



Дипломная работа на тему:

# **ИЗМЕРЕНИЕ ПРОФИЛЯ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ ИЗВЛЕЧЁННОЙ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕЙ СБОРКИ МЕТОДОМ ГАММА-СКАНИРОВАНИЯ**

Группа: Б22-104

Студентка: Кангина Ю.А.

Научный руководитель: Кумпан А.В.

Научный консультант: Шашков Е.С.



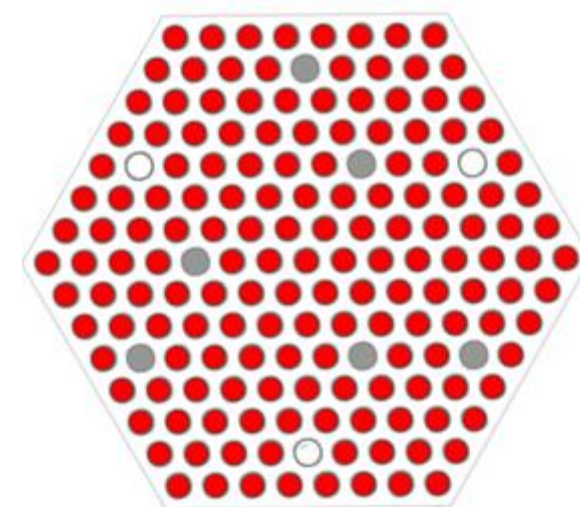
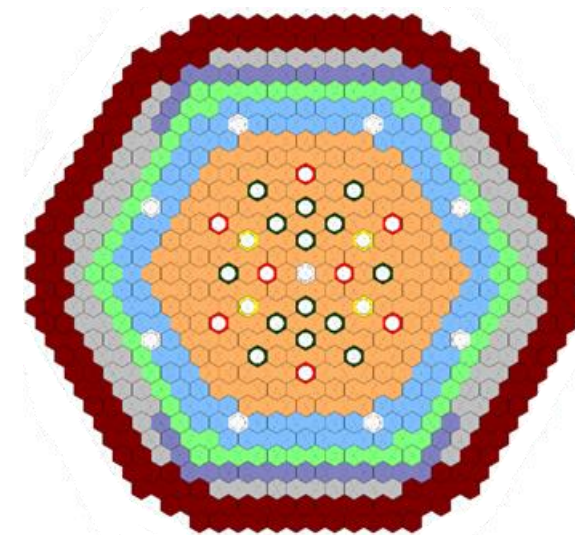
# РЕАКТОР БР-1200 И БРЕСТ-ОД-300

1. Перспективное направление в ядерной энергетике — реакторы на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем, работающие по замкнутому топливному циклу.
2. В реакторе происходит преобразование U-238 в Pu-239, который делится до U-238, замыкая цикл.
3. Для апробации технологии построен реактор БРЕСТ-ОД-300 мощностью 300 МВт.
4. На его основе разрабатывается коммерческий реактор БР-1200 (электрическая мощность — 1260 МВт, тепловая — 2930 МВт).
5. БР-1200 наследует большинство решений БРЕСТ-ОД-300, но отличается радиальным делением активной зоны на подзоны из-за больших размеров активной зоны.



# АКТИВНАЯ ЗОНА БР-1200

1. Конструкция активной зоны реактора на быстрых нейтронах, её геометрия и состав должны обеспечивать полное воспроизводство плутония и безопасность при внештатных ситуациях.
2. Активная зона реактора БР-1200 включает 703 шестигранные ячейки, которые представляют собой ТВС, блоки отражателя и радиационной защиты.
3. Для выравнивания потока нейтронов и распределения мощности, топливные ячейки разделены на четыре радиальные подзоны:
  - 1) Центральная зона (ЦЗ) включает в себя 186 ТВС;
  - 2) Средняя зона (СЗ) — 113 ячейки;
  - 3) Периферийная зона (ПЗ) — 72 ячейки;
  - 4) По периметру 306 блоков, выполняющих функцию блоков отражателя и защиты;
  - 5) 26 ТВС с РО СУЗ.

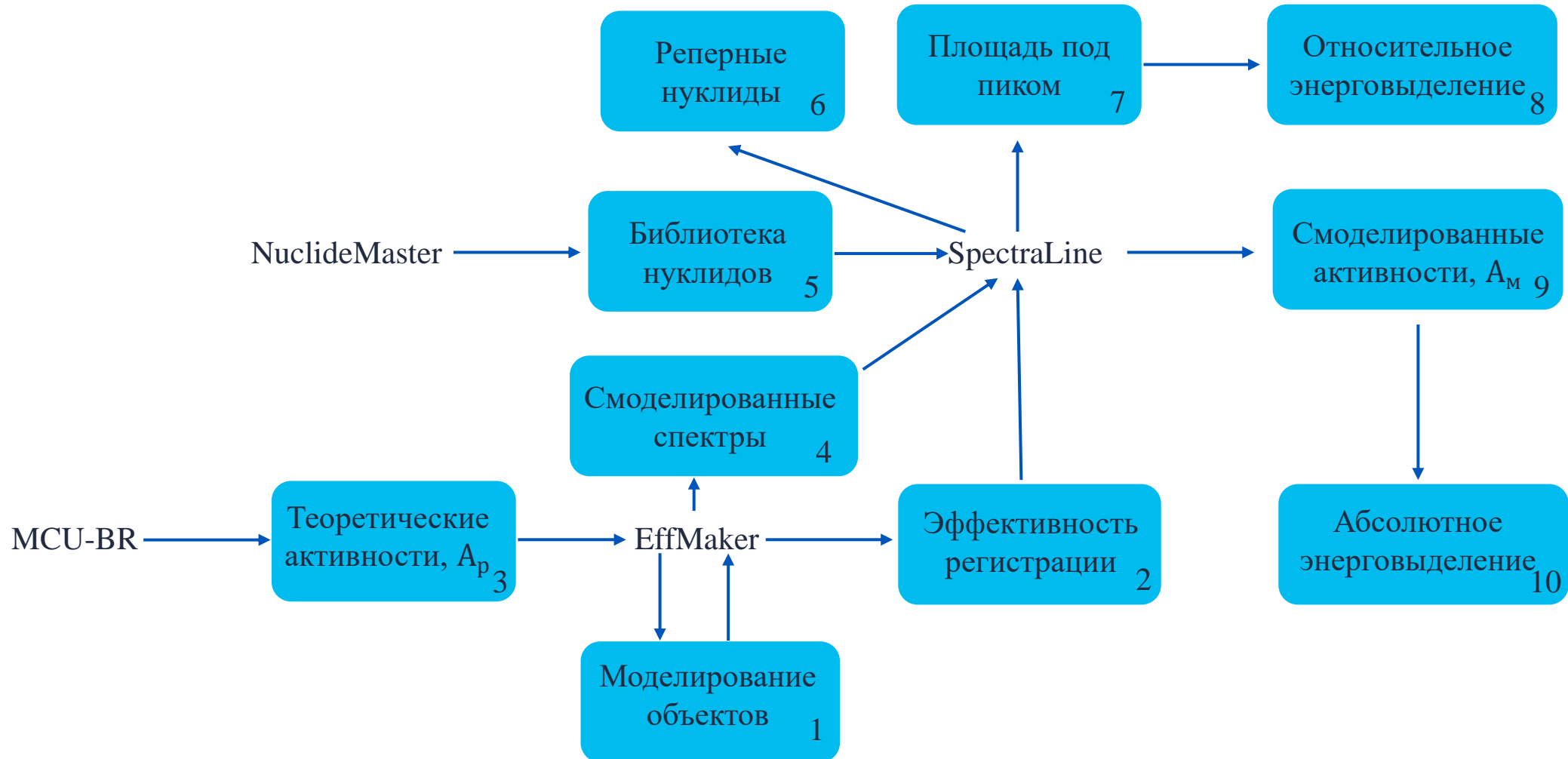


**Целью данной работы является теоретическое и расчётное обоснование энерговыделения от тепловыделяющей сборки (ТВС) в перспективном реакторе БР-1200, которое позволит более точно рассчитать эффективности и спрогнозировать энерговыделение.**

Актуальность данной работы обусловлена необходимостью обоснования проектных решений, в которых точность расчетно-экспериментального определения энерговыделения в ТВС напрямую влияет на достоверность оценок запасов топлива до пределов безопасной эксплуатации и экологическую безопасность ядерного реактора.

Объектами исследования являются тепловыделяющие сборки (ТВС) центральной (ЦЗ), средней (СЗ) и периферических подзон (ПЗ) перспективного реактора на быстрых нейтронах БР-1200 со свинцовым теплоносителем.

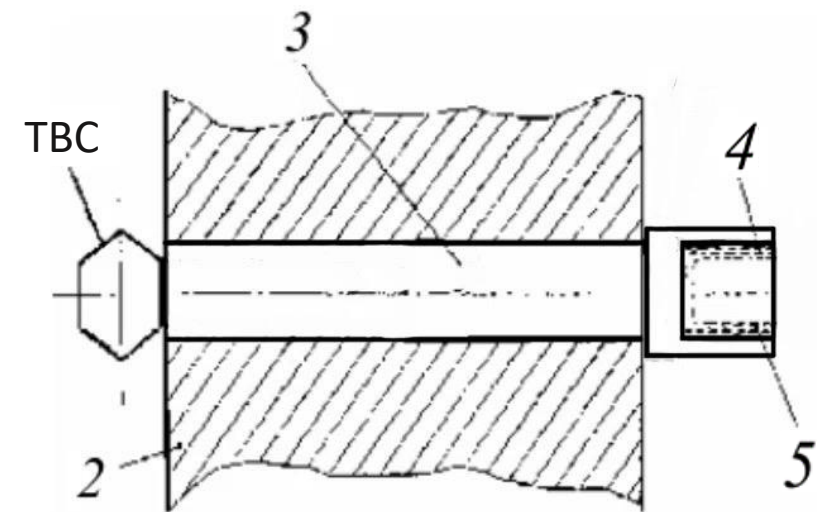
# ХОД РАБОТЫ



# МЕТОД ГАММА-СКАНИРОВАНИЯ

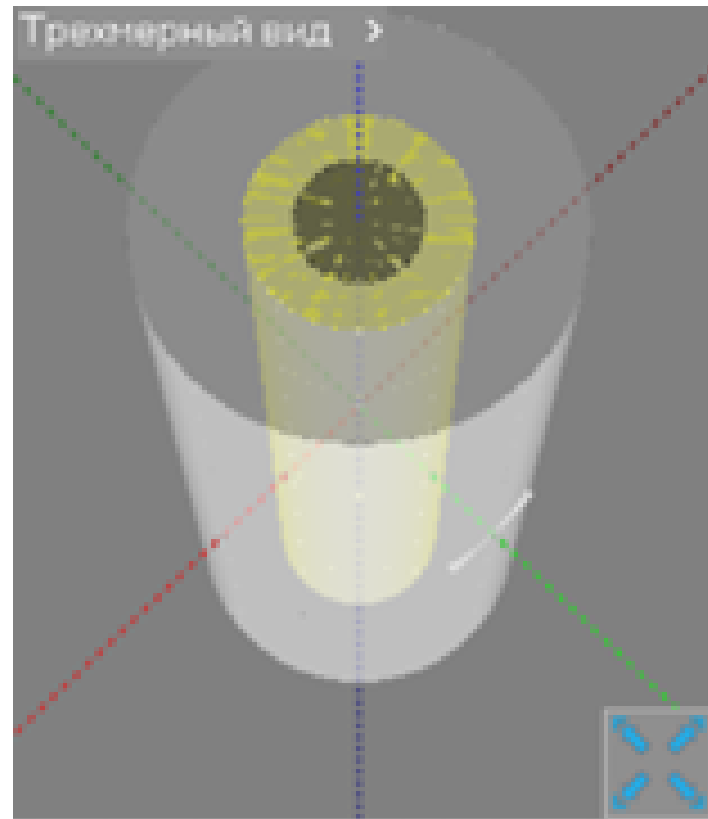
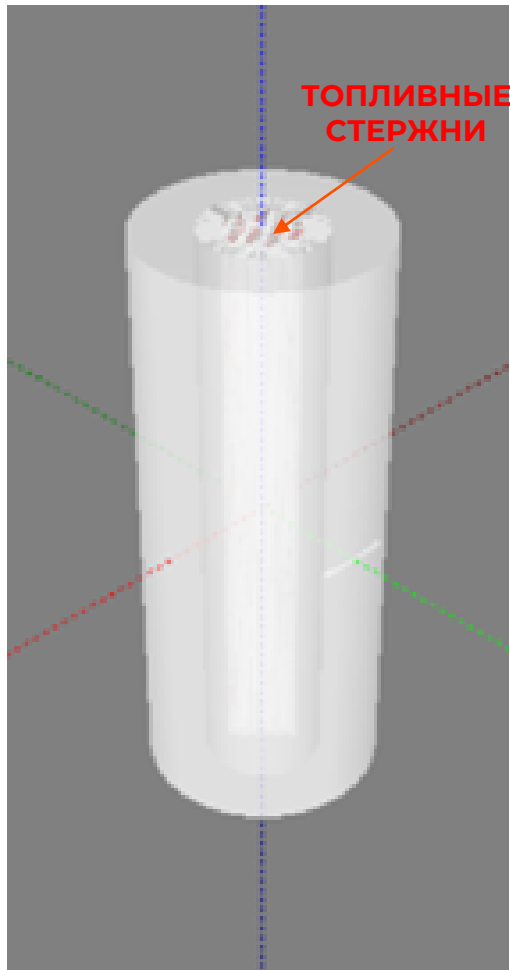
1. **Метод гамма-сканирования – метод основанный на регистрации гамма-квантов от источника с помощью спектрометров для получения информации о внутреннем содержимом объектов, материалах или процессах.**
2. Сцинтиляционный детектор, используемый в методе гамма-сканирования, должен обладать, помимо энергетического разрешения, высоким световыходом, малым временем высвечивания и высокой эффективностью регистрации.
3. Эффективность регистрации – отношение числа зарегистрированных частиц к общему количеству частиц, испущенных источником.
4. Исходя из этого для моделирования был выбран спектрометр  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ , с характеристиками :

Плотность, г/см <sup>3</sup>	Относительное энергетическое разрешение для линии 662 кэВ, %	Световыход, фотонов×10 <sup>3</sup> , МэВ	Время высвечивания, нс
5,1	2,6 ÷ 3,2	61-63	15-25



2 – свинцовый корпус; 3 – прорезь; 4 – коллиматор спектрометра; 5 – спектрометр

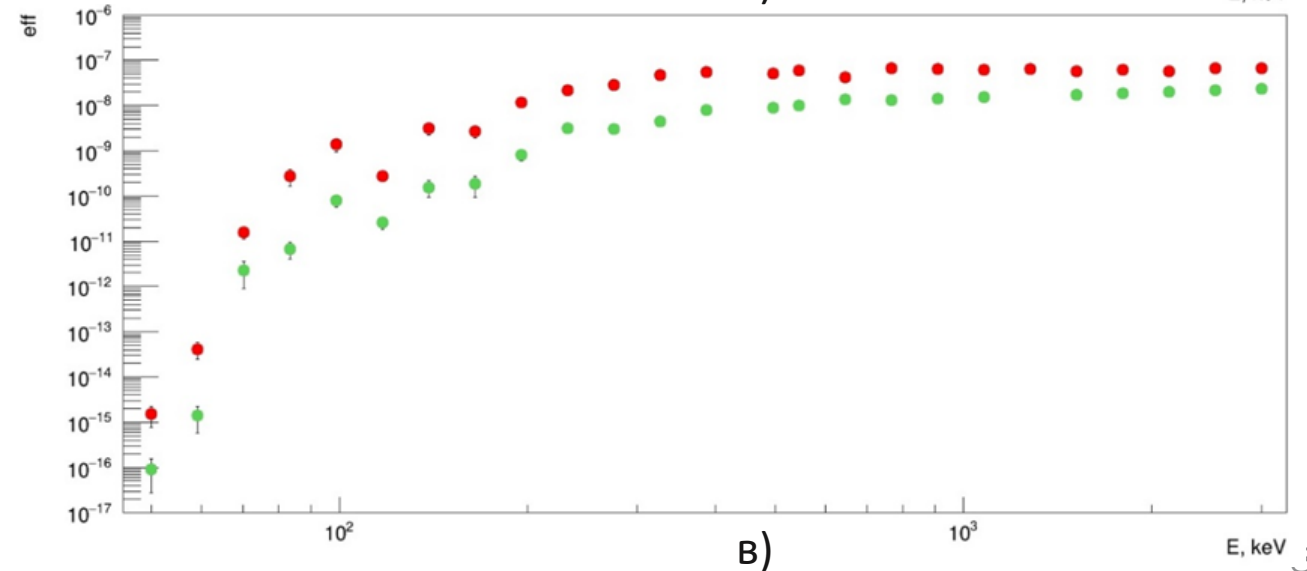
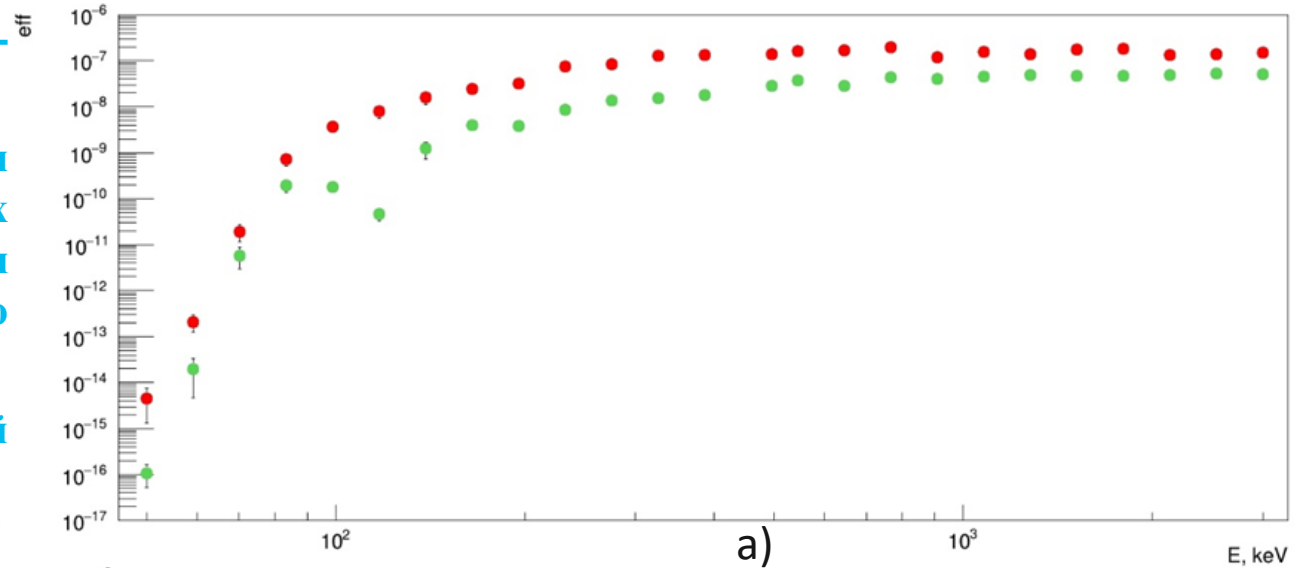
# МОДЕЛИ ТОПЛИВНОЙ СБОРКИ



1. Цилиндр - объект, в котором стержни, топливо и гелий ТВС заменяются на единый урановый цилиндр с активностью распределённой по всему его объёму. Для этого вычислялись объёмы составных частей активной зоны ТВС, массы и плотности и вычисляется средняя плотность.
2. Модель ТВС - встроенная модель в программе EffMaker, она представляет из себя сборку вида ТВС образца БРЕСТ-ОД-300, аналогичную БР-1200, с параметрами нужного образца.
3. **Основное отличие моделей заключается в том, что в Цилиндре активность равномерно распределена по всему объёму, а в ТВС активность исходит только от топливных кассет.**

# СРАВНЕНИЕ ТОПЛИВНЫХ СБОРОК

1. Оба источника рожают одинаковое число гамма-квантов.
2. Из-за самопоглощения квантов гомогенным цилиндром уменьшается количество вылетевших квантов, то есть зарегистрированных детектором гамма-квантов, что приводит к уменьшению эффективности регистрации.
3. Соотношение эффективностей регистраций сохраняется на различных расстояниях.



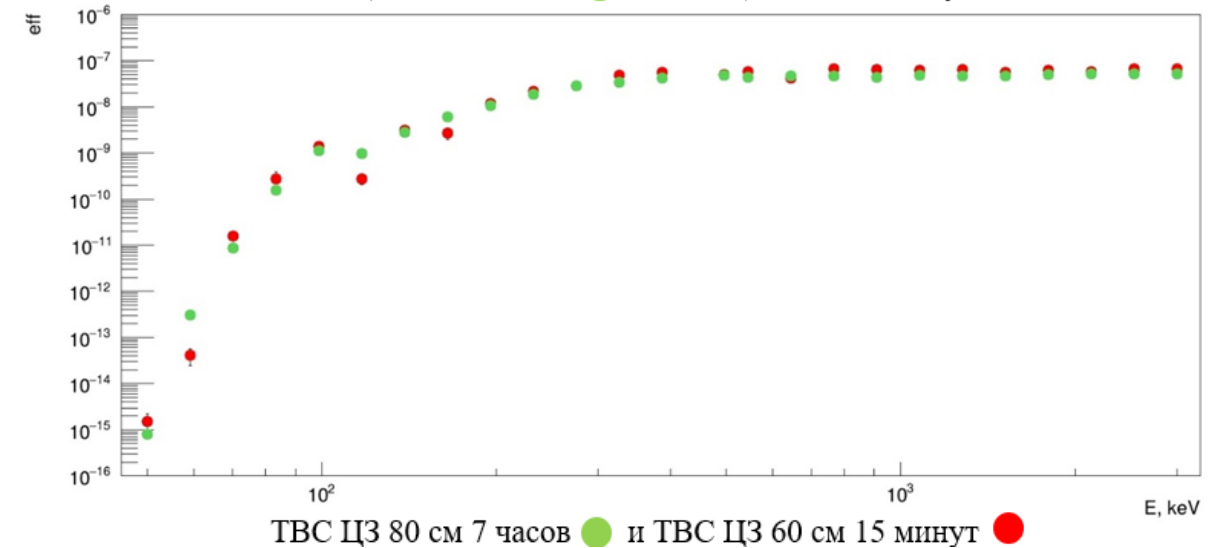
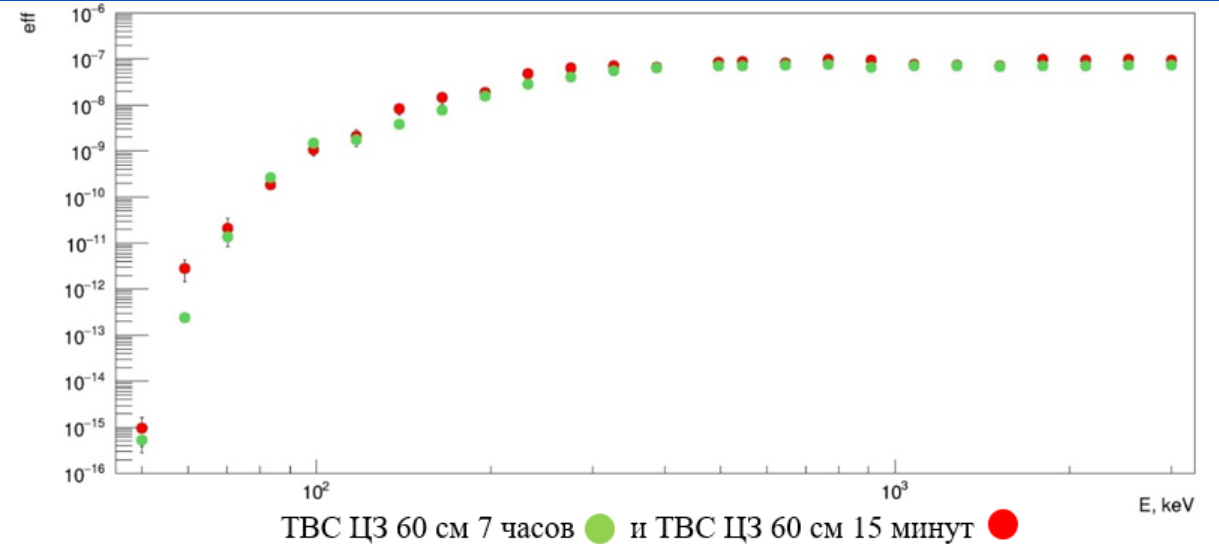
б)

Цилиндра ● и ТВС ● на расстояниях 30 (а), 50 (б), 70 (в) см.

в)

# ЗАВИСИМОСТЬ ОТ ВРЕМЕНИ РАСЧЁТА

1. Сравнивались результаты моделирования длительностью 15 минут и 7 часов.
2. Моделирование длительностью 15 минут даёт большую статистическую погрешность для энергетических линий.
3. Большие погрешности в определении энергетической линии приводит к увеличению погрешности в определении активности.
4. Длительное моделирование позволяет существенно уменьшить статистическую погрешность.



# РАСЧЁТ АКТИВНОСТЕЙ НУКЛИДОВ

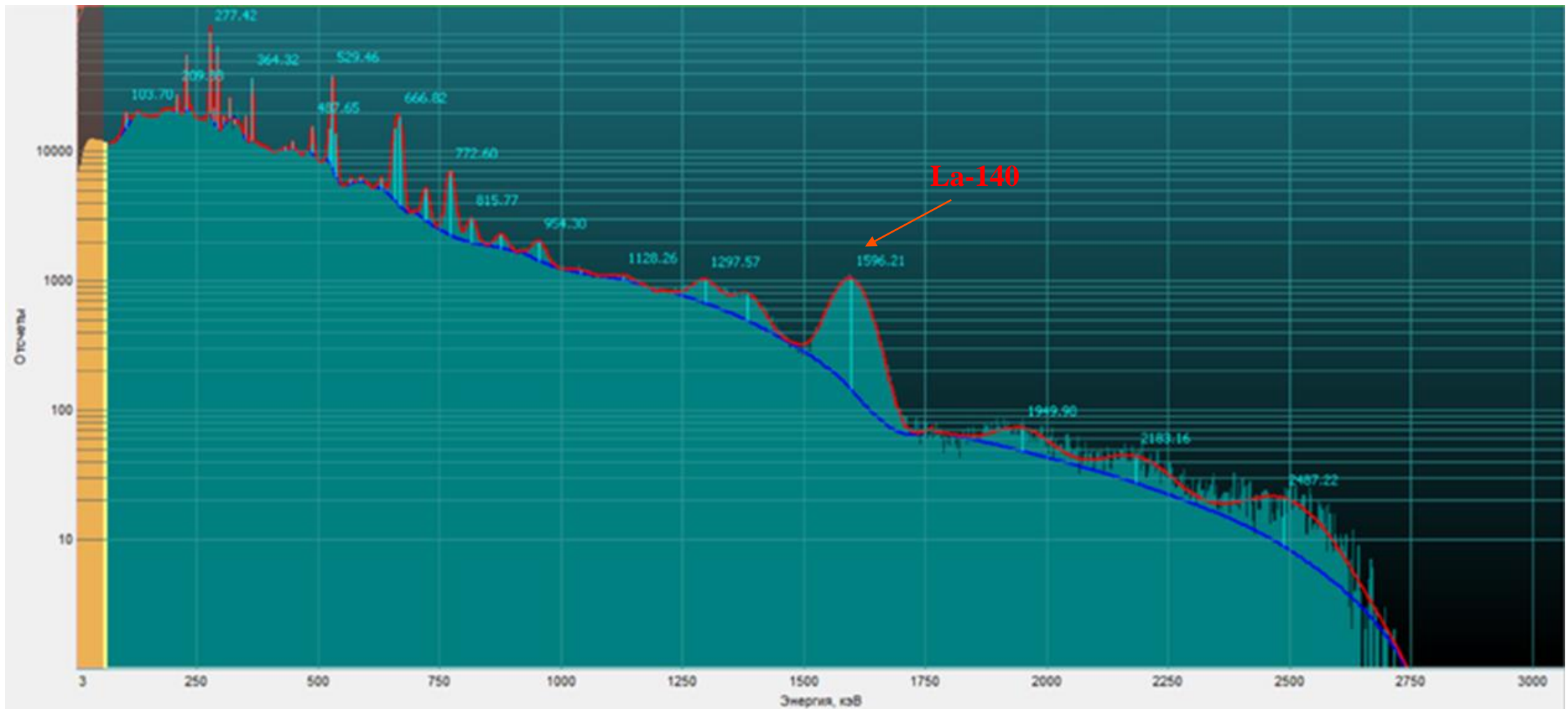


1. Моделирование активации топлива в реакторе БР-1200 выполнено с помощью программного комплекса MSU-BR.
2. Моделировался ввод реактора в эксплуатацию на 1 % номинальной мощности (29,3 МВт) с распределением мощностей по зонам: центральная — 8,98 МВт, средняя — 7,64 МВт, периферийная — 5,55 МВт.
3. Различие мощностей обусловлено неодинаковым распределением топлива по зонам для создания равномерного нейтронного поля.
4. Подготовка к гамма-сканированию включает 8-часовое облучение ТВС, последующее изъятие из активной зоны и выдержку в течение 100 часов.
5. Профиль энерговыделения — это распределение энергии и тепловыделения по активной зоне реактора.

Список нуклидов хорошо идентифицированных для каждого типа ТВС.

ЦЗ 60 см	ЦЗ 80 см	СЗ 60 см	СЗ 80 см	ПЗ 60 см	ПЗ 80 см
Np-239	Np-239	Np-239	Np-239	Np-239	Np-239
I-133	Ce-143	Ce-143	Ce-143	Ce-143	Ce-143
I-132	I-133	I-133	I-133	I-133	I-133
Nb-97	I-131	I-131	I-131	I-132	I-131
La-140	La-140	La-140	La-140	La-140	La-140

# ПРОФИЛЬ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ



1. Из спектра реперных нуклидов выделяется наиболее интенсивный пик, а именно линия нуклида La-140 с энергией 1596,21 кэВ.
2. Выделялись площади под пиками для трёх геометрий и двух расстояний 60 и 80 см.
3. Рассчитывался коэффициент, а именно зависимость эффективностей регистраций данной линии для СЗ и ПЗ относительно ТВС ЦЗ.
4. Пересчитывались значения площади, чтобы убрать зависимость результата измерений активностей нуклидов от геометрии.

$$K_j = \frac{\varepsilon_j}{\varepsilon_{ЦЗ}}$$

$$S_{j \text{ уч}} = \frac{S_j}{K_j}$$

Значения для площадей под пиком с учётом коэффициента.

	Площадь, S	Коэффициент, K	Площадь с учётом K, S <sub>уч</sub>
ТВС ЦЗ, 60 см	2,86E+04	1,000	2,86E+04
ТВС ЦЗ, 80 см	1,77E+04	1,000	1,77E+04
ТВС СЗ, 60 см	2,00E+04	0,998	2,00E+04
ТВС СЗ, 80 см	1,61E+04	0,963	1,67E+04
ТВС ПЗ, 60 см	1,63E+04	0,997	1,63E+04
ТВС ПЗ, 80 см	9,9E+03	0,957	1,03E+04

Абсолютное энерговыделение определяется по всем реперным нуклидам.

Расчет энерговыделения по значениям, полученным для  $i$ -ого нуклида, активность которого моделируются, рассчитывается как прямая зависимость от задаваемой мощности  $P_p$  и от рассчитанных в ПО MCU-BR активностей  $A_p$

$$P_i = P_p \cdot \frac{A_M}{A_p}$$

Далее определяется относительная погрешность энерговыделения  $u_{rel}(P_i)$  определяется как:

$$u_{rel}(P_i) = \sqrt{(u_{rel}(A_M))^2 + (u_{rel}(A_p))^2}$$

Далее по полученный значения рассчитывается средневзвешенное значений энерговыделения:

$$\bar{P}_\Sigma = \frac{\sum \frac{P_i}{(u_{rel}(P_i))^2}}{\sum \frac{1}{(u_{rel}(P_i))^2}}$$

Относительная суммарная относительная погрешность для всех  $i$ -ых нуклидов вычисляется по соотношению:

$$u_{rel}(P_\Sigma) = \frac{1}{\sqrt{\sum \frac{1}{(u_{rel}(P_i))^2}}}$$

Расчетные значения средневзвешенной мощности фрагмента ТВС ЦЗ

Вид ТВС	Расчитанная мощность, $P_{исх}$ , Вт	Средневзвешенная мощность, $\overline{P}_Э$ , Вт	Суммарная погрешность, $U_{rel}(P_Э)$ , %	Отклонение, $\eta$
ЦЗ 60 см	898	918,00	11,96	2,22
ЦЗ 80 см	898	916,67	12,72	2,08
СЗ 60 см	764	766,52	13,28	0,33
СЗ 80 см	764	769,34	13,35	0,70
ПЗ 60 см	555	577,70	13,15	4,09
ПЗ 80 см	555	545,97	12,21	1,62

1. Проведено сравнение гомогенной модели, цилиндр, и детализированной модели ТВС. Можно сделать вывод, что детализированная модель лучше описывает происходящие процессы, поэтому предпочтительнее. По этой модели рассчитаны эффективности регистрации, которые имеют неопределённость измерений для энергий выше 300 кэВ менее 5 % при большом времени набора.
2. В программе MCU-BR смоделировано облучение ТВС при заданных условиях. Получены теоретические активности нуклидов. Сформирован профиль энерговыделения используя нуклиды с отклонением смоделированной активности менее 15%.
3. По результатам моделирования спектров реперных нуклидов рассчитаны радиальные коэффициенты, позволяющие учесть конструктивные различия ТВС и значения энерговыделения от ТВС центральной, средней и периферийной подзон на расстояниях 60 и 80 см.

**Спасибо за  
внимание!**



# ВЫБОР СПЕКТРОМЕТРА

Параметры различных неорганических сцинтилляторов и характерное относительное разрешение детекторов, созданных на их основе

Сцинтиллятор	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Относительное энергетическое разрешение для линии 662 кэВ, %	Световыход, фотонов×10 <sup>3</sup> / МэВ	Время высвечивания, нс
LaBr <sub>3</sub> (Ce)	5,1	2,6 ÷ 3,2	61-63	15-25
NaI(Tl)	3,67	6 ÷ 8	38-40	230
CeBr <sub>3</sub>	5,23	3,8 - 4,0	60	18-25
LaCl <sub>3</sub> (Ce)	5,86	3,8 - 4,0	49	28
BGO	7,13	8,12	8-9	300
CsI(Tl)	4,51	7	52-54	1000
SrI <sub>2</sub> (Eu)	4,6	3,5	80	1000-5000
LYSO(Ce)	7,1	8	33	36-40

# ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРОГРАММЫ



- 1) Программный комплекс MCU-BR, предназначенный для моделирования переноса нейтронов и  $\gamma$ -квантов с учетом их пространственно-энергетического и углового распределения. Особенностью MCU-BR является возможность задать детальное описание геометрической структуры и материальный состав активной зоны. Программный комплекс позволяет моделировать изменение изотопного состава топлива в процессе облучения в реакторе, что необходимо для оценки накопления продуктов деления и последующего анализа активности облучённых ТВС.
- 2) Программный комплекс EffMaker предназначена для расчета эффективности регистрации и моделирования гамма-спектров для различных геометрий измерения методом Монте-Карло. В основе работы программы лежит статистическое моделирование переноса фотонного излучения от источника к детектору по методу Монте-Карло. В программе моделируется испытание, то есть частицы со случайной координатой рождения, углом вылета и энергией. Далее вычисляется отношение числа зарегистрированных квантов к числу испущенных. Результатом моделирования является зависимость эффективности регистрации гамма-кванта от его энергии.
- 3) Семейство программ SpectraLine предназначено для организации измерений и прецизионной обработки гамма спектров. Полученные спектры обрабатываются с помощью метода наименьших квадратов (МНК), который позволяет наилучшую аппроксимацию смоделированных данных. Результатом обработки является обнаружение пиков на спектре и идентификация соответствующих этим пикам нуклидов. Суммарная активность идентифицированных нуклидов рассчитывается как интеграл площади под соответствующими пиками.
- 4) Программа NuclideMaster предназначена для получения информации о параметрах радиоактивного распада и формирования пользовательских библиотек радионуклидов. Каждый нуклид в списке содержит свои гамма-линии, которые подвергаются фильтрации, убираются менее интенсивные линии, то есть линии с интенсивностью менее 1 %. Данная процедура нужна для упрощения обработки и фокусировки на более информативных данных.