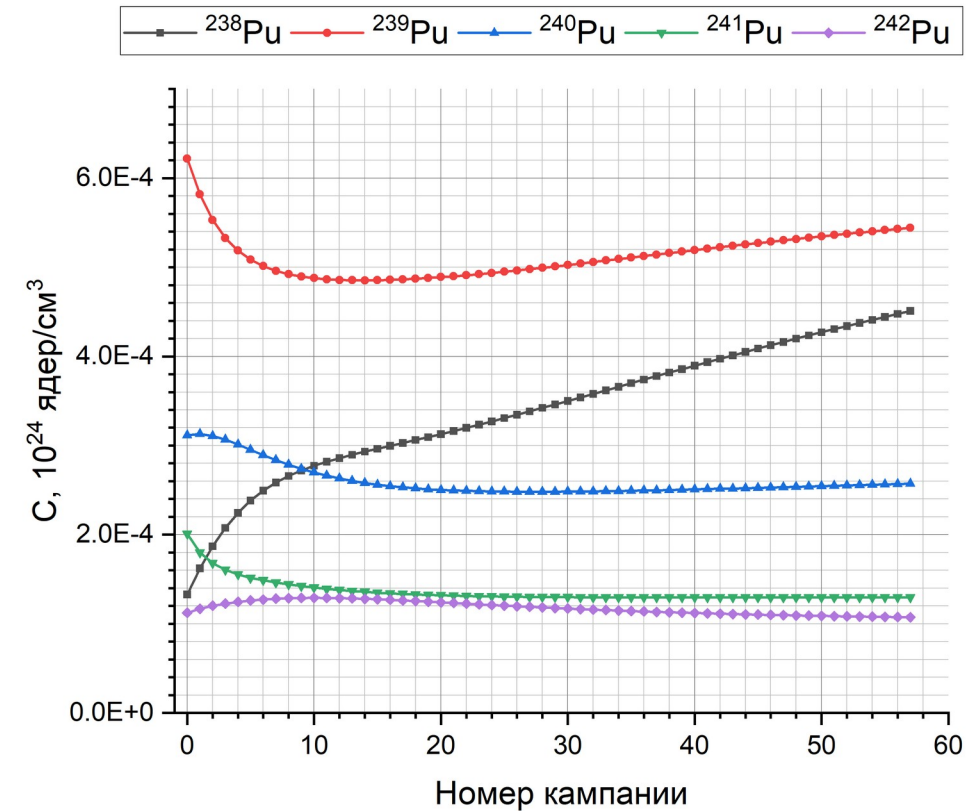


Зависимость концентраций ²³⁵U, ²³⁶U, ²³⁷Np от номера кампании, сценарий старта со смеси актиноидов

Изменение изотопного состава топлива для двух сценариев. Плутоний



Зависимость концентраций изотопов плутония от номера кампании, сценарий старта с уран-оксидного топлива с $x=4,95\%$

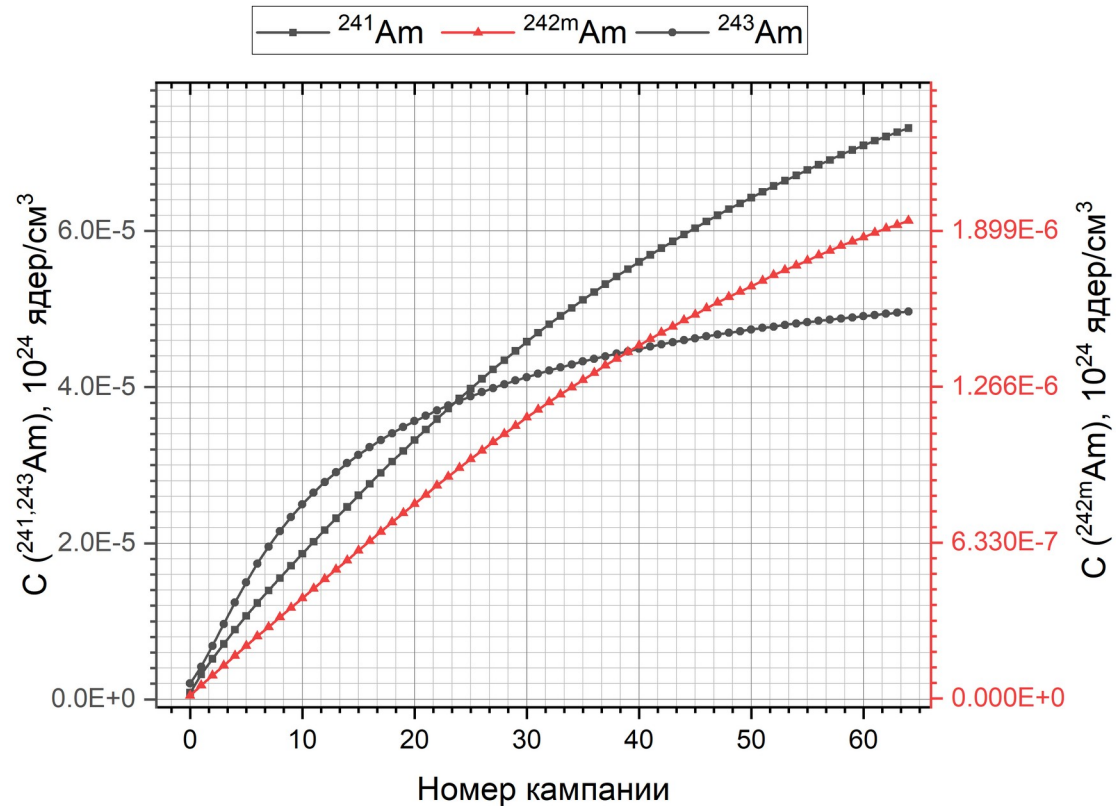


Зависимость концентраций изотопов плутония от номера кампании, сценарий старта со смеси актиноидов

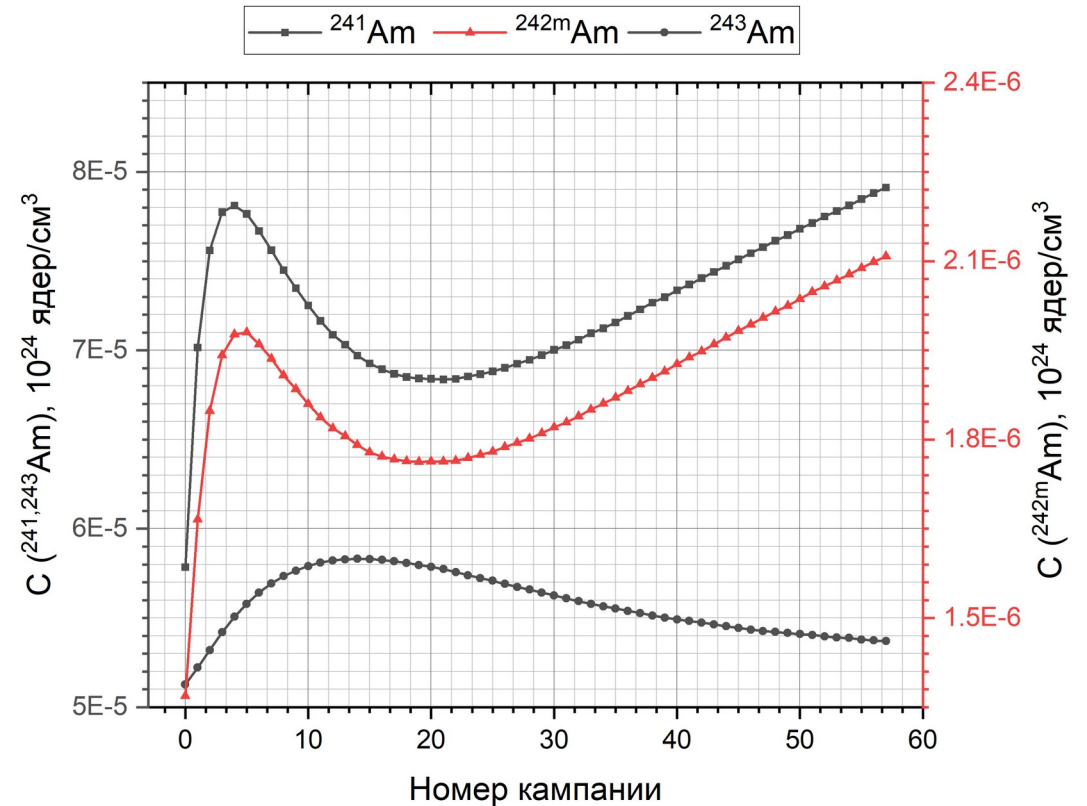
Изменение изотопного состава топлива для двух сценариев. Америций



ОКБ
ГИДРОПРЕСС
РОСАТОМ

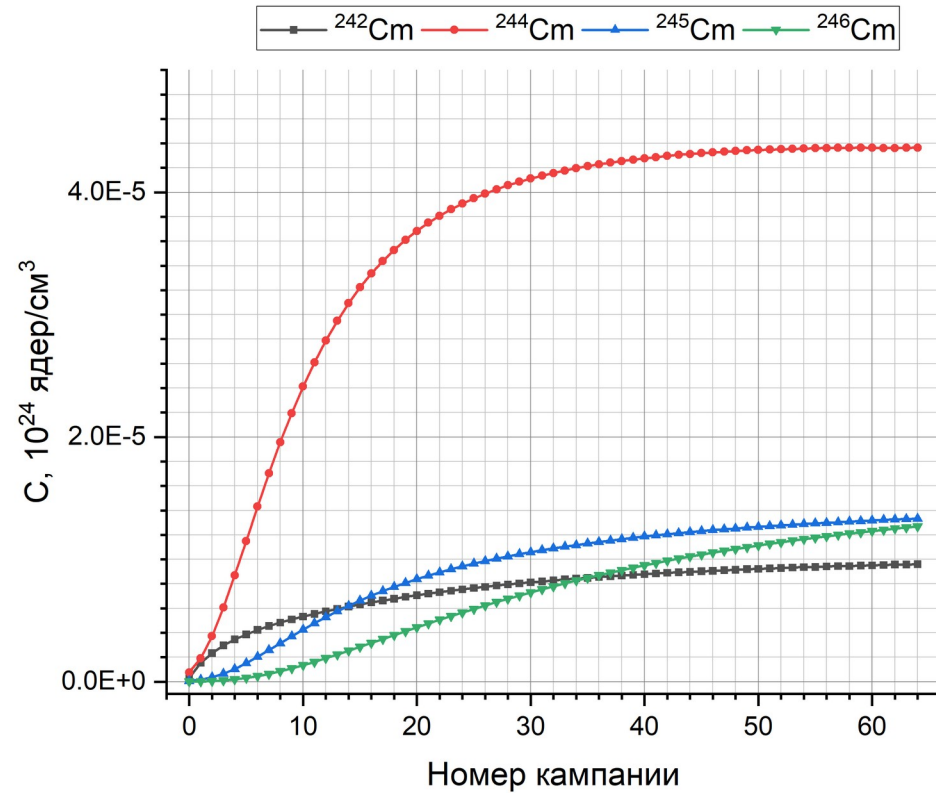


Зависимость концентраций изотопов америция от номера кампании, сценарий старта с уран-оксидного топлива с $x=4,95\%$

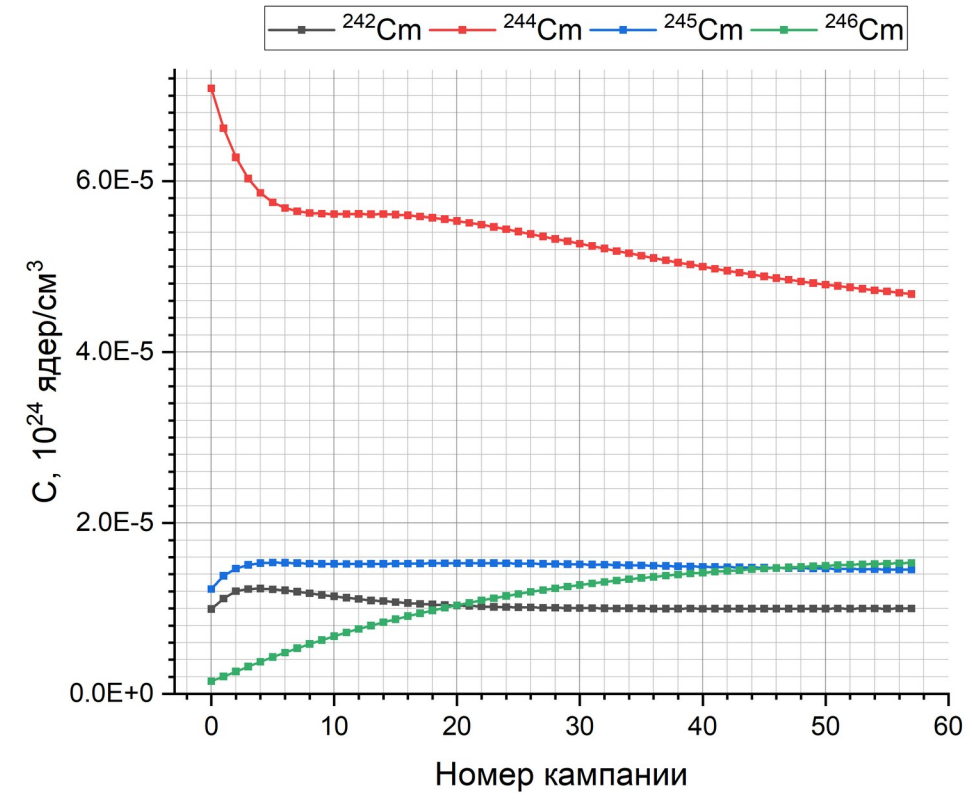


Зависимость концентраций изотопов америция от номера кампании, сценарий старта со смеси актиноидов

Изменение изотопного состава топлива для двух сценариев. Кюрий

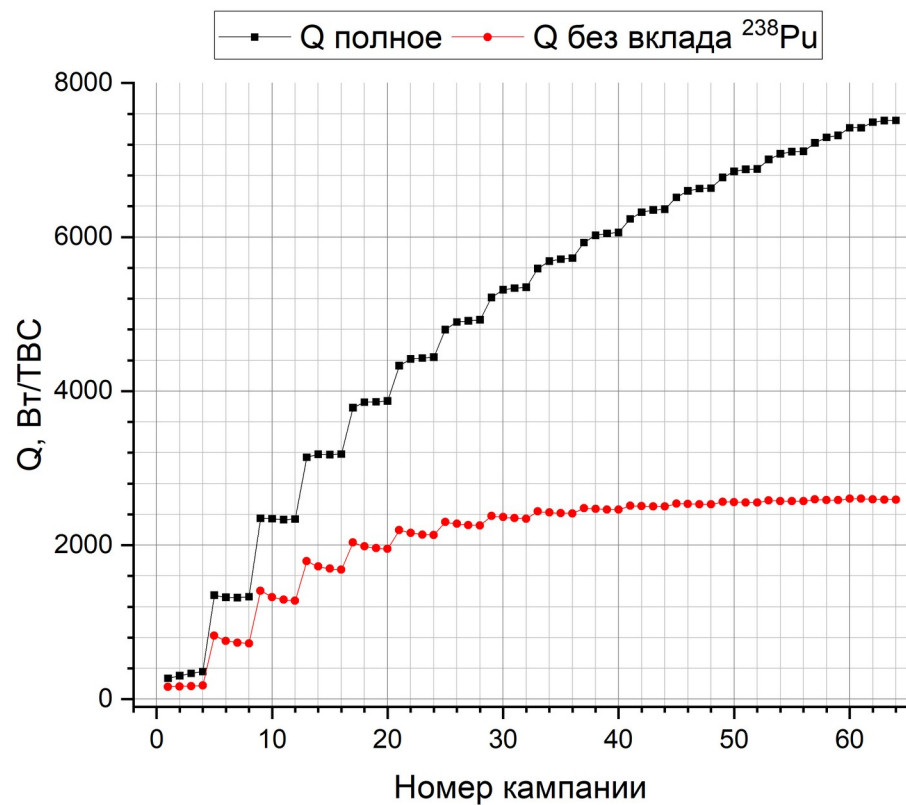


Зависимость концентраций изотопов кюрия от номера кампании, сценарий старта с уран-оксидного топлива с $x=4,95\%$

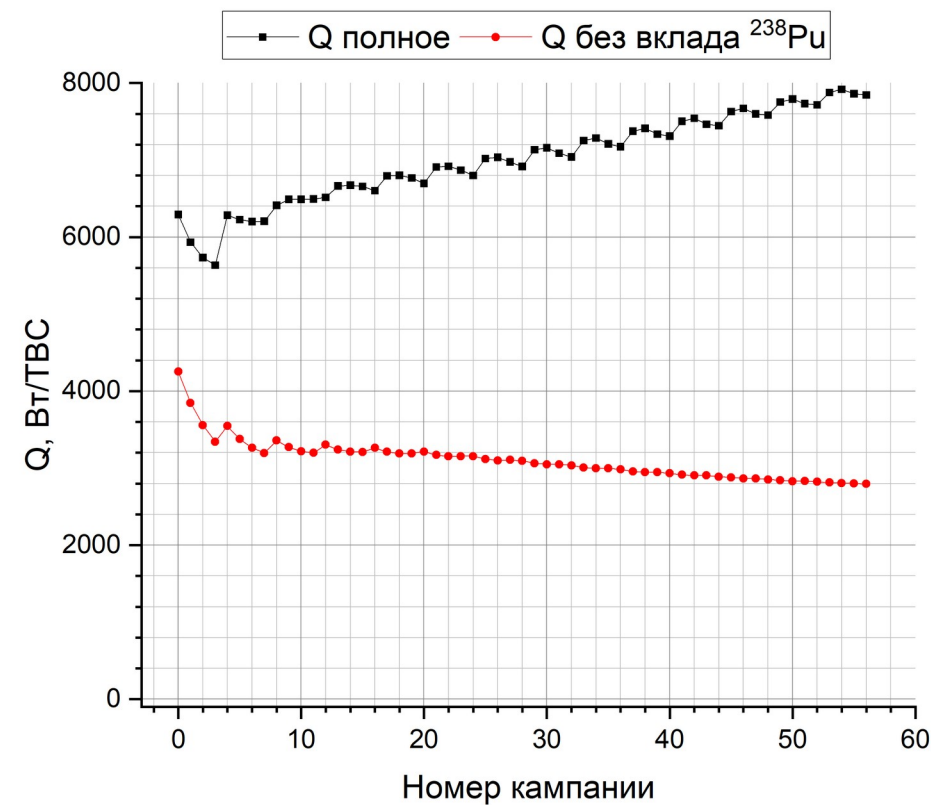


Зависимость концентраций изотопов кюрия от номера кампании, сценарий старта со смеси актиноидов

Тепловыделение свежего ядерного топлива



Зависимость тепловыделения свежего топлива от номера кампании, сценарий старта с уран-оксидного топлива с $x=4,95\%$



Зависимость тепловыделения свежего топлива от номера кампании, сценарий старта со смеси актиноидов

Общие выводы

Результаты расчетов показывают, что:

- Возможность сокращения количества наработанных малых актинидов путем рециркуляции всех тяжелых ядер – существует. В сценарии старта с уран-оксидным топливом с $X=4,95\%$ на 15 перегрузке достигается сокращение массы МА по сравнению с открытым ТЦ в 2,3 раза (для топлива с выгоранием 57 МВт*сут/кг). Расход природного урана при этом составляет 120 т/ГВт(э)*год .
- Концентрации всех изотопов, за исключением ^{236}U , постепенно выходят на равновесное значение. ^{236}U на рассматриваемом интервале перегрузок накапливается практически линейно, т.к. его предшественник ^{235}U , еще не выведен на равновесную концентрацию за счет постоянного добавления подпитки из обогащенного урана при изготовлении свежего топлива.
- Из изотопов, ответственных за тепловыделение свежего топлива от радиоактивного распада, на равновесный уровень относительно быстро выходит только ^{244}Cm . Равновесие для ^{238}Pu достигается намного дольше за счет накопления ядер-предшественников ^{237}Np .
- Выжигание ^{237}Np с использованием РЕМИКС-топлива с постоянной рециркуляцией нецелесообразно, т.к. приводит к сильному росту тепловыделения топлива за счет α -распада накапливающегося ^{238}Pu . Для ^{237}Np необходимо искать решения, предусматривающие переработку ОЯТ только после прохождения пика накопления и последующего выгорания ^{238}Pu .
- Сохранение фракции Am+Cm в составе РЕМИКС-топлива с целью выжигания – возможно, требуются дополнительные исследования реакторных загрузок и свойств топлива.

Спасибо за внимание!

Карпович Глеб Владиславович

E-mail: dzhalandinov_ad@grpress.podolsk.ru

28-31 мая 2024 г.

