



ОКБМ
АФРИКАНТОВ
РОСАТОМ

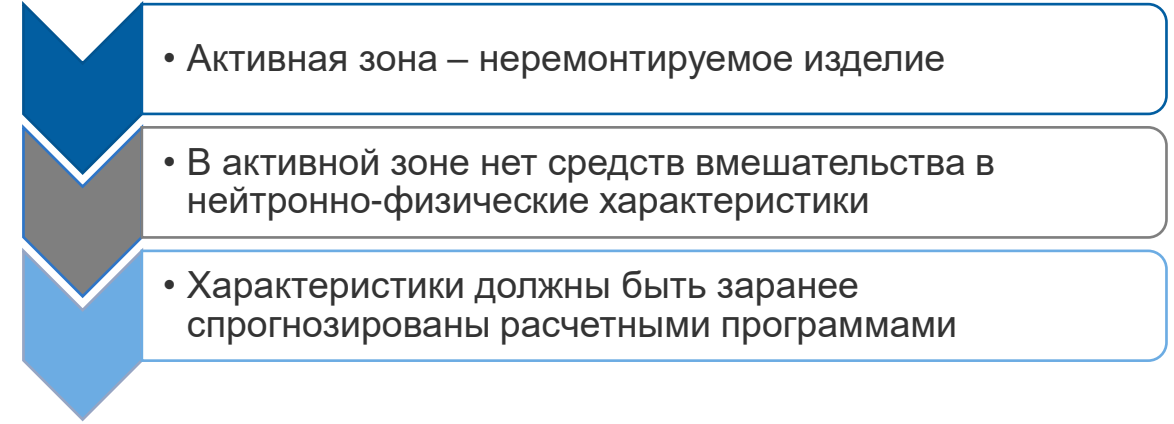
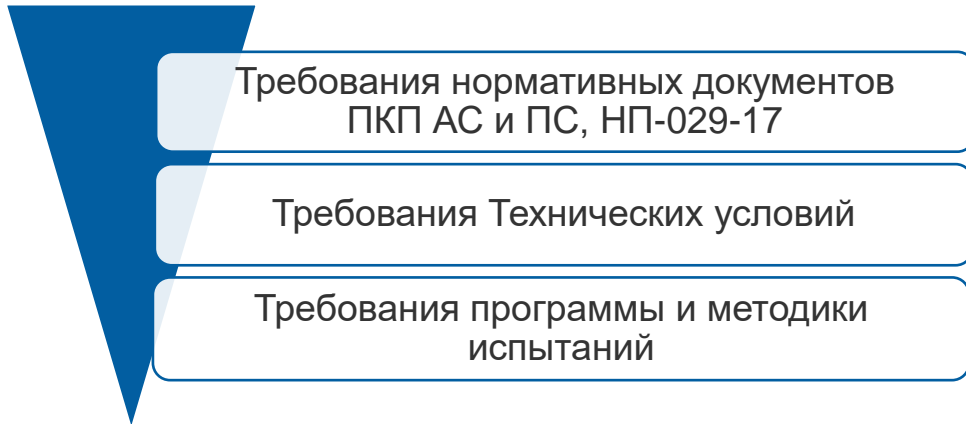
Оценка и прогнозирование мощности дозы от ТВС после испытаний активных зон на критических стендах

Научно-техническая конференция
«Нейтронно - физические проблемы ядерной энергетики (Нейтроника-2024)»




Васяткин Анатолий Геннадьевич
Начальник критического стенда

28 – 31 мая 2024 года

1. Испытания активных зон ЯЭУ на критических стендах



Испытания необходимы для проверки соответствия проектным характеристикам, верификации расчетных программ и подтверждения стартовых характеристик

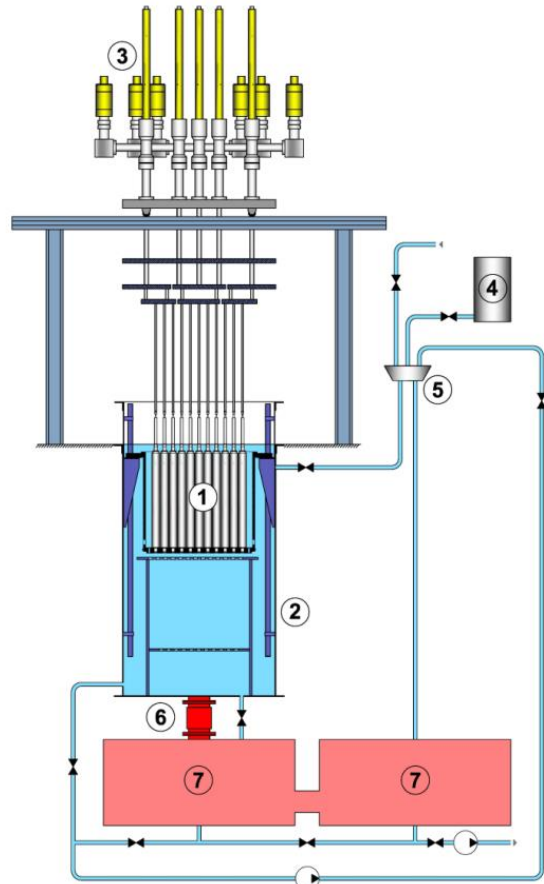
Работы	Цели и задачи
 <p>Исследования на физических моделях</p>	<ul style="list-style-type: none"> • оптимизации состава и схемы активной зоны; • получение экспериментальных данных для верификации расчетных кодов.
 <p>Предварительные, приемочные и межведомственные испытания головных активных зон</p>	<ul style="list-style-type: none"> • проверка соответствия нейтронно-физических характеристик проектным значениям; • определение окончательной комплектации активной зоны; • определение гидравлического профилирования активной зоны.
 <p>Сдаточные испытания серийных активных зон</p>	<ul style="list-style-type: none"> • проверка соответствия нейтронно-физических характеристик проектным значениям и выполнения требований по обеспечению ядерной безопасности.

2. Комплекс критических стэндов



ОКБМ
АФРИКАНТОВ
РОСАТОМ

Критический стэнд СТ-659



1 - активная зона; 2 - бак; 3 - приводы СУЗ; 4 - бак приготовления растворов; 5 - устройство разрыва струи; 6 - клапан аварийного слива; 7 - баки аварийного слива

Технические характеристики

Параметр	Значение
Мощность	до 100 Вт
Давление	атмосферное
Температура	25 ± 15 °С

Параметр	Значение
Мощность	до 600 Вт
Давление	до 17,6 МПа
Температура	до 325 °С

Комплекс обеспечен оборудованием, персоналом и помещениями для эксплуатации КС и обращения с ЯТ



Хранилища ЯТ



САС СЦР



Кран гр. Б



АСРК

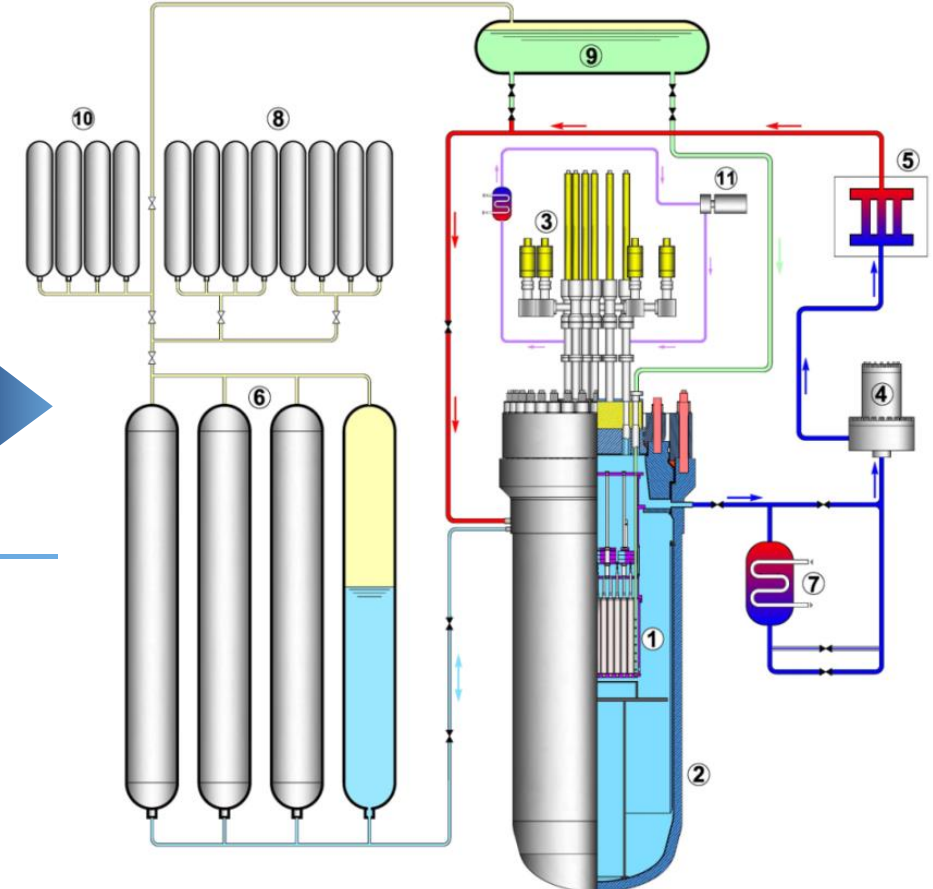


Аварийное электроснабжение



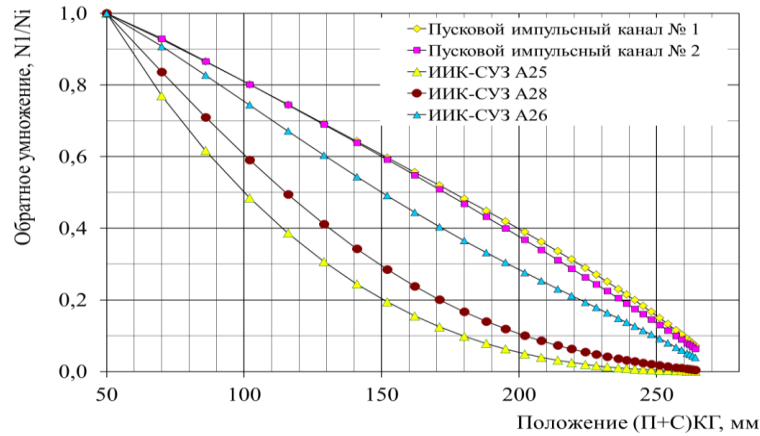
Загрузочное устройство ЯТ

Критический стэнд СТ-1125



1 - активная зона; 2 - сосуд; 3 - приводы СУЗ; 4 - насос; 5 - электронагреватель; 6 - компенсаторы объема; 7 - холодильник; 8 - газовые баллоны системы КО; 9 - баллон борного отравления; 10 - газовые баллоны системы БО; 11 - система охлаждения приводов СУЗ

3 Этапы испытаний активных зон

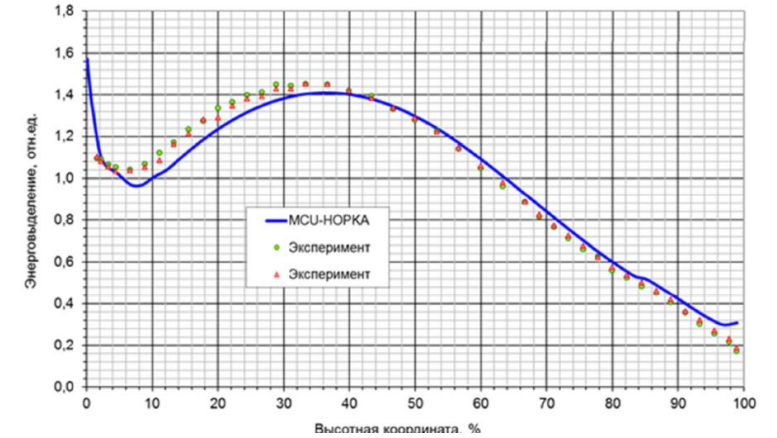
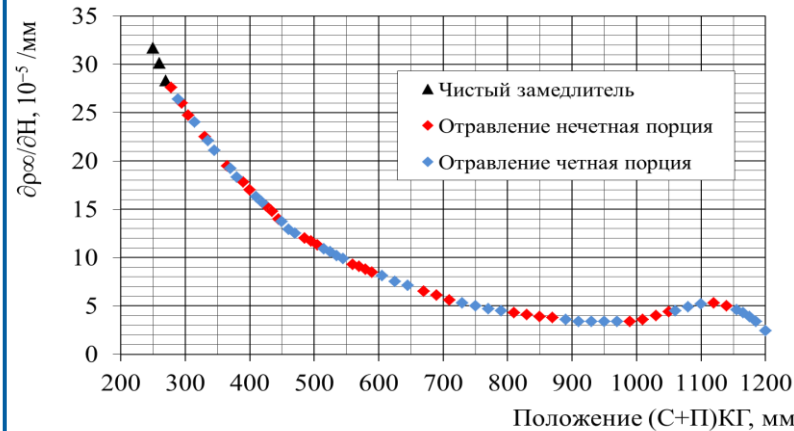


1 Физический пуск

- Оптимизация загрузки ТВС
- Определение средств аппаратного контроля загрузки ТВС и первого выхода в критическое состояние
- Картограмма загрузки

- Критические положения
- Эффективности РО СУЗ
- Запас реактивности
- Обеспечение ЯБ при зависании РО СУЗ
- Температурный и барометрический эффекты реактивности

2 Эффекты реактивности



3 Распределение энерговыделения

- Распределение энерговыделения по активной зоне
- Распределение радиального энерговыделения в ТВС
- Распределение аксиального энерговыделения в ТВС

Определение всех нейтронно-физических характеристик связано в выводом критической сборки на мощность

4 Проблемы измерения мощности

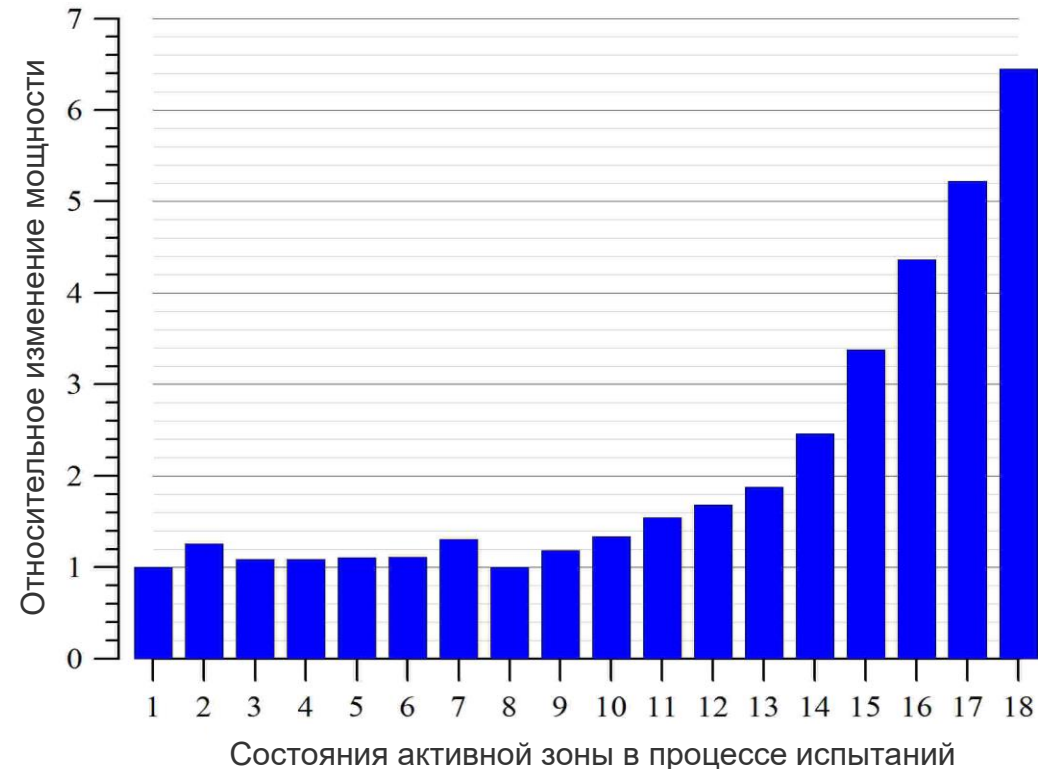


Проблемы определения мощности на КС:

- Мощность зависит от распределения плотности потока нейтронов.
- Нет средств измерений.
- В процессе испытаний меняется эффективность нейтронных детекторов.

Экспериментальные методы определения мощности:

- Метод калиброванного источника.
- Метод анализа нейтронных шумов.
- Метод активации фольг.
- Метод расчета.



5 Аспектный подход к нейтронной мощности

Требования НП-008-16 и НП-049-17: уставки АЗ (предел безопасной эксплуатации) и ПС (эксплуатационный предел) по мощности

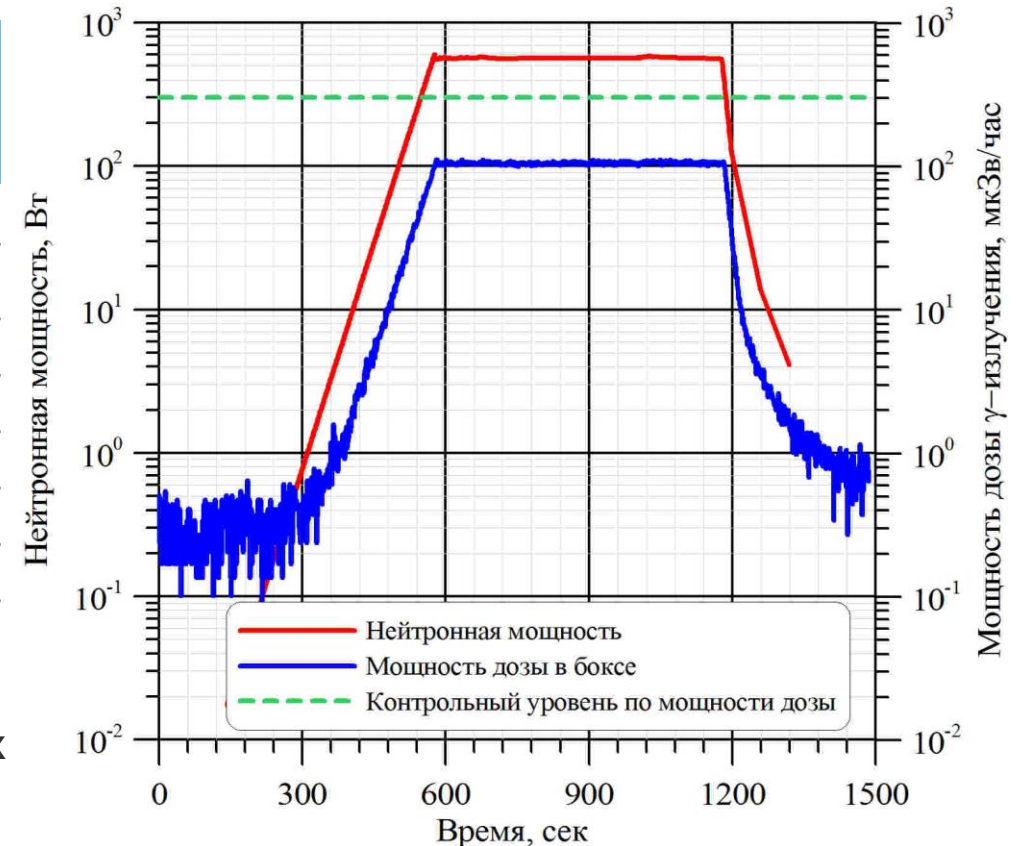


6 Актуальность оценки мощности дозы от ТВС

Мощность дозы в боксе КС СТ-1125 при работе на мощности 600 Вт

№ точки	Место расположения	Устройство детектирования	Результаты измерений, мкЗв/ч	Контрольный уровень, мкЗв/ч
1	Ворота № 9	ДБГ-С11Д	γ 3,7	25
4	Пультсовая СТ-1125	ДБГ-С11Д	γ 0,11	2
5	Бокс СТ-1125	ДБГ-С11Д	γ 85,0	300
6	Бокс СТ-1125	ДБГ-С11Д	γ 101,0	300
7	Пролет СТ-1125	ДБГ-С11Д	γ 5,46	25
8	Бокс СТ-1120	ДБГ-С11Д	γ 5,24	25
29	Бокс СТ-1125	УДМН-100	n 1080	3000
31	Пролет СТ-1125	УДМН-100	n 34	400

Оперативный контроль дозовых характеристик ТВС до их извлечения из критической сборки НЕ ВОЗМОЖЕН!



Мощность дозы от ТВС после извлечения из критической сборки – объективный критерий безопасности!

6 Актуальность оценки мощности дозы от ТВС

Мощность активной зоны

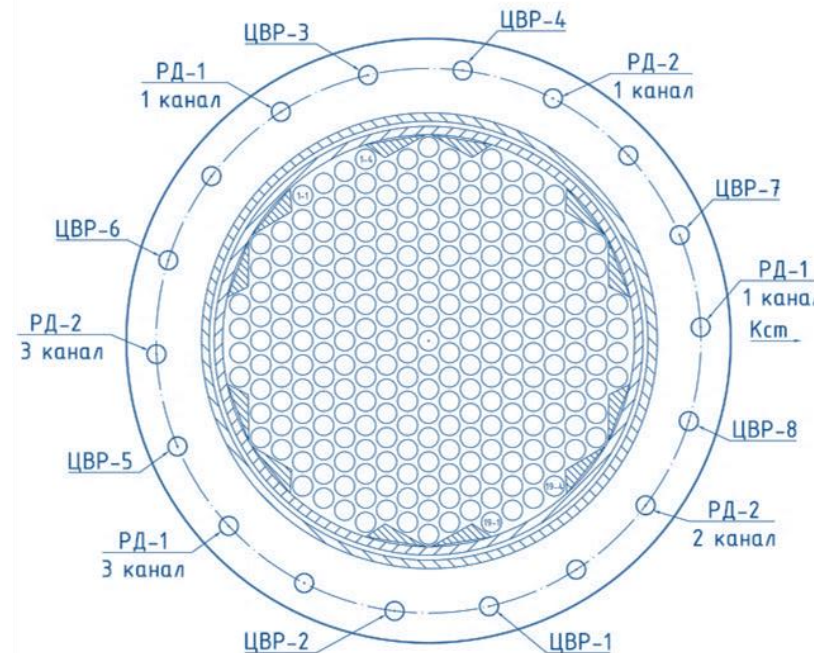
$$N = \frac{\Phi \Sigma_f V_{a.z.}}{3,1 \cdot 10^{10}}, \text{Вт}$$

Основной измеряемый параметр - РЕАКТИВНОСТЬ

Реактиметр – измеряет реактивность по сигналам ионизационных камер, регистрирующих нейтроны утечки.

$$\Delta\rho \sim I \sim \Phi$$

Тип активной зоны	Объем, м ³
14-10-3МП	0,955
14-14	1,26
14-15-1	2,11
14-17	2,90
АС-14-15	2,90



Р
е
а
к
т
и
м
е
т
р

7. Алгоритм оценки мощности дозы от ТВС

1 Нейтронная мощность

$$N_j^{uk}(t) = \varepsilon_{j,i} \cdot K_j^{uk} \cdot I_j(t)$$

2 Распределение интеграла мощности по ТВС

$$w_n(t) = \int_0^t \frac{R_{n,i}^f}{\sum_{n=1}^N R_{n,i}^f} \cdot N_{a.з.}(t) dt$$

3 Расчет интенсивности и спектра ИИИ в ТВС

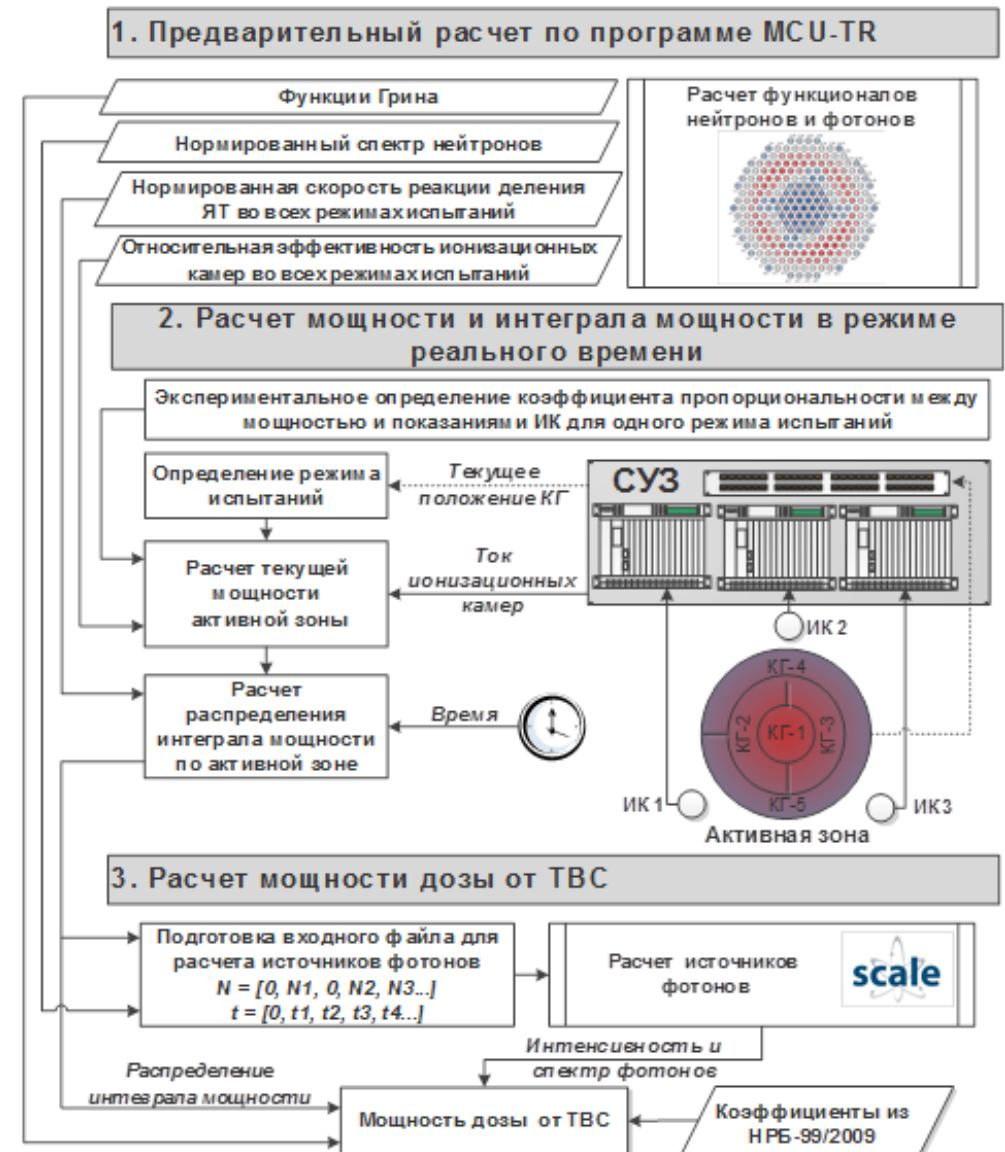
$$S(\Delta r_k^{ucm}, \Delta E_n^{ucm})$$

4 Мощность дозы в контролируемых точках

$$P(\Delta r) = \sum_{i=1}^I p(E_i^\gamma) \cdot \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N G(\Delta r, \Delta r_k^{ucm}, E_i^\gamma, \Delta E_n^{ucm}) \cdot S(\Delta r_k^{ucm}, \Delta E_n^{ucm})$$

$p(E_i^\gamma)$ - Коэффициенты из НРБ-99/2009

$G(\Delta r, \Delta r_k^{ucm}, E_i^\gamma, \Delta E_n^{ucm})$ - Функции Грина



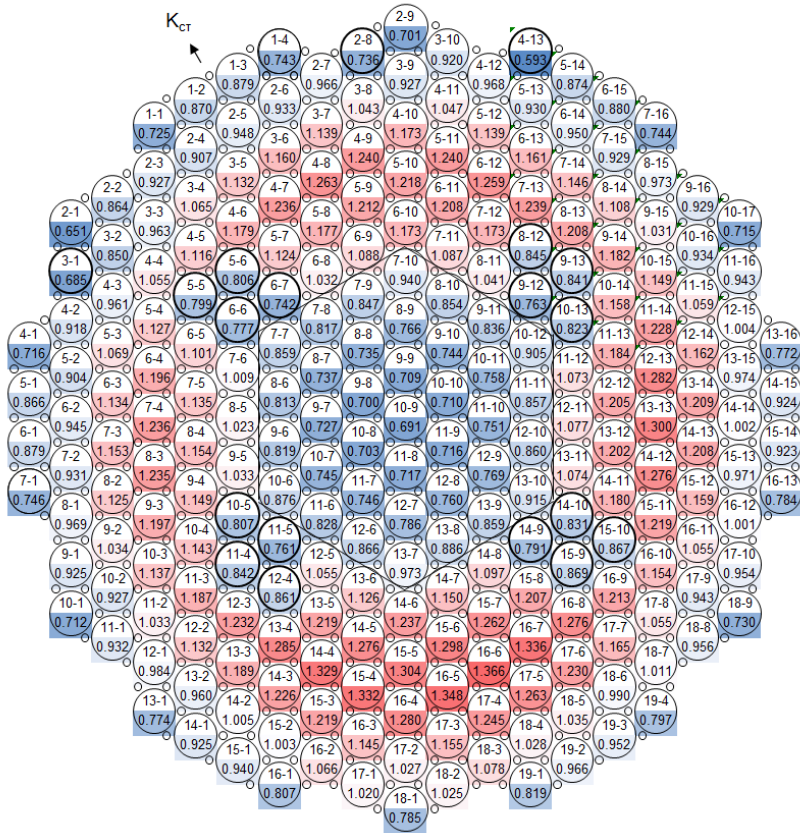
8 Подготовка данных в MSU-TR



1. Эффективность детектора

$$\varepsilon_i = R_{a,1}^{B10} / R_{a,i}^{B10}$$

Относительное энерговыделение по активной зоне



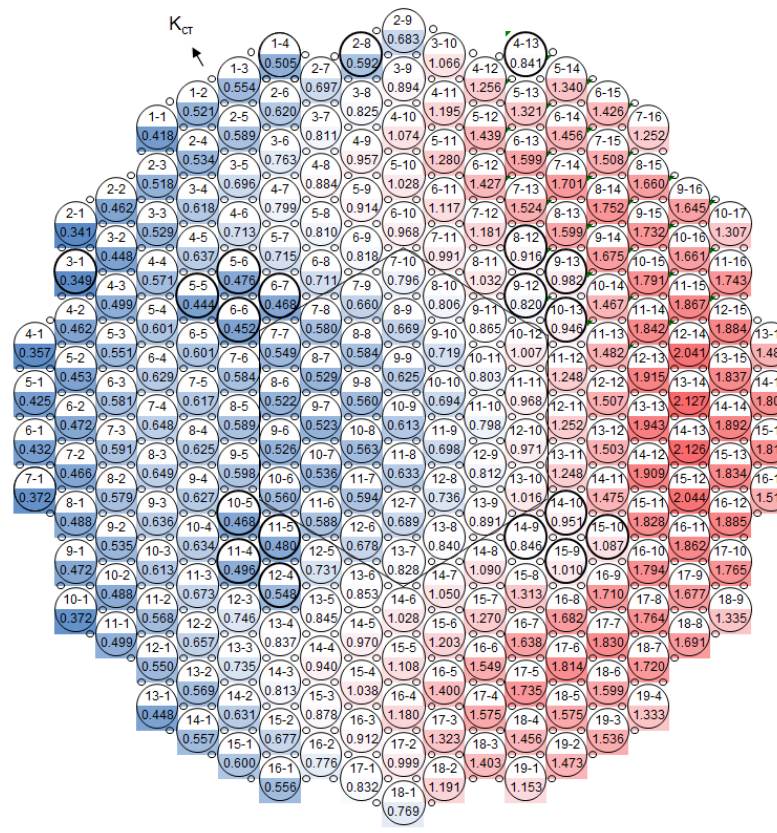
Cell_{max} = 16-6 ; K_R = 1.366 ; K_{power} = 0.00567

Алгоритм (П+С)КГ-пуск, ЦКГ-НКВ

2. Скорость реакции деления

$$R_{n,i}^f$$

Относительное энерговыделение по активной зоне



Cell_{max} = 13-14 ; K_R = 2.127 ; K_{power} = 0.00882

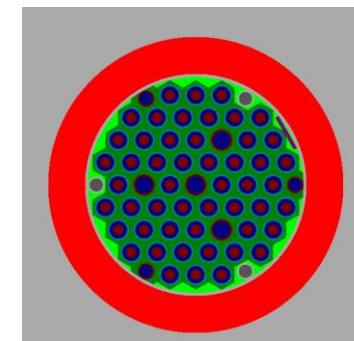
Алгоритм (П2+С)КГ-пуск, П1-ВКВ, ЦКГ-НКВ

3. Спектр нейтронов

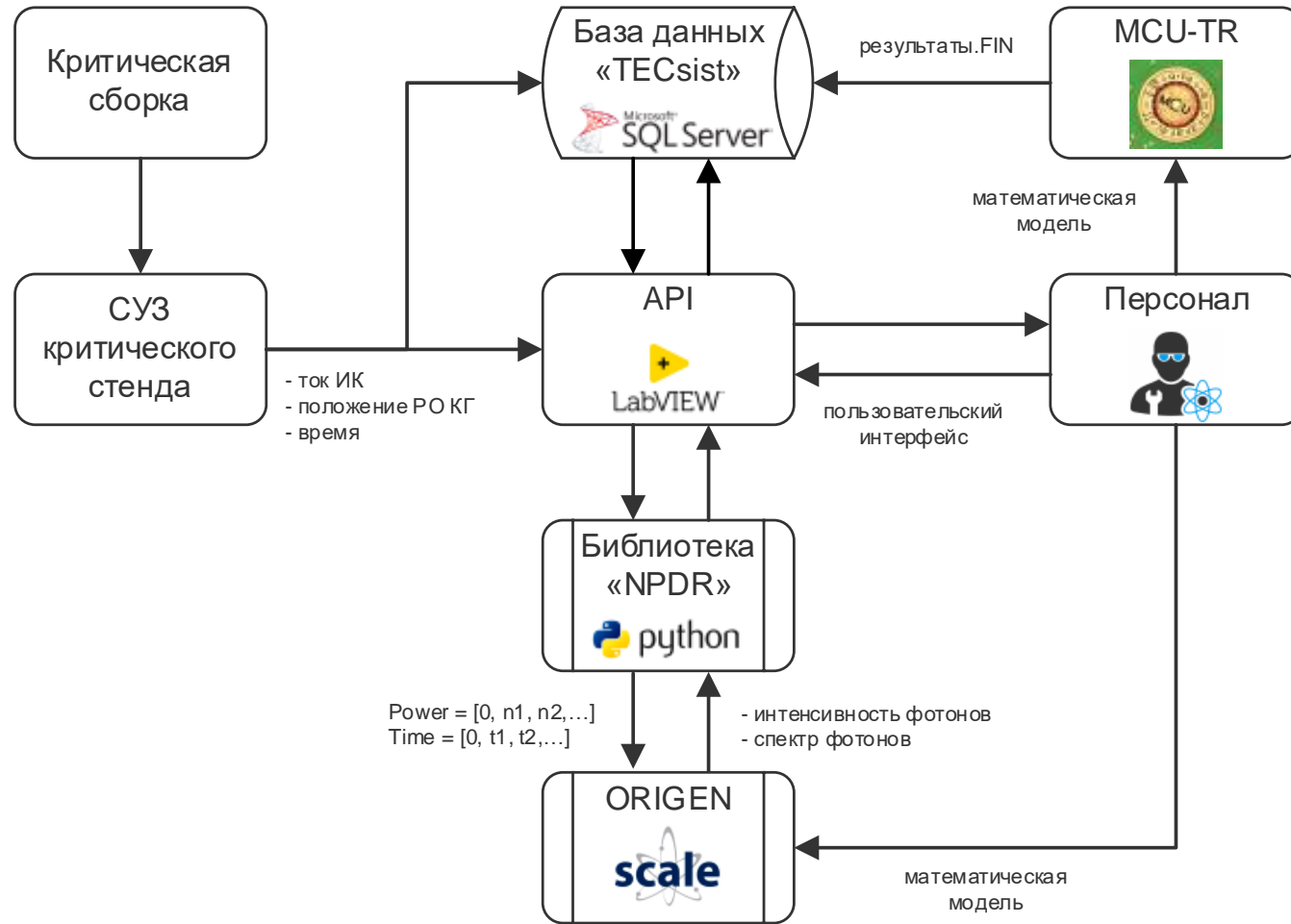
$$dN(E) / dE$$

4. Функции Грина

$$G(\Delta r, \Delta r_k^{ucm}, E_i^\gamma, \Delta E_n^{ucm})$$



9 Программно-аппаратная реализация алгоритма



Выбор компонентов продиктован:

- 1) **API на LabVIEW** - аппаратным построением и программной реализацией СУЗ с использованием NI.
- 2) **MCU-TR** - аттестована для прецизионных расчетов активных зон транспортных ЯЭУ и инженерных расчетов критических сборок.
- 3) **ORIGEN**, входящий в комплекс Scale 2.6 – корректным учетом короткоживущих изотопов.
- 4) **Python** – простотой программ и возможностью вызова функций с LabVIEW.

Контекстная диаграмма программно-аппаратного комплекса

9 Результаты апробации алгоритма

«Холодные» испытания а.з. 14-10-3МП

Мощность дозы от ТВС после 10 часов выдержки:

Эксперимент: $18,8 \pm 0,35$ мкЗв/ч

Расчет: 19,7 мкЗв/ч

Отклонение: + 4,6 %

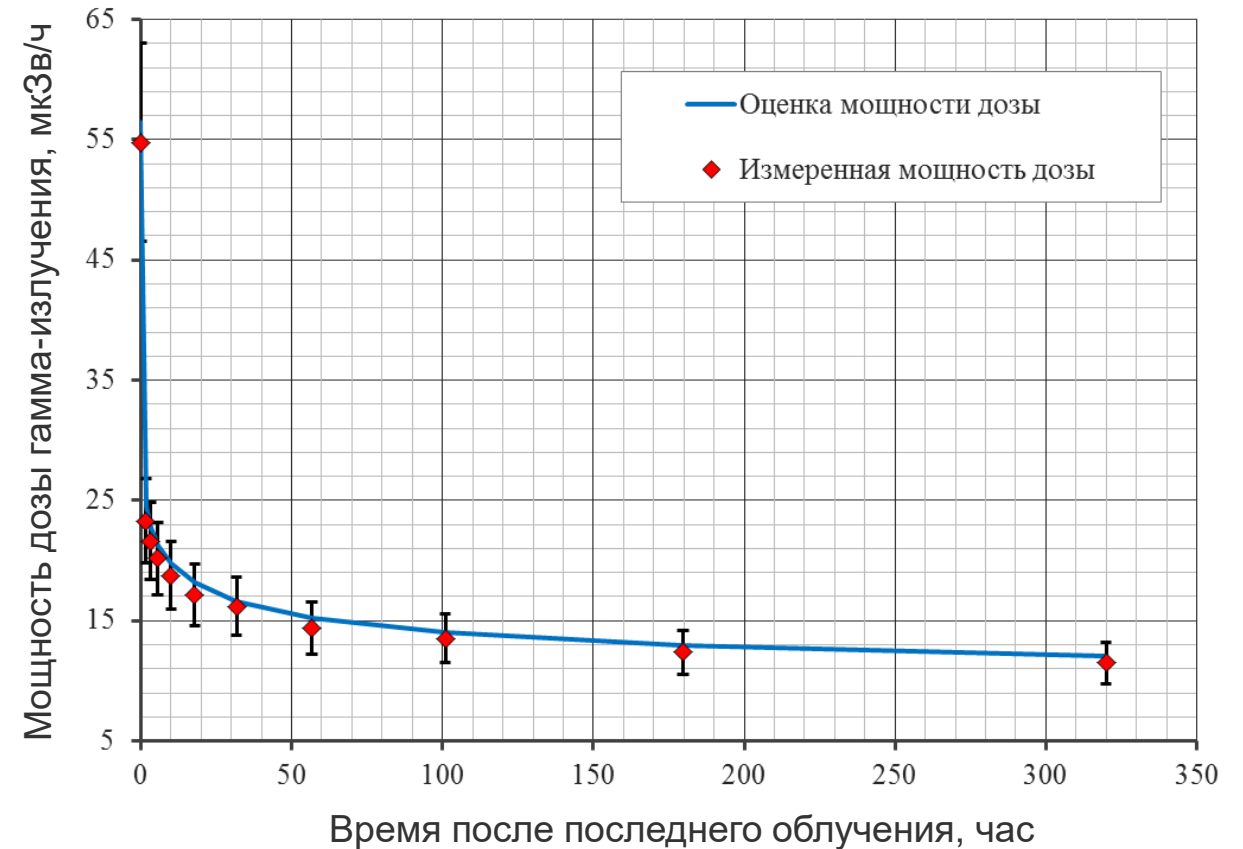
«Горячие» испытания а.з. 14-10-3МП

Мощность дозы от ТВС после активации через 20 часов:

Эксперимент: $2,3 \pm 0,35$ мЗв/ч

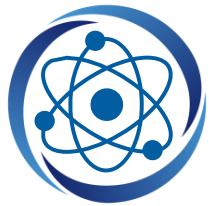
Расчет: 2,5 мЗв/ч

Отклонение: + 8 %





Разработанный алгоритм оценки мощности дозы от ТВС позволит:



Повысить точность экспериментального определения нейтронно-физических параметров активных зон ЯЭУ



Обосновать увеличение нейтронной мощности критических стенов



Проводить объективный контроль параметров радиационной безопасности и связать их с нейтронной мощностью



Обеспечить приемлемые характеристики ТВС после их испытаний на КС для дальнейших работ по изготовлению активной зоны

Спасибо за внимание

Васяткин Анатолий Геннадьевич

тел.: (831) 243-99-99 (доб. 39-66)

e-mail: physnet@okbm.nnov.ru

28 – 31 мая 2023 года

