



НИЦ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

КУРЧАТОВСКИЙ КОМПЛЕКС АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Разработка и апробация полномасштабной математической модели транспортного контейнера для анализа радиационной безопасности методом Монте-Карло при перевозке топлива ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200

Авторы: Бикеев А.С., Дайченкова Ю.С., Калугин М.А.,
Олейник Д.С., Шкаровский Д.А.

НИЦ «Курчатовский институт»

Всероссийская научно-техническая конференция «Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики» Госкорпорация «Росатом», АО «ГНЦ РФ-ФЭИ»

27 – 29 ноября 2019 года, Обнинск, Россия

Введение

Современный ТК для ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200:

- способен перевозить 18 отработавших ТВС
- загрузка отработавшего топлива с повышенным обогащением и выгоранием
- возможность транспортировки отработавших ТВС с увеличенной высотой топливного столба
- соответствие современному требованию о запрете использовать жидкую нейтронную защиту



Макет ТК*

*<http://www.atominfo.ru/>

Актуальность работы

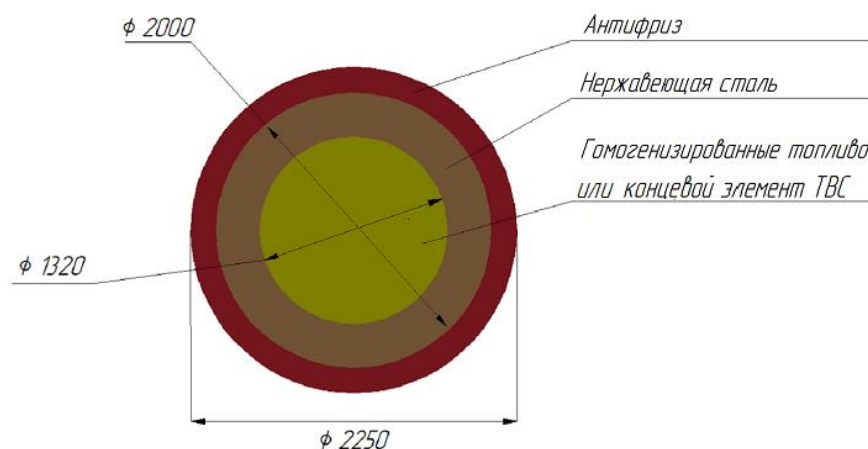
Проведение расчётов в обоснование радиационной безопасности ТУК является неотъемлемой частью получения технического разрешения на перевозку отработавших ТВС. Для проведения анализа в НИЦ «Курчатовский институт» в 2017 году была создана и отлажена двумерная модель ТК. Однако, двумерная модель не позволяет в полной мере учесть все особенности переноса ионизирующего излучения:

1. В двумерной модели ТК используются консервативные приближения, которые заведомо приводят к переоценке мощности эквивалентной дозы.
2. Двумерная модель ТК не позволяет учесть вклад в мощность эквивалентной дозы от источников в хвостовике и головке ТВС.

Программа MCSU-PD

- Аналоговые и весовые методы Монте-Карло
- Однородные и неоднородные уравнения переноса
- Уравнения переноса:
 - нейтронов
 - фотонов
 - заряженных частиц
- Трёхмерные системы практически любой сложности
- Подключаемый программный модуль учёта изменения изотопного состава материалов в рассматриваемой системе (выгорание)
- Вычисления на многопроцессорных системах
- Детальное (поточечное) описание законов взаимодействия элементарных частиц с веществом

Оценка вклада в мощность эквивалентной дозы источников ионизирующего излучения



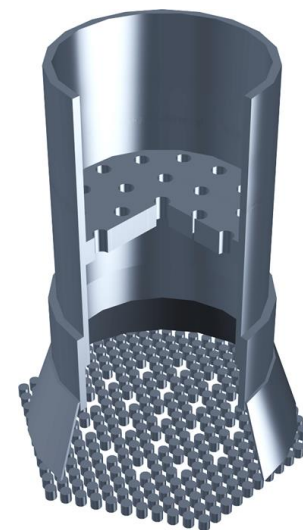
Параметр моделирования	Значение параметра
Вместимость контейнера, ТВС	12
Глубина выгорания топлива, МВт·сут/кгТМ	60
Время выдержки отработавших ТВС, лет	10

Мощность эквивалентной дозы от источников в топливе, мЗв/час	Мощность эквивалентной дозы от источников в хвостовике ТВС, мЗв/час	Мощность эквивалентной дозы от источников в головке ТВС, мЗв/час
0,35	0,12	0,004

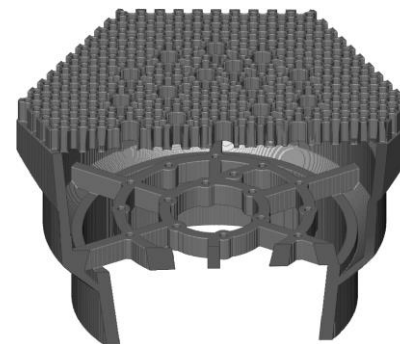
Разработка 3D модели ТВС



Трёхмерное изображение
разработанной модели ТВС

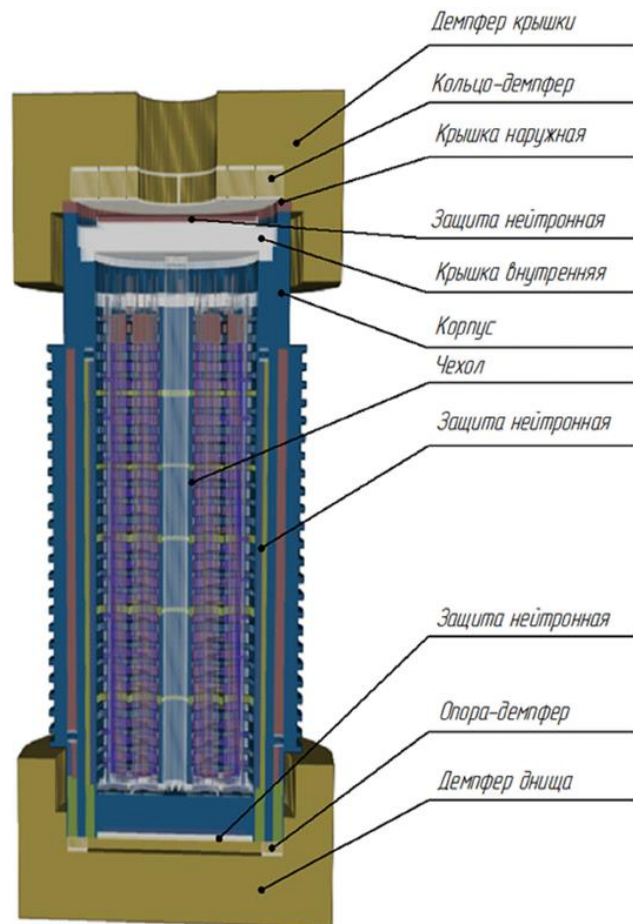


Модель головки ТВС

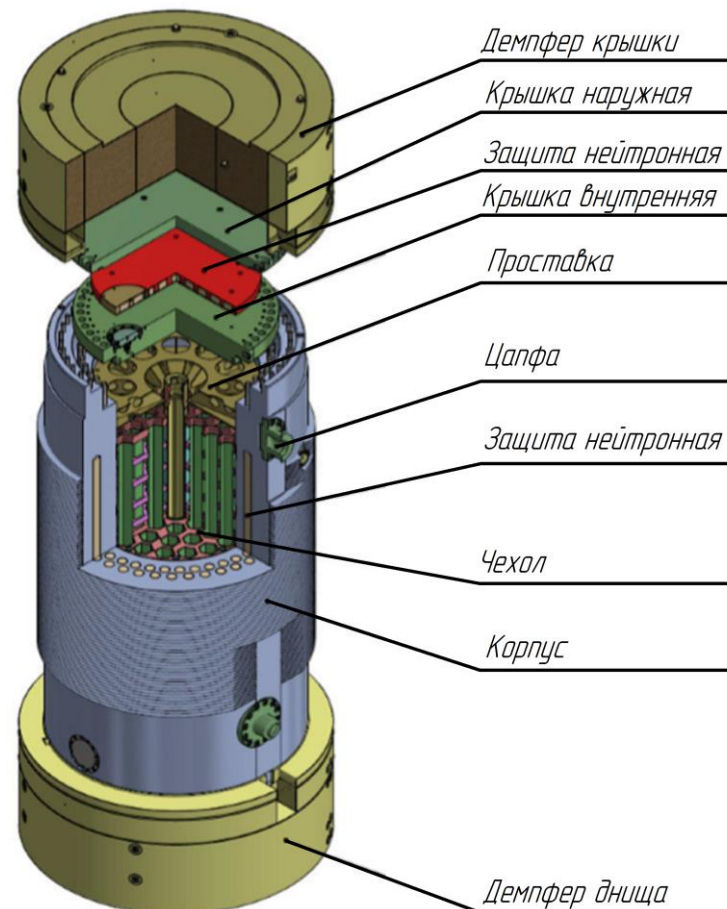


Модель хвостовика ТВС

Разработка 3D модели ТК



Трёхмерное изображение
разработанной модели ТК



Изображение ТК в журнале «Атомный эксперт»*

*Атомный эксперт: информационно-аналитическое издание, приложение к научному журналу «Атомная энергия» / и.о. гл. ред. Ю.А. Гилева, 2017, вып. 9(60), с. 10.

Тестирование модели ТК

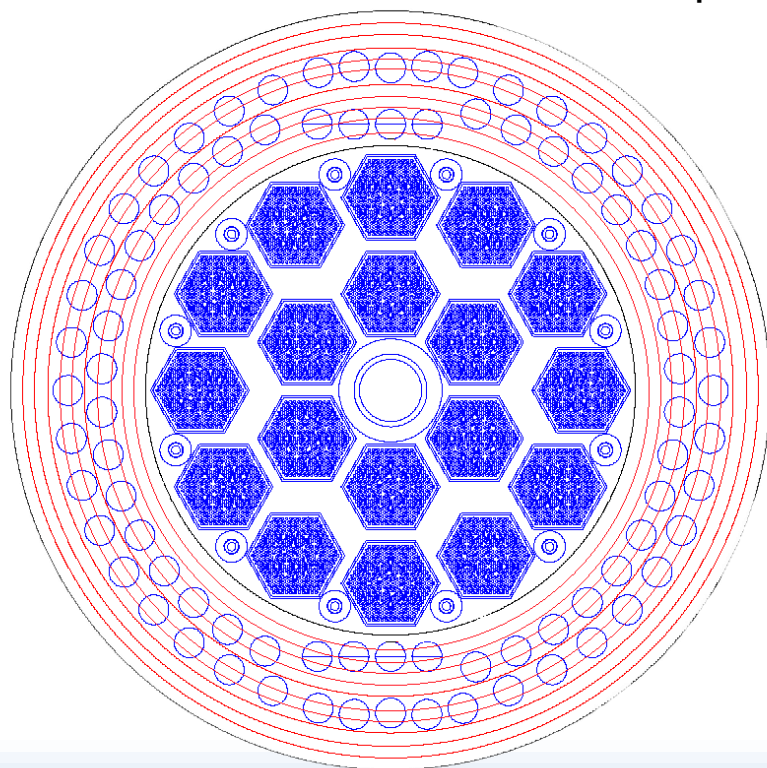
Для разработанной модели транспортного контейнера получено решение уравнения переноса нейтронов при следующих исходных данных:

- источник, равномерно распределённый по объёму модели;
- граничные условия – зеркальное отражение на внешних гранях;
- проведено моделирование 4 млн нейтронных историй.

В процессе моделирования не было обнаружено ни одной геометрической точки, одновременно принадлежащей нескольким геометрическим зонам либо точки, не входящей ни в одну из заданных пользователем геометрических зон.

Определение параметров неаналогового моделирования

В работе применялся **метод весового окна**. Метод позволяет использовать независимое разбиение на поверхности расщепления без вмешательства в описание геометрии рассматриваемой системы.



Расчёт ценностей поверхностей расщепления с использованием метода простых итераций:

$$V_i = \left\| \frac{\dot{E}_1}{\dot{E}_i} \right\|$$

Апробация модели ТК

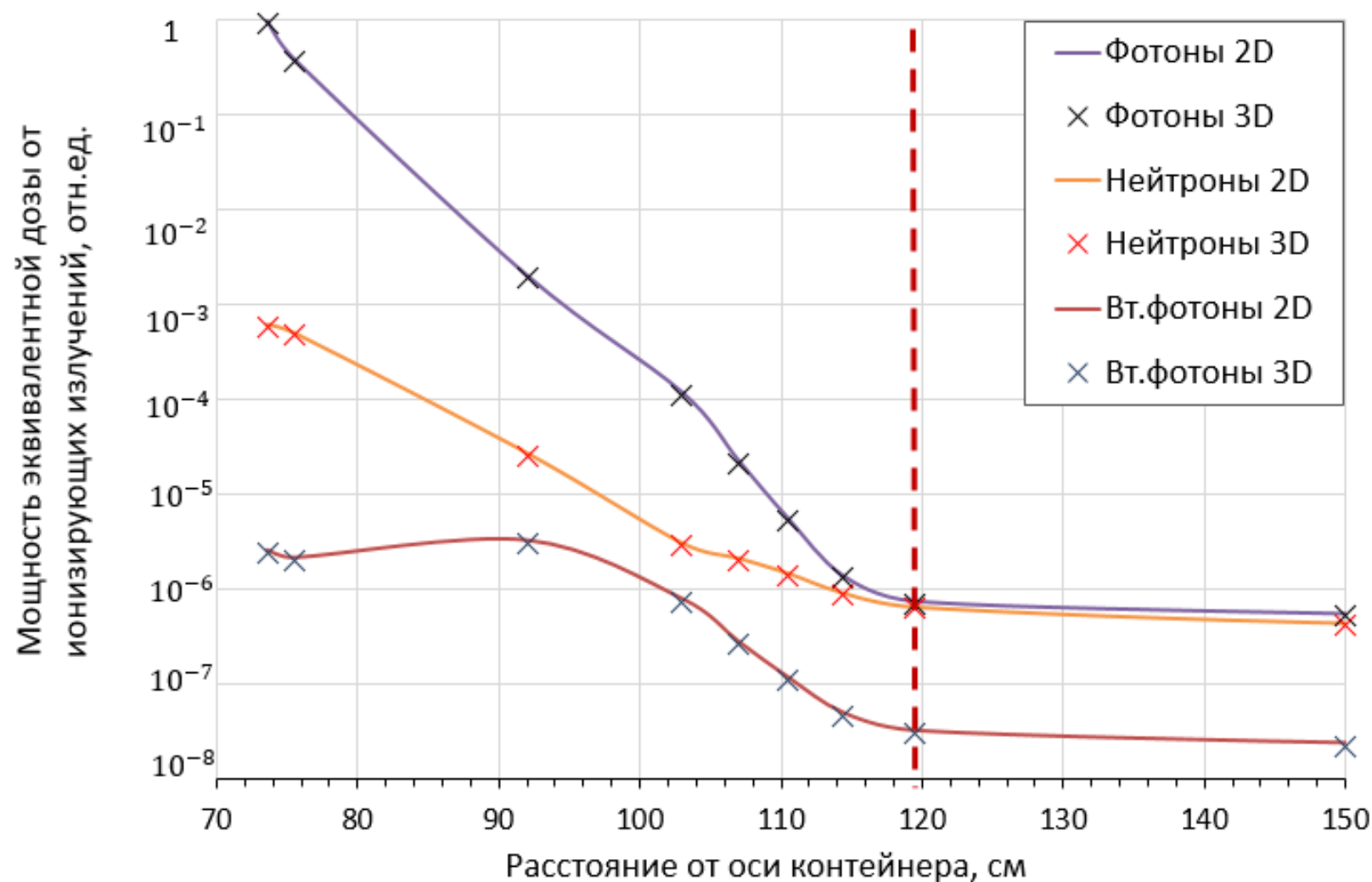
Проведено два расчёта:

1. Мощность эквивалентной дозы $\dot{E}$ в зависимости от расстояния от оси контейнера.
2. Азимутальное распределение мощности эквивалентной дозы $\dot{E}$ на поверхности ТУК.

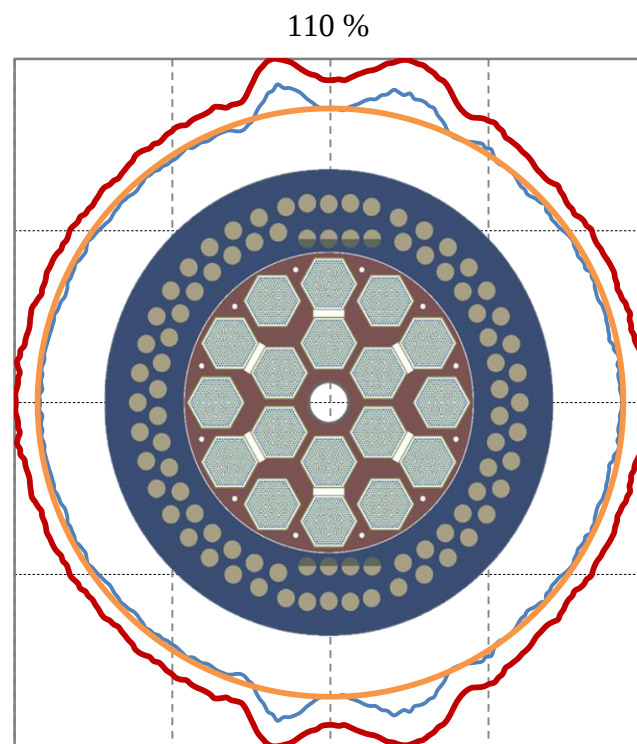
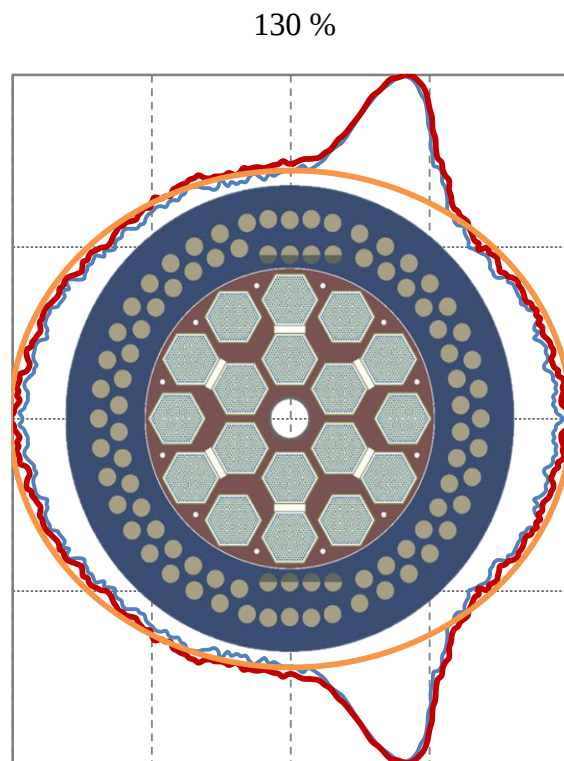
Для перевода плотности потока нейтронного и фотонного излучения в мощность эквивалентной дозы использовались переводные коэффициенты из НРБ-99/2009 (СанПиН 2.6.1.2523-09) для изотропного поля излучения.

Параметр ОТВС	Значение параметра
Среднее начальное обогащение, % вес. по ^{235}U	4,4
Глубина выгорания топлива, МВт·сут/кгТМ	68
Время выдержки ОТВС, лет	6

Апробация модели ТК



Апробация модели ТК



130 %

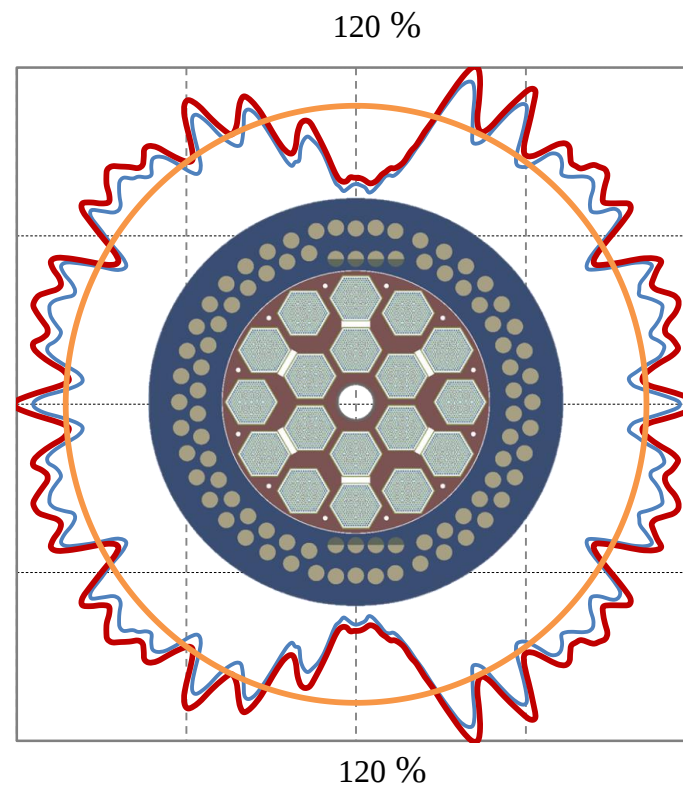
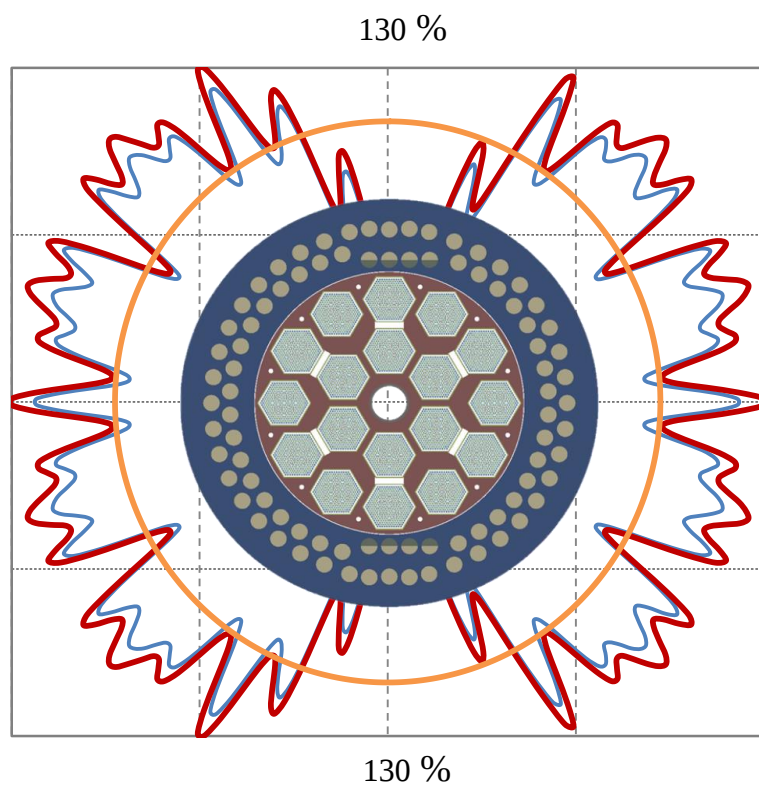
110 %

— 3D модель — 2D модель — Среднее значение

Азимутальное распределение $\dot{E}$ от нейтронного излучения на поверхности ТК

Азимутальное распределение $\dot{E}$ от вторичного фотонного излучения на поверхности ТК

Апробация модели ТК



— 3D модель — 2D модель — Среднее значение

Азимутальное распределение $\dot{E}$ от первичного фотонного излучения на поверхности ТК

Азимутальное распределение суммарной $\dot{E}$ на поверхности ТК

Заключение

1. Проведена оценка вклада источников ионизирующего излучения в топливе и в концевых элементах ТВС в МЭД на поверхности ТК. Показано, что образующиеся при бета-распаде ^{60}Co в концевых элементах ТВС высокоэнергетические фотоны могут внести существенный вклад в значение МЭД на поверхности ТК.
2. Разработана трёхмерная математическая модель транспортного контейнера нового поколения для оценки радиационной безопасности с использованием программы MCU-PD.
3. Определены оптимальные параметры неаналогового моделирования.
4. Проведено тестирование и апробация разработанной математической модели ТК нового поколения.

**Спасибо
за внимание!**



Метод «весовое окно»

Метод «весового окна» состоит в использовании расщепления или рулетки по отношению к рассматриваемой частице в случаях, если её вес w выходит за пределы интервала $[w_{min}(y), w_{max}(y)]$. Данная процедура выполняется транспортным модулем программы MCU. В результате применения весового окна должно выполняться условие:

$$w \in [w_{min}(y), w_{max}(y)]$$

где y – компонента фазового пространства.

Если вес частицы w при срабатывании алгоритма лежит в интервале $w_{min}(y) \leq w(y) \leq w_{max}(y)$, то ни расщеплений, ни рулетки не производится.

Если $w(y) > w_{max}(y)$, то производится расщепление с корректировкой веса в рамках весового окна.

Если $w(y) < w_{min}(y)$, то разыгрывается уничтожение частицы или увеличение веса до числа в рамках весового окна.