



Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору

Федеральное бюджетное учреждение
«Научно-технический центр по
ядерной и радиационной безопасности»



ETSON

EUROPEAN
TECHNICAL SAFETY
ORGANISATIONS
NETWORK

Проведение сравнительных расчетов изменения нуклидного состава ядерного топлива при выгорании

В.А. Лось
«Нейтроника-2019»
г. Обнинск

Предпосылки и особенности учета глубины выгорания при обосновании ядерной безопасности



➔ *Тенденция к увеличению начального обогащения ядерного топлива энергетических реакторов*

➔ *Необходимость перехода на уплотненное хранение ОЯТ*

Использование глубины выгорания в качестве параметра ядерной безопасности при обосновании безопасности хранения и обращения с ОЯТ

➔ *Необходимость определения содержания в ОЯТ ряда нуклидов, значимых с точки зрения ядерной безопасности, с использованием программных средств*

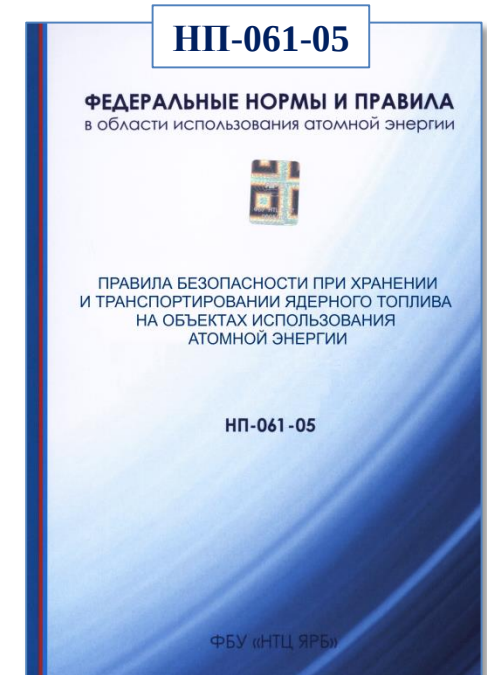
➔ *Необходимость учета погрешностей и неопределенностей получаемых результатов*

Требования нормативных документов



При анализе безопасности при хранении и обращении с ОЯТ с учетом глубины выгорания необходимо:

- ✓ *Проводить оценку погрешностей методов расчета*
- ✓ *Учитывать погрешности определения обогащения и нуклидного состава ОЯТ и допуски при изготовлении ЯТ*
- ✓ *Проводить оценку неопределенностей получаемых результатов*
- ✓ *Использовать консервативный подход*



Использование глубины выгорания ядерного топлива в качестве параметра ядерной безопасности должно быть обосновано в проекте

Исследование влияния на результаты расчетов особенностей использования различных:

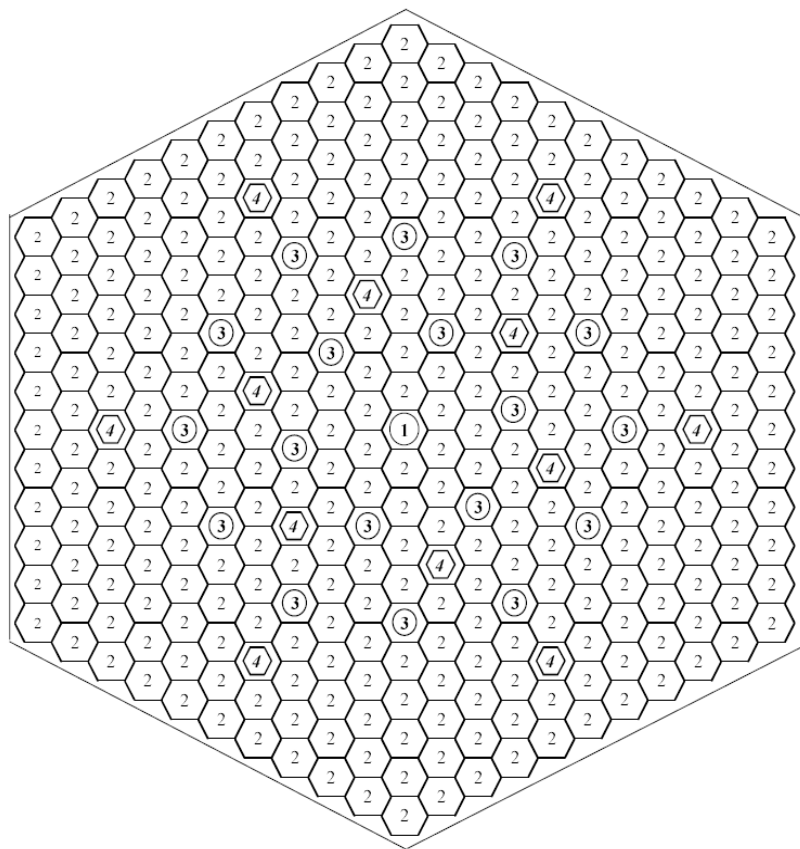
- программных средств*
- библиотек оцененных ядерных данных*
- допущений и приближений при построении расчетных моделей*

Проведение сравнительных расчетов изменения нуклидного состава ядерного топлива в процессе выгорания

Описание расчетного бенчмарк-эксперимента и основные сведения о расчетной модели

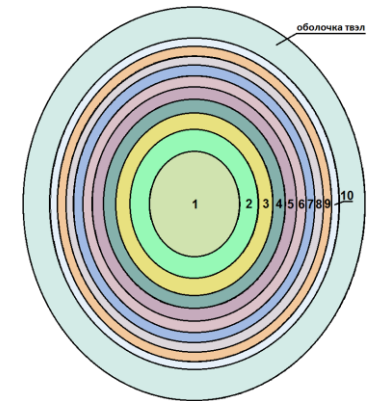
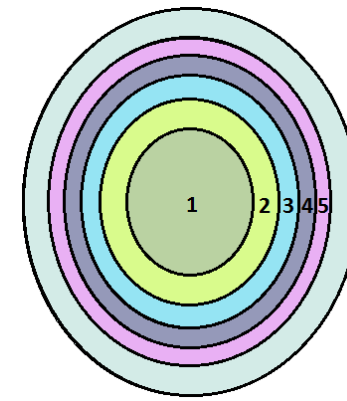
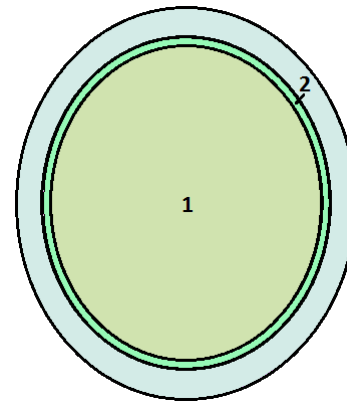
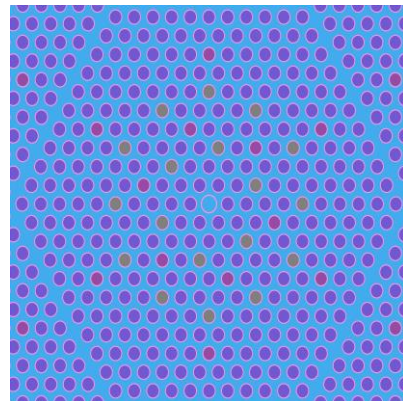
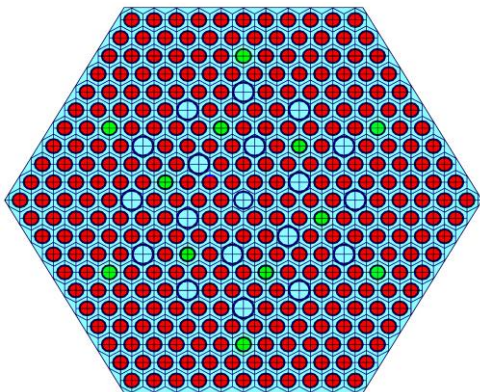


Расчетный бенчмарк-эксперимент «A VVER-1000 LEU and MOX Assembly Computational Benchmark. Specification and Results» (OECD/NEA)



- *ТВС реактора типа ВВЭР-1000*
- *Урановое топливо*
- *Твэлы с обогащением 3,7% по ^{235}U*
- *Твэги с обогащением 3,6% по ^{235}U и с содержанием 4 % масс. Gd_2O_3*
- *Глубина выгорания ЯТ – 40 МВт·сут/тТМ*
- *Условие полного отражения нейтронов на границе модели*

- ➔ Программные средства – *SCALE, SERPENT*
- ➔ Библиотеки оцененных ядерных данных – *ENDF/B-VII.0, JEFF-2.2, JEFF-3.1.1*
- ➔ Функциональные модули ПС *SCALE*, реализующие разные расчетные методы – *KENO* (метод Монте-Карло), *NEWT* (метод дискретных ординат)
- ➔ Радиальное разбиение топливной части твэл на зоны – 2, 5, 10 зон



Учет глубины выгорания при обосновании ядерной безопасности при хранении и обращении с ОЯТ



Документы Комиссии по ядерному регулированию США (NRC)

NUREG/CR-6764 «Burnup Credit PIRT Report»

NUREG/CR-6700 «Nuclide Importance to Criticality Safety, Decay Heating and Source Terms Related to Transport and Interim Storage of High-Burnup LWR Fuel»

NUREG/CR-6701 «Review of Technical Issues Related to Predicting Isotopic Compositions and Source Terms for High-Burnup LWR Fuel»

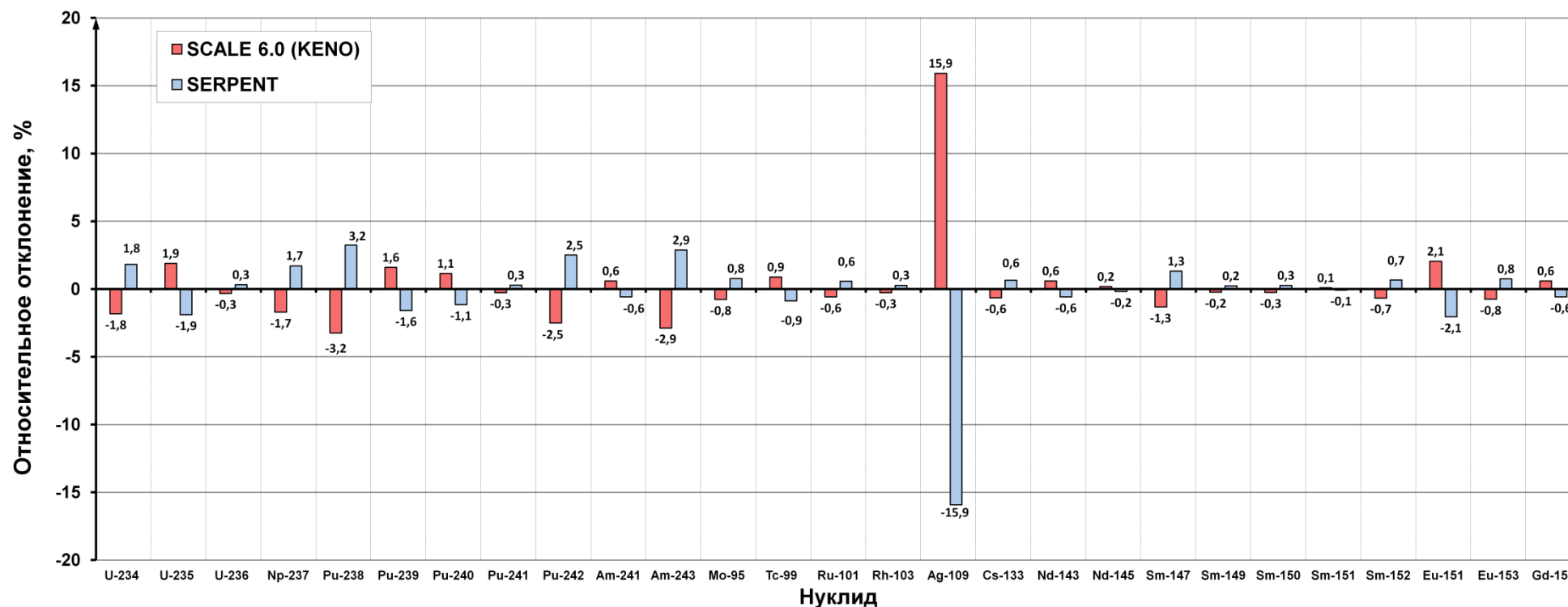
NUREG/CR-6665 «Review and Prioritization of Technical Issues Related to Burnup Credit for LWR Fuel»



Нуклиды, содержание которых в ОЯТ оказывает существенное влияние на величину $K_{эфф}$

Группа	Нуклиды
Актиниды	^{234}U , ^{235}U , ^{236}U , ^{238}U , ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu , ^{242}Pu , ^{241}Am , ^{243}Am , ^{237}Np
Продукты деления	^{95}Mo , ^{99}Tc , ^{101}Ru , ^{103}Rh , ^{109}Ag , ^{133}Cs , ^{143}Nd , ^{145}Nd , ^{147}Sm , ^{149}Sm , ^{150}Sm , ^{151}Sm , ^{151}Eu , ^{152}Sm , ^{153}Eu , ^{155}Gd

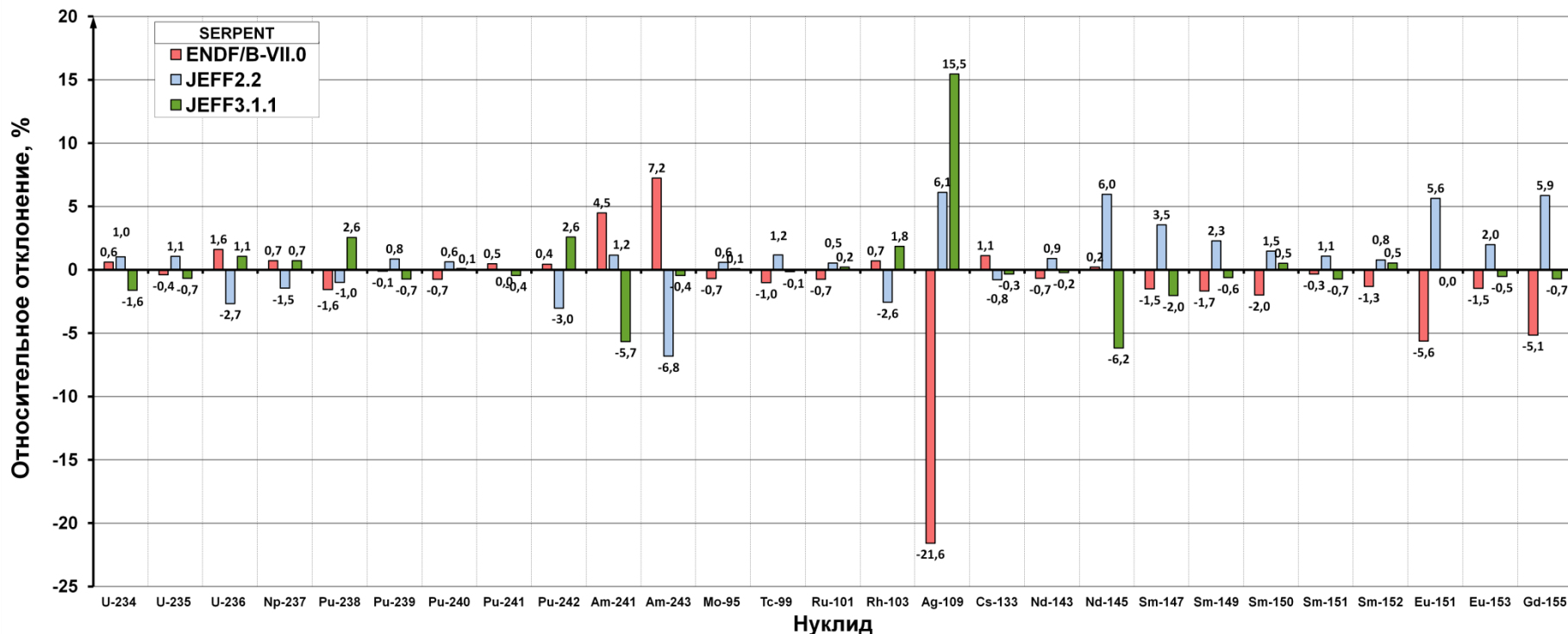
Влияние выбора программных средств



➔ Не смотря на использование одного метода расчета (Монте-Карло), в разных программных средствах могут применяться различные методы улучшения сходимости

➔ Максимальное относительное отклонение концентрации наиболее значимых с точки зрения ядерной безопасности нуклидов может составить 1,9 %

Влияние используемой библиотеки оцененных ядерных данных

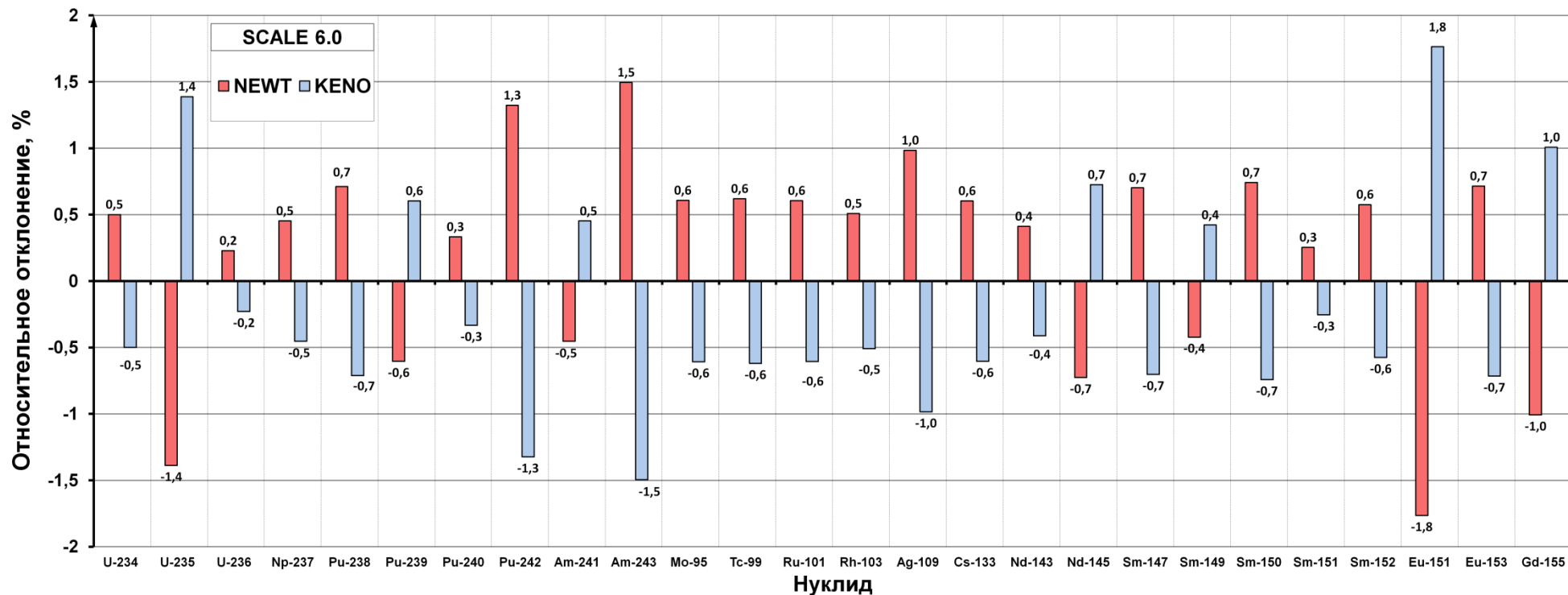


Кумулятивный выход нуклида ¹⁰⁹Ag при делении:

Библиотека	Выход	Погрешность, %
ENDF/B-VII.0	3,12·10 ⁻⁴	~ 60
JEFF2.2	2,60·10 ⁻⁴	< 1
JEFF3.1.1	2,80·10 ⁻⁴	~ 3

➔ Максимальное относительное отклонение концентрации наиболее значимых с точки зрения ядерной безопасности нуклидов может составить 5,9 %

Влияние используемых методов расчета



➔ *Максимальное относительное отклонение концентрации наиболее значимых с точки зрения ядерной безопасности нуклидов может составить 1,4 %*

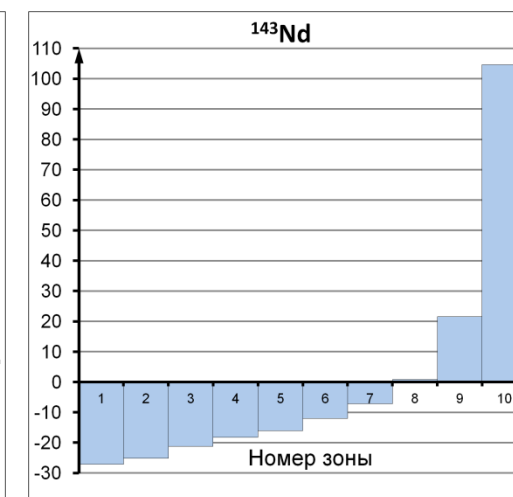
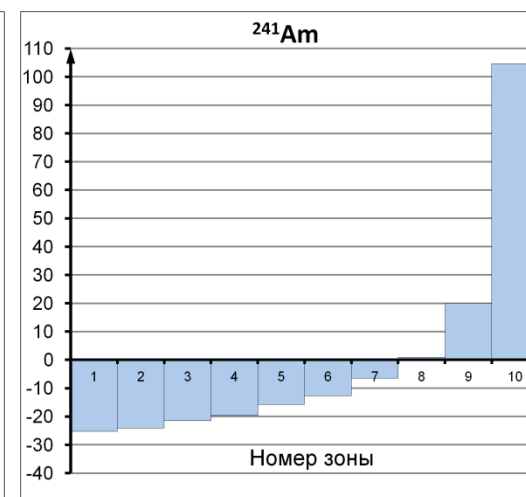
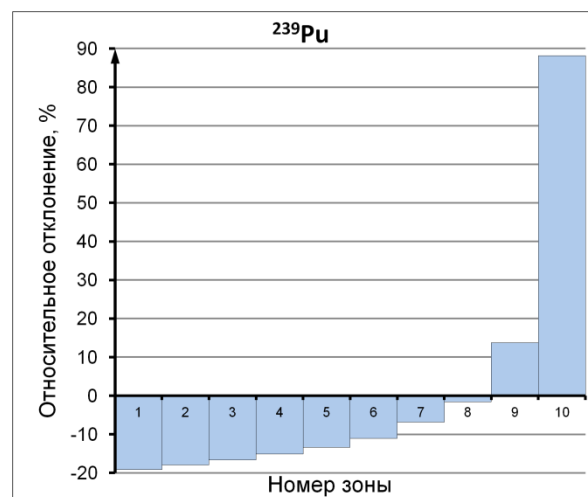
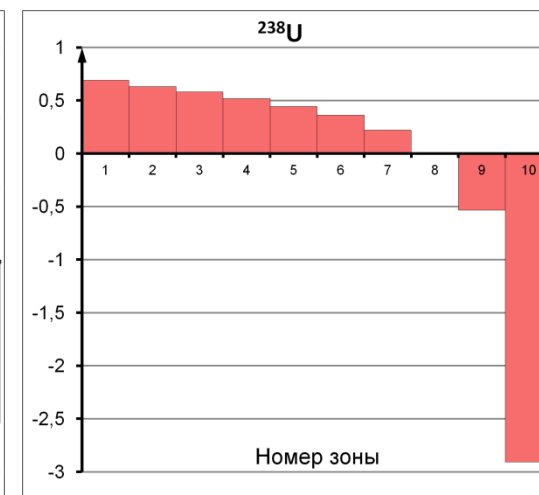
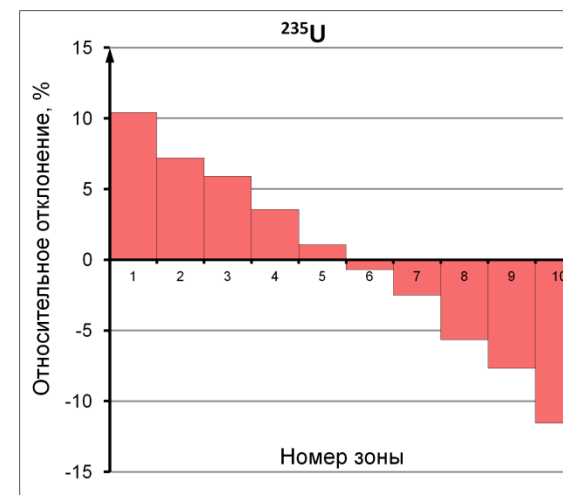
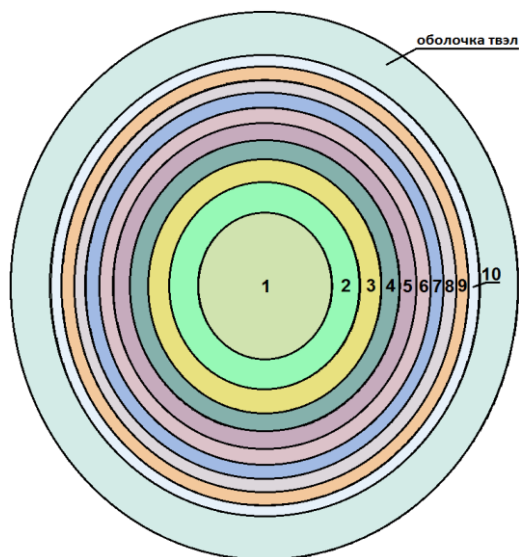
Учет блок-эффекта при построении расчетной модели (1/2)



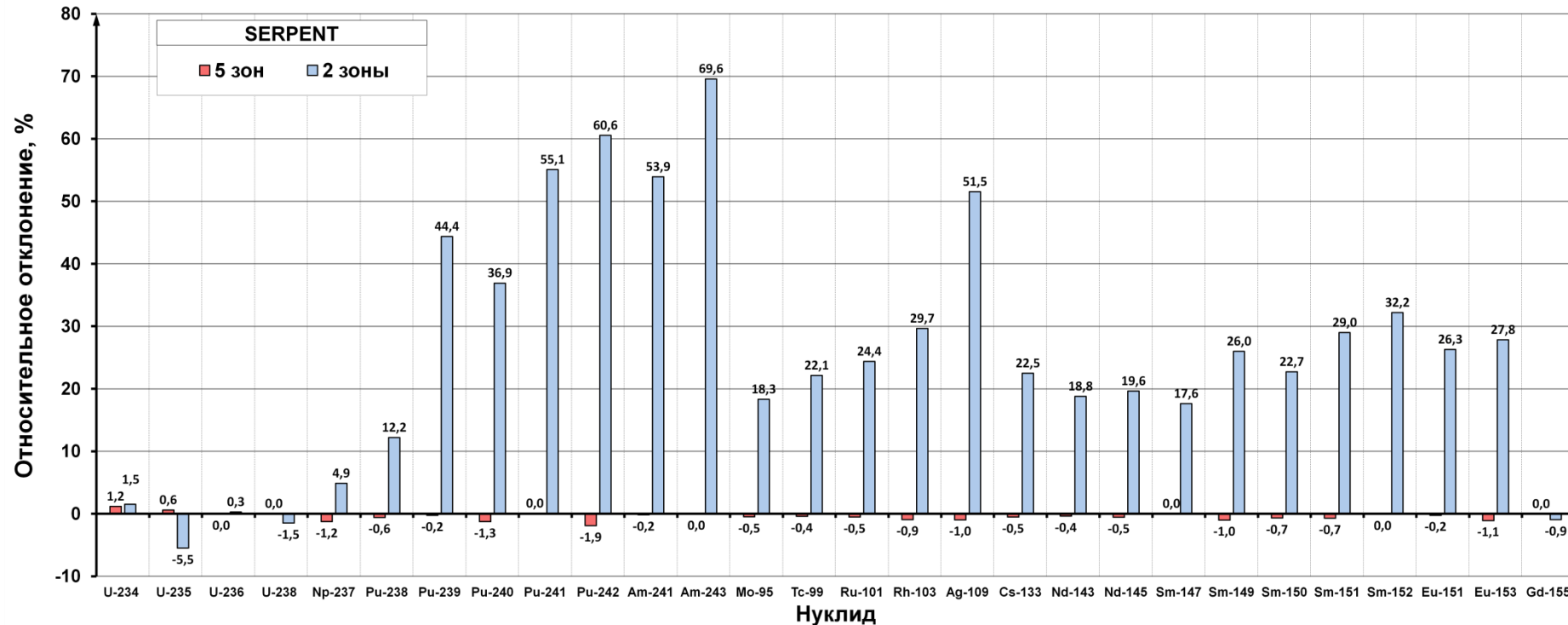
→ Неравномерное распределение плотности потока нейтронов по радиусу твэла

→ Неравномерное выгорание актинидов и накопление продуктов деления

→ Значительная экранировка ядер урана в центральной части твэга



Учет блок-эффекта при построении расчетной модели (2/2)



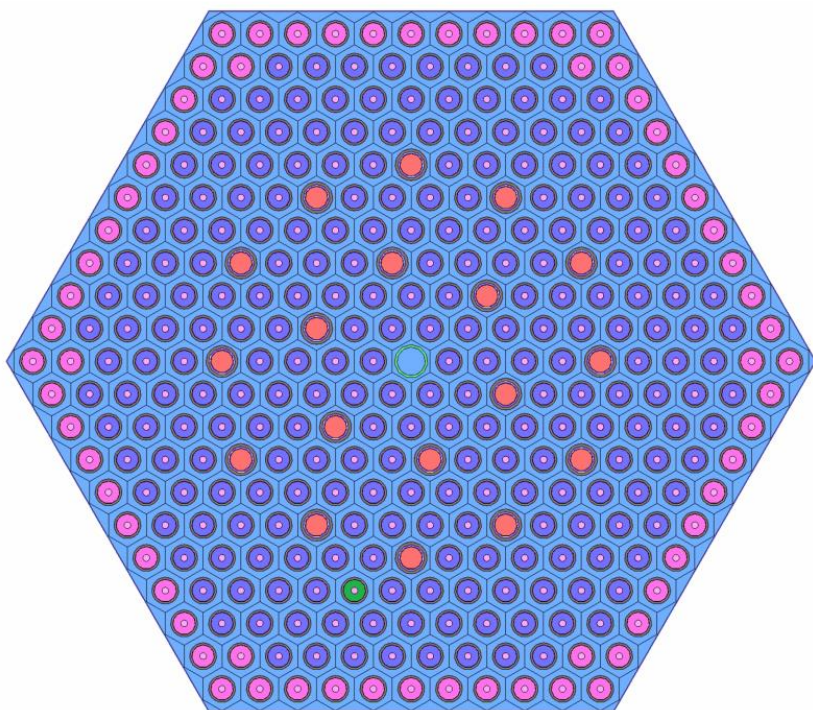
Относительное отклонение концентрации нуклида при расчетах с разбиением топлива на 2 зоны и 5 зон от концентрации нуклида при разбиении топлива на 10 зон

Использование разбиения топливной части твэл на 5 зон существенно повышает:

- *точность результата по сравнению с использованием разбиения на 2 зоны*
- *скорость расчета по сравнению с использованием разбиения на 10 зон*

Описание бенчмарк-эксперимента

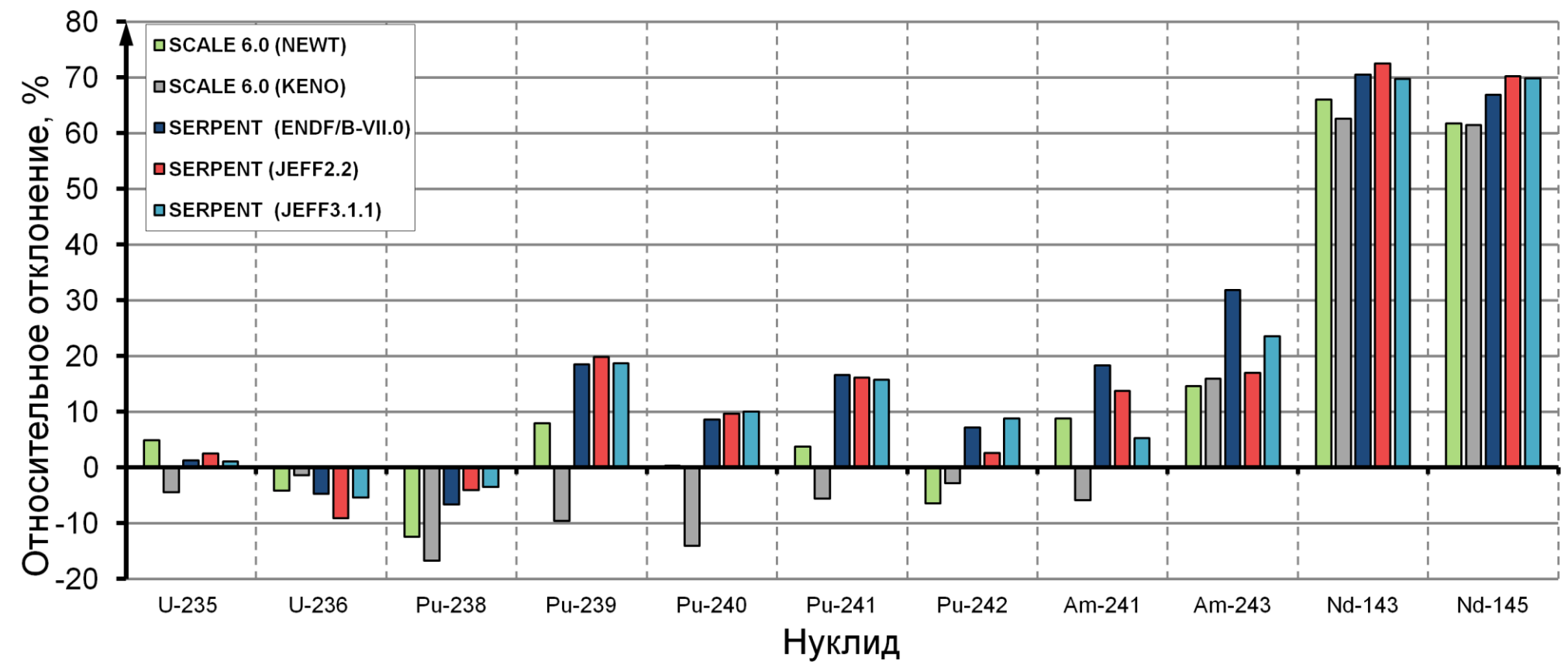
Бенчмарк-эксперимент «Simulation of Low-Enriched Uranium (LEU) Burnup in Russian VVER Reactors with the HELIOS Code Package» содержит результаты послереакторных исследований образцов топлива реактора типа ВВЭР-1000



История облучения исследуемого образца топлива реактора типа ВВЭР-1000 энергоблока № 2 Балаковской АЭС

№ цикла	Работа на мощности, сут	Останов, сут	Глубина выгорания, МВт·сут/тТМ
1	283	189	15,705
2	322	76	31,938
3	359	-	45,267

Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными



Заключение



- ➔ *При проведении обоснования ядерной безопасности с учетом глубины выгорания ядерного топлива необходимо учитывать множество факторов, приводящих к неопределенности определения концентрации нуклидов, в том числе неопределенности, связанные с используемыми для расчетов программными средствами, библиотеками оцененных ядерных данных, расчетными методами и приближениями*
- ➔ *Влияние неопределенностей определения концентрации нуклидов, содержание которых в ОЯТ оказывает существенное влияние на величину $K_{эфф}$, может достигать значимых величин, что приведет к некорректной оценке величины $K_{эфф}$ с учетом содержания данных нуклидов в ОЯТ*
- ➔ *С целью минимизации расхождений результатов расчетов от экспериментально полученных данных при описании бенчмарк-экспериментов важно приводить подробную информацию об образце и истории его облучения, а также данные об используемых методах определения концентрации нуклидов в образце и их погрешностях*
- ➔ *Проведение валидации программ для ЭВМ, используемых для построения расчетных моделей при обосновании ядерной безопасности хранения и обращения с ОЯТ с учетом глубины выгорания, должно основываться на сравнении результатов расчетов с экспериментальными данными*



Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору

Федеральное бюджетное учреждение
«Научно-технический центр по
ядерной и радиационной безопасности»



Спасибо за внимание!