



ФЭИ
РОСАТОМ

Ускорение расчёта методом Монте-Карло спектральных характеристик излучения в экспериментальных каналах исследовательского реактора

Докладчик: Мокшанов Никита Андреевич
м.н.с., АО «ГНЦ РФ-ФЭИ»

МБИР – Многоцелевой Быстрый Исследовательский Реактор.



Основные технические характеристики:

- Тепловая мощность – **150 МВт**
- Максимальная плотность потока нейтронов – **$5,3 \times 10^{15} \frac{\text{нейт}}{\text{см}^2 \times \text{с}}$**

Источник: www.mbir-rosatom.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ



Медико-биологические исследования с использованием излучений реактора.



Материаловедческие исследования.



Испытание технологий замыкания ядерного топливного цикла. Дожигание минорных актиноидов, многократный рециклинг.



Тестирование нового оборудования и проектных решений. Обоснование надежности ресурса и работоспособности.



Исследования в области безопасности. Моделирование сложных многофакторных процессов.



Конструкционные материалы. Испытания дисперсно-упрочненных материалов, ферритно-мартенситных и аустенитных сталей.



Производство изотопов Mo-99, Co-60, Gd-153, Sr-85;89, I-125;131, Xe-127.



Тестирование топлива и топливных элементов. Различные керамические и металлические композиции.



Фундаментальные и прикладные исследования, в том числе с использованием ультрахолодных нейтронов.



Исследования в петлях с разными теплоносителями He, Na, Pb / Pb-Bi.

Медицина:

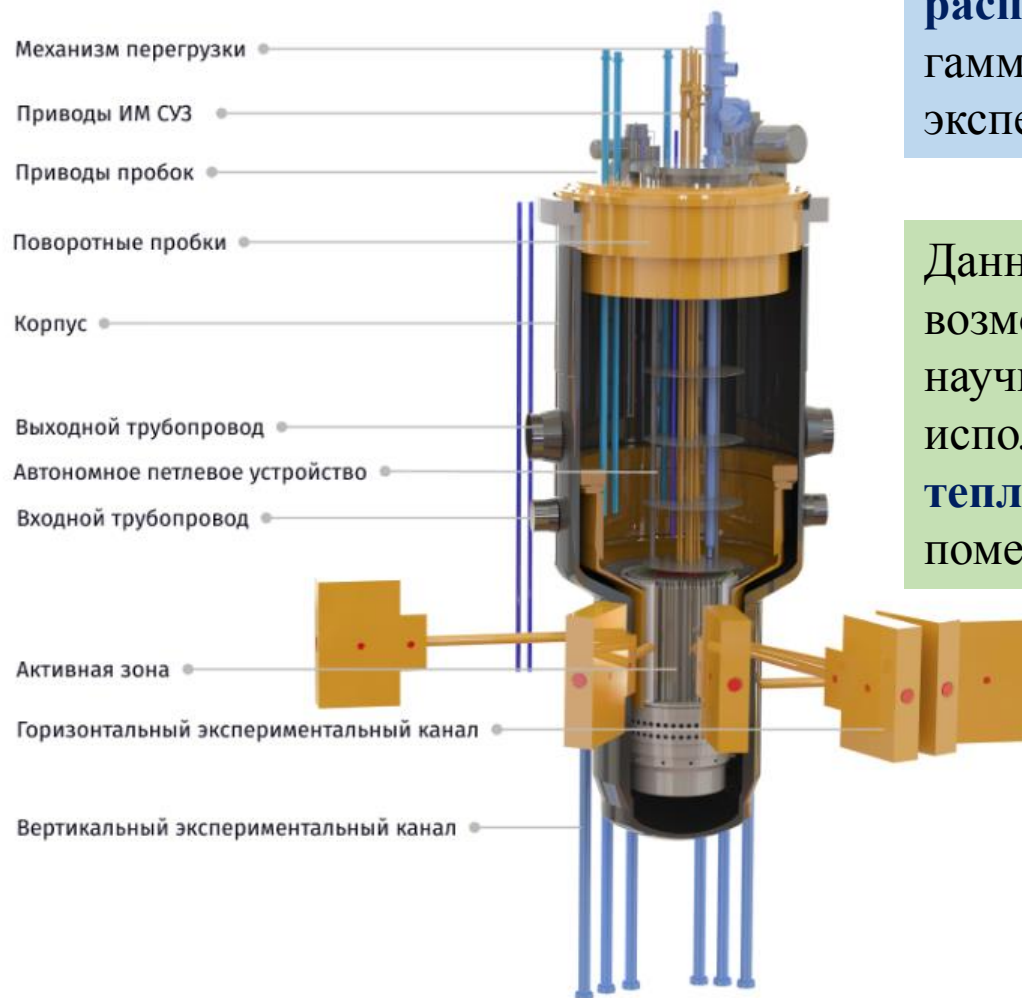
- Нейтронозахватная терапия
- Терапия быстрыми нейтронами

Нейтронно-радиографические исследования (НРИ):

Предназначены для получения методом неразрушающего контроля визуальных изображений внутренних структур с высоким разрешением

Наработка технических и медицинских изотопов в горизонтальных каналах (ГЭК)

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ



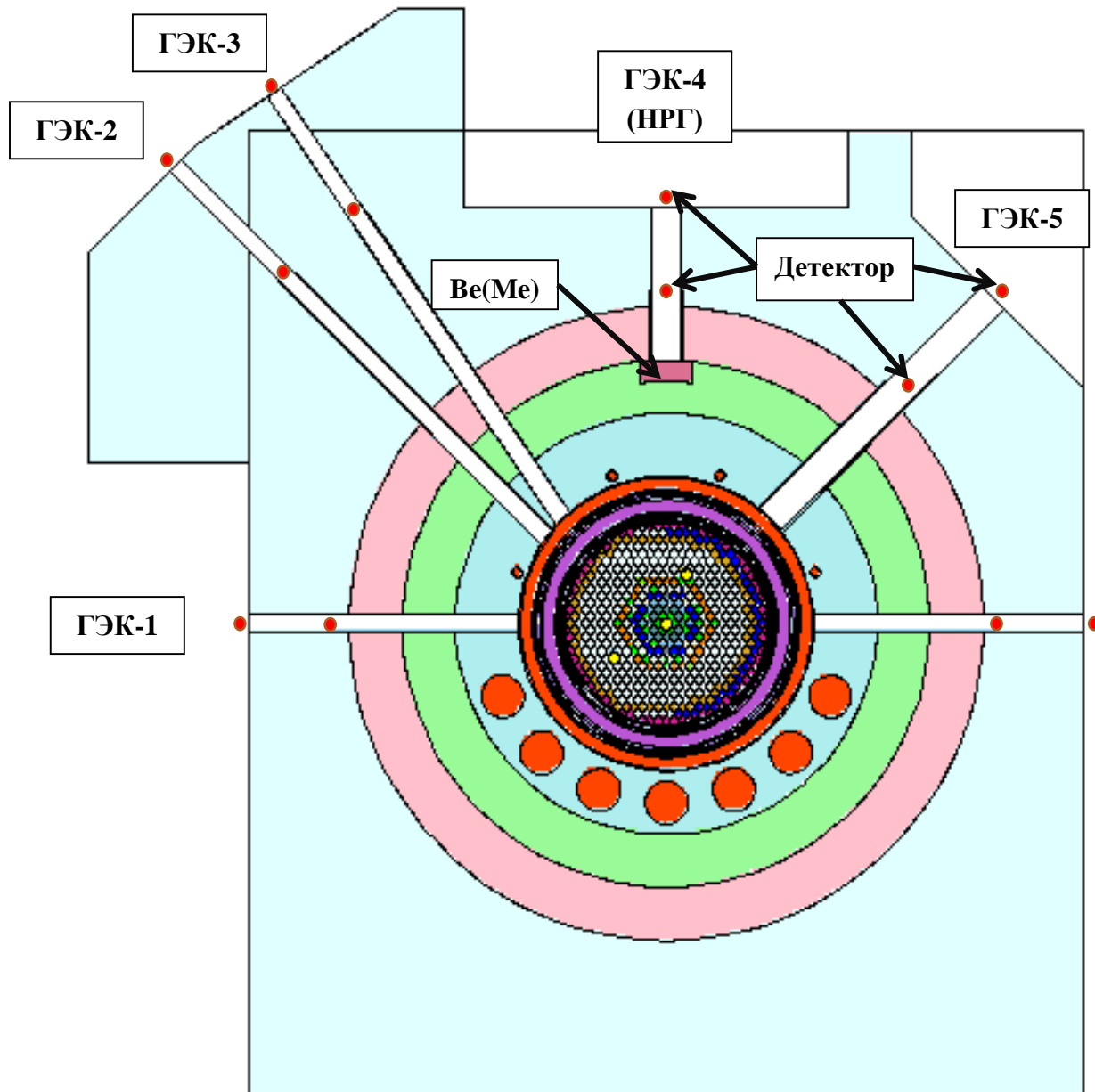
Рассчитать энергетическое распределение потока нейтронов и гамма-квантов в горизонтальных экспериментальных каналах (ГЭК).

Данные необходимы для обоснования возможности проведения специальных научных исследований с использованием **быстрых** или **тепловых** (в этом случае в канал помещается **замедлитель**) нейтронов.

Условия расчёта:

- Количество энергетических групп нейтронов – 300
- Подробная геометрия биологической защиты

Сечение а.з. МБИР



В тепловой защите расположены **6 радиальных ГЭК**:

- ГЭК № 1, 2, 3, 5 – заглушены пробкой.
- ГЭК №4 – нейтронная радиография (НРГ).
- ГЭК №6 – канал для нейтронно-активационного анализа (НАА).

ГЭК-6
(НАА)

Горизонтальные экспериментальные каналы начинаются сразу за корпусом активной зоны и проходят сквозь тепловую и биологическую защиту. При этом их диаметр составляет десятки сантиметров, а длина – несколько метров.

Методы понижения дисперсии

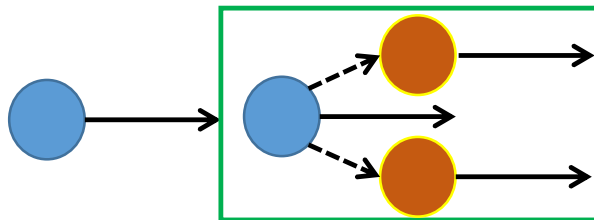
Задача расчёта спектральных характеристик излучения в ГЭК является задачей глубокого прохождения частиц. При степенях ослабления потока выше **7-10 порядков** набор достаточной статистики **прямым моделированием** переноса методом Монте-Карло оказывается практически **невозможным**.



Метод контроля популяции частиц – метод рулетки и расщепления.

Ценная область:

Расщепление частицы на n независимых частиц с весом $1/n$



Малоценная область:

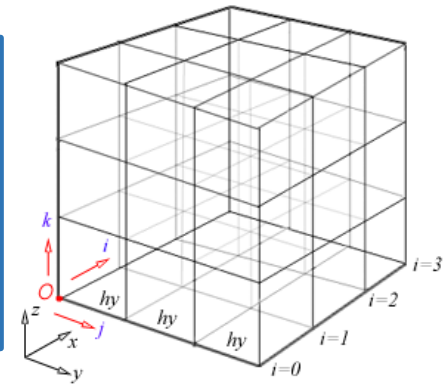
Русская рулетка – гибель частицы с вероятностью p , вес уцелевших частиц увеличивается



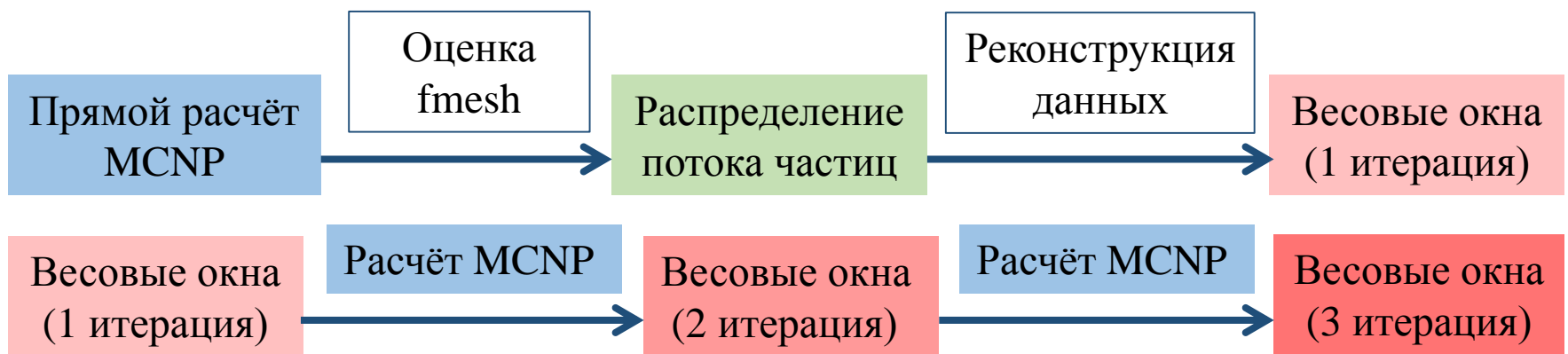
Программа MSMeshmod 1.0*

Весовые окна – метод расщепления и Русской рулетки имеющий пространственную и энергетическую зависимость. На геометрическую часть фазового пространства накладывается дополнительная сетка.

Весовые границы определяют окно допустимых весов частицы. Если вес частицы ниже нижней границы, разыгрывается русская рулетка, если вес частицы выше весовой границы окна, она расщепляется так, что все расщепленные частицы находятся внутри весового окна.



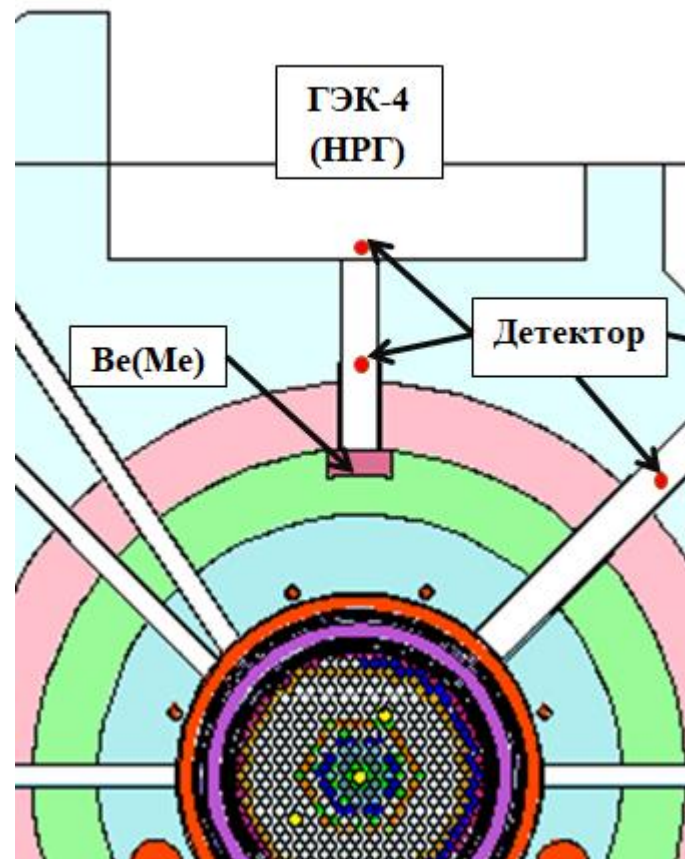
MAGIC (Method of Automatic Generation of Importances by Calculation) - итерационный метод автоматического генерирования весовых окон.



Результаты расчёта спектра нейтронов в ГЭК-4 с использованием весовых окон

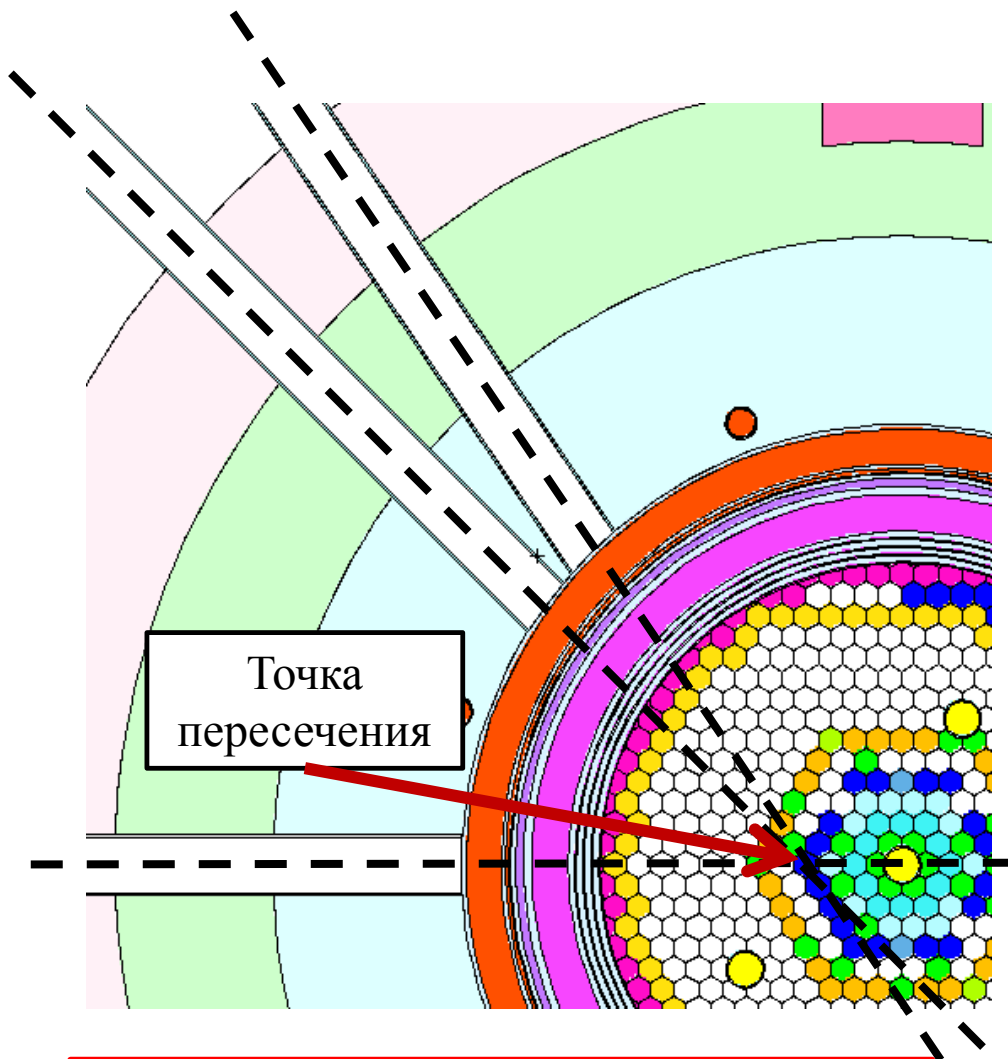
Таблица 1. Статистическая ошибка при локальной оценке нейтронного потока

№ группы	E_{\max}	Прямой	ОКНА
1	1,00E-10	0,00	0,72
2	1,00E-09	0,76	0,11
3	2,15E-09	1,00	0,08
4	3,16E-09	0,99	0,07
5	4,64E-09	0,74	0,07
6	6,81E-09	0,70	0,07
7	1,00E-08	0,91	0,07
8	1,21E-08	0,85	0,09
9	1,47E-08	0,60	0,07
10	1,78E-08	0,88	0,06
11	2,15E-08	0,79	0,06
12	2,61E-08	0,66	0,05
13	3,16E-08	0,93	0,05
14	3,83E-08	0,59	0,04
15	4,64E-08	0,43	0,04
16	5,62E-08	0,47	0,04
17	6,81E-08	0,40	0,04
18	8,25E-08	0,55	0,04
19	1,00E-07	0,38	0,04
20	1,14E-07	0,34	0,04



Время расчёта в обоих случаях – 150 000 мин.

Результаты расчёта спектра нейтронов в ГЭК-2 и ГЭК-3

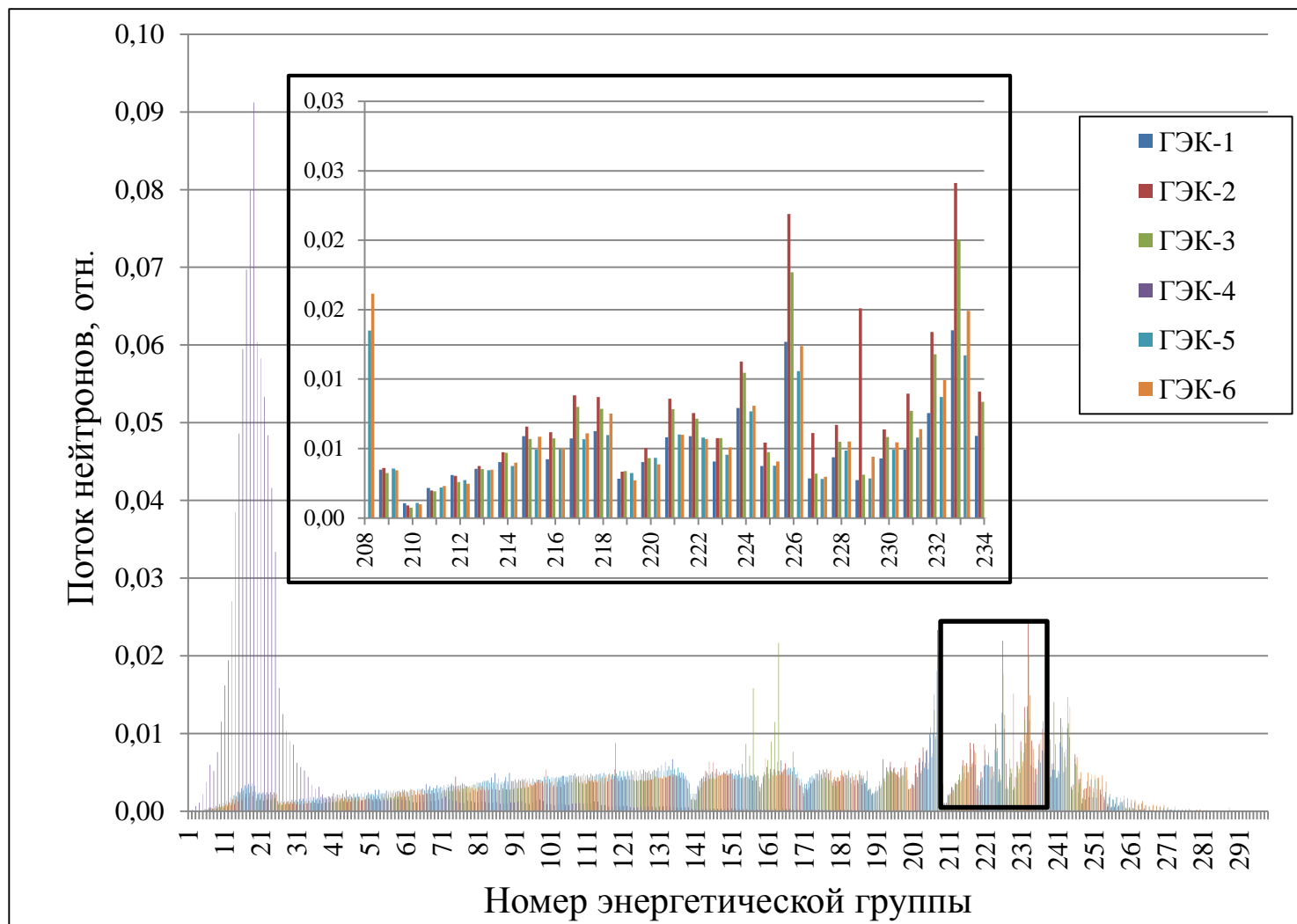


Из-за смещения оси ГЭК-2 и ГЭК-3 относительно центра а.з. сходимость значительно ухудшается.

Таблица 2. Статистическая ошибка при локальной оценке нейтронного потока

№	E_{\max}	ГЭК-1	ГЭК-2	ГЭК-3
1	1,00E-07	0,08	0,18	0,26
2	1,14E-07	0,07	0,16	0,26
3	1,29E-07	0,06	0,16	0,23
4	1,47E-07	0,07	0,16	0,23
5	1,67E-07	0,07	0,16	0,22
6	1,90E-07	0,06	0,17	0,23
7	2,15E-07	0,06	0,14	0,22
8	2,30E-07	0,06	0,14	0,20
9	2,45E-07	0,06	0,17	0,21
10	2,61E-07	0,06	0,15	0,20
11	2,78E-07	0,07	0,13	0,21
12	2,97E-07	0,07	0,13	0,21
13	3,16E-07	0,06	0,14	0,20
14	3,37E-07	0,07	0,15	0,20
15	3,59E-07	0,08	0,14	0,21
16	3,83E-07	0,08	0,16	0,18
17	4,08E-07	0,09	0,14	0,19
18	4,35E-07	0,09	0,12	0,19
19	4,64E-07	0,06	0,13	0,18

Нормированный спектр нейтронов



№ ГЭК	1	2	3	4	5	6
$n/(cm^2 \times c)$	4,48E+10	5,81E+09	6,43E+09	3,33E+08	2,75E+11	6,69E+10
$\gamma/(cm^2 \times c)$	9,42E+09	1,02E+09	1,23E+09	8,02E+08	5,87E+10	1,46E+10

Проведён расчёт спектра нейтронов и гамма-квантов в многогрупповом приближении в горизонтальных экспериментальных каналах.

Для ускорения сходимости результатов использованы весовые окна, которые в автоматическом режиме генерируются программой MSMeshmod 1.0.

Потоки нейтронов лежат в интервале от 10^8 до 10^{11} н/(см² × с).
Потоки гамма-квантов лежат в интервале от 10^9 до 10^{11} γ/(см² × с).

Результаты будут использованы при обосновании исследований в области медицины (нейтрон захватная терапия), в области материаловедения (НАА, НРГ), а также для производства изотопов.

Спасибо за внимание

Докладчик: Мокшанов Никита Андреевич
м.н.с., АО «ГНЦ РФ-ФЭИ»