



НИТИ
РОСАТОМ

ФЕДЕРАЛЬНАЯ ЯДЕРНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
**«НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ имени А.П. Александрова»**
ПРЕДПРИЯТИЕ ГОСКОРПОРАЦИИ «РОСАТОМ»

**СОПОСТАВЛЕНИЕ РАССЧИТАННОЙ И
ИЗМЕРЕННОЙ РЕАКТИВНОСТИ В
ЭКСПЕРИМЕНТАХ СО СБРОСОМ И
ИЗВЛЕЧЕНИЕМ РЕГУЛИРУЮЩИХ ОРГАНОВ НА
КРИТСТЕНДЕ С АКТИВНОЙ ЗОНОЙ
МАЛОГАБАРИТНОГО ГАЗООХЛАЖДАЕМОГО
РЕАКТОРА НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ**

В.Г. Артемов, Н.С. Нерсесян

Сосновый Бор – 2024

ВВЕДЕНИЕ



- С целью повышения достоверности оценок предложено использовать результаты расчетного моделирования с учетом методических особенностей проведения экспериментов при сопоставлении с результатами прецизионных расчетов методом Монте-Карло.
- Представлены результаты анализа методических особенностей измерения реактивности в экспериментах со сбросом и перекомпенсацией РО СУЗ на критическом стенде (КС) с активной зоной малогабаритного газоохлаждаемого реактора на быстрых нейтронах (РБН);
- Оценено влияние на результаты измерения реактивности параметров запаздывающих нейтронов, внешнего источника нейтронов (ИН), пространственного эффекта и эффекта интерференции РО СУЗ;

Подготовка расчетной модели



НИТИ
РОСАТОМ

Особенность подготовки расчетной модели, заключается в способе расчета спектра нейтронов по программе САПФИР_РФ.

Последовательность расчетов при этом следующая:

- с использованием двухмерной модели фрагмента активной зоны и бокового отражателя по программе САПФИР_РФ проводится расчет спектра нейтронов;
- определяются мало групповые сечения в выбранных эффективных зонах (активная зона и отражатель разбиваются на эффективные зоны).

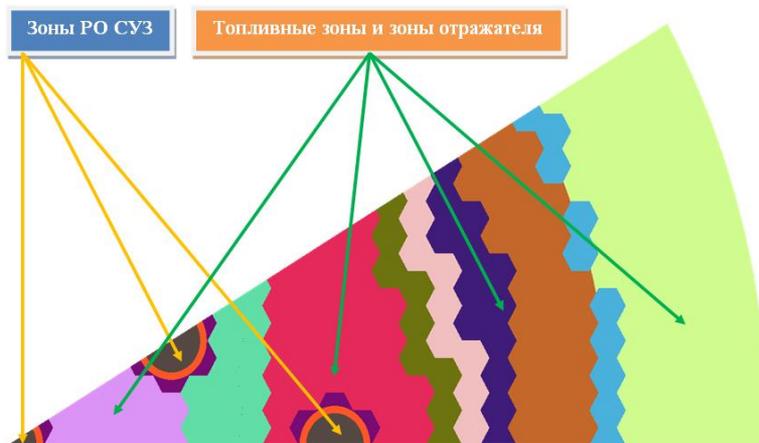


Рис. 1 – Схема разбиения сектора симметрии 1/12 части активной зоны и отражателя на эффективные зоны

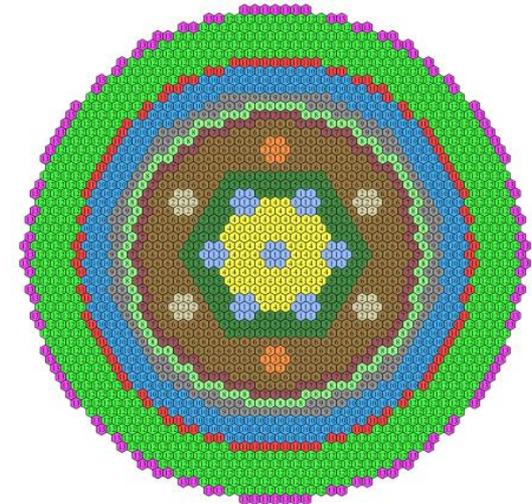


Рис. 2 – Расчетная модель активной зоны и отражателя программы RC

Модель внезонных детекторов



Для расчетного моделирования изменения реактивности в экспериментах на КС были разработаны две модели:

- 1) модель весовых коэффициентов;
- 2) модель прямого расчета ППН в месте расположения детекторов.

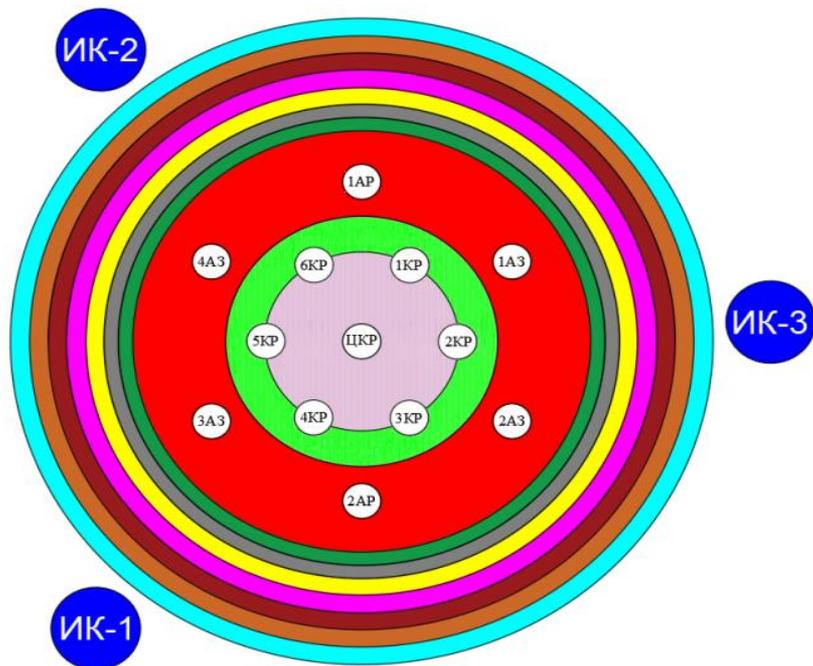


Рис. 3 – Схема расположения ионизационных камер вокруг активной зоны

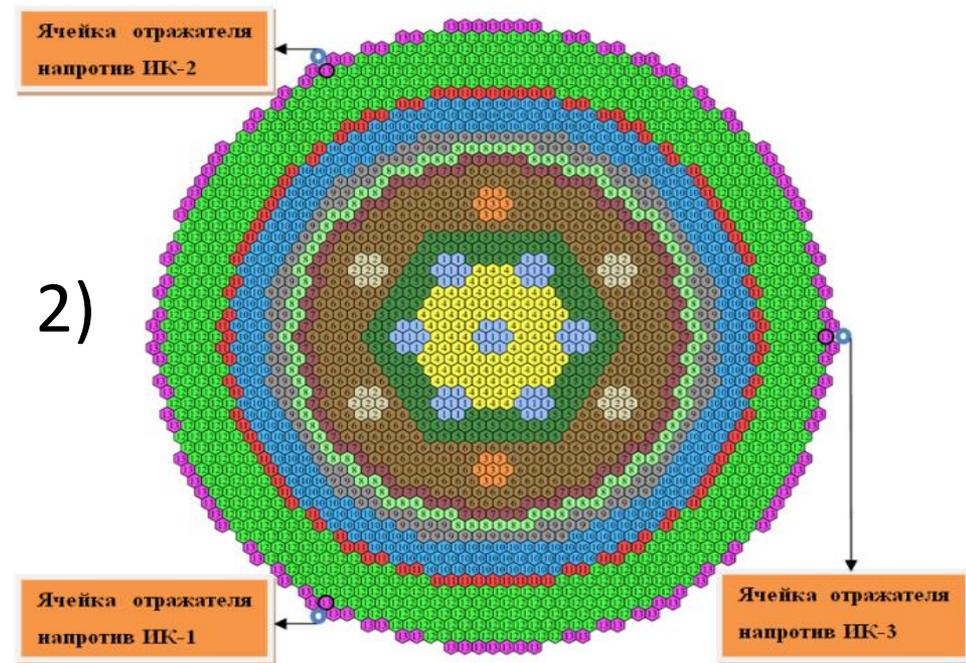
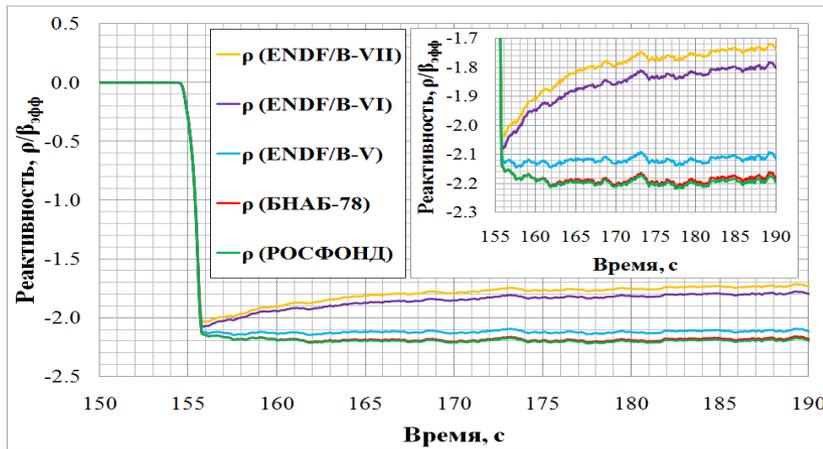


Рис. 4 – Ячейки отражателя, расположенные напротив ИК-1, ИК-2 и ИК-3

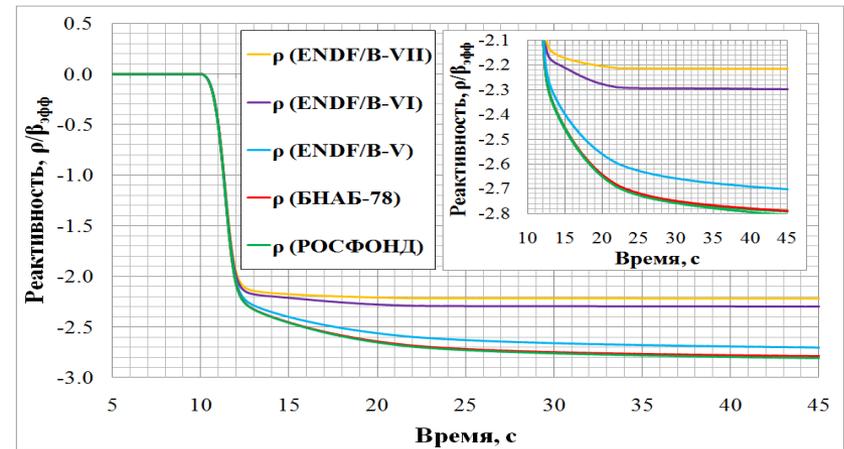
Влияние параметров запаздывающих нейтронов



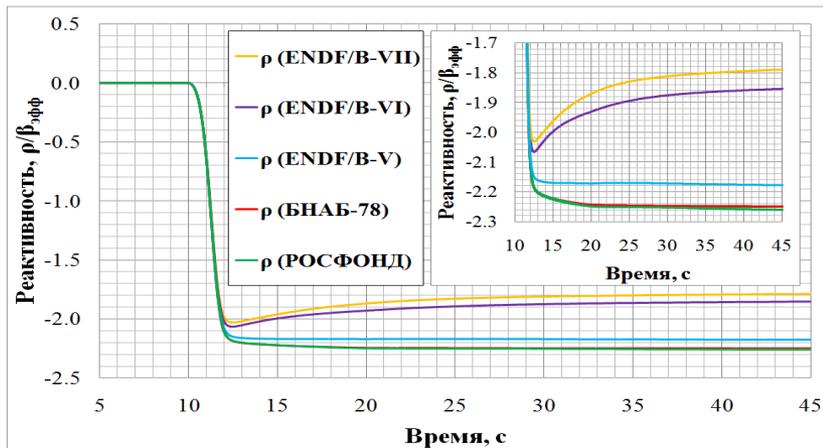
НИТИ
РОСАТОМ



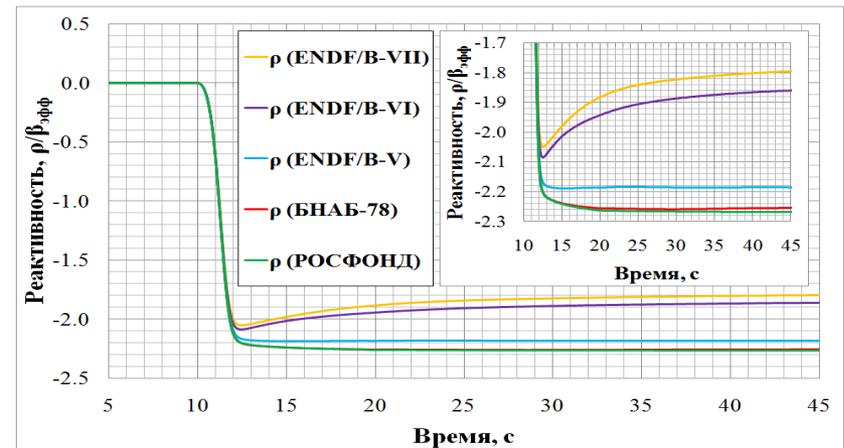
Эксперимент. Сброс РО ЦКР



Расчет. Модель с ENDF/B-VII



Расчет. Модель с БНАБ-78



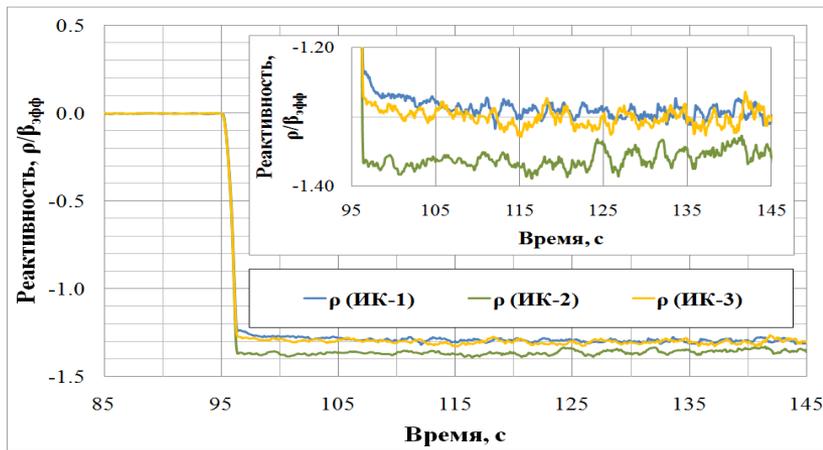
Расчет. Модель с РОСФОНД

Рис. 5 – Расчет. Модель реактиметра с разными параметрами запаздывающих нейтронов. Изменение реактивности в эксперименте со сбросом РО ЦКР

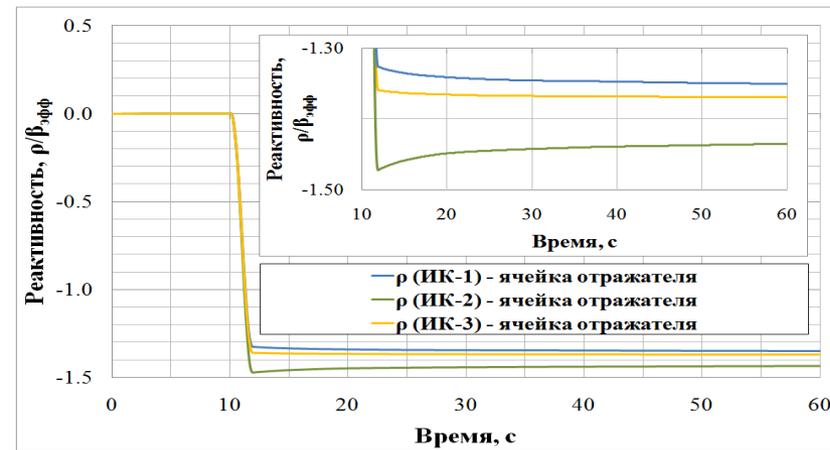
Влияние пространственного эффекта



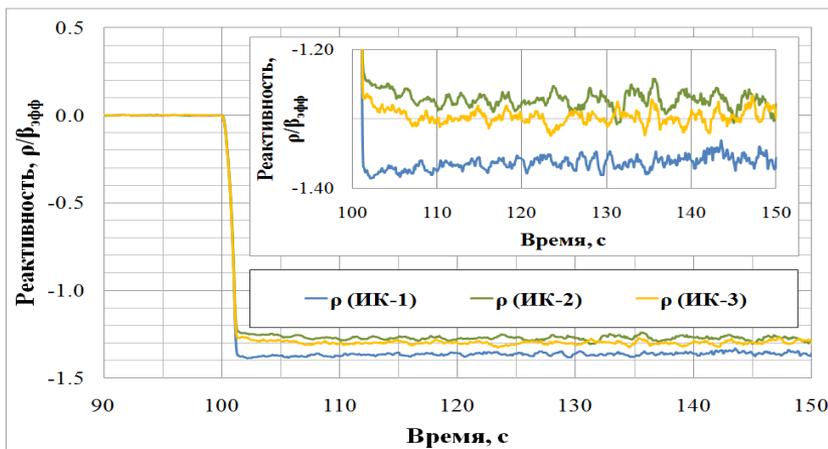
НИТИ
РОСАТОМ



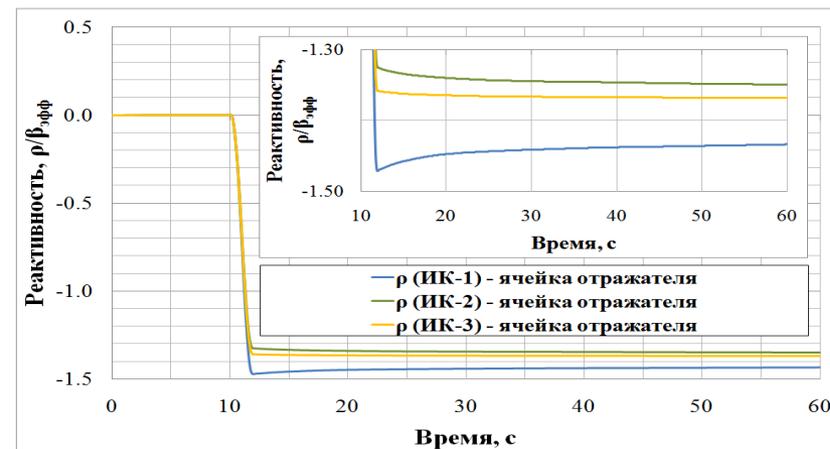
Эксперимент. Сброс РО 1АР



Расчет. Сброс РО 1АР



Эксперимент. Сброс РО 2АР



Расчет. Сброс РО 2АР

Рис. 6 – Изменение реактивности в эксперименте и в расчете при сбросах РО 1АР и 2АР

Учет влияния пространственного эффекта в экспериментах со сбросом РО СУЗ



- Коррекция экспериментальных данных проведена по формуле (1):

$$\Delta\rho_{\text{экс}}^{\text{корр}} = \Delta\rho_{\text{экс}} \frac{\Delta\rho_{\text{мод}}(3)}{\Delta\rho_{\text{мод}}(2)}, \quad (1)$$

$$\frac{\rho(t)}{\beta_{\text{эфф}}} = 1 - \frac{\sum_m \beta_{\text{эфф}m} \lambda_m \int_{-\infty}^t dt' \exp[-\lambda_m(t-t')] N(t') + S}{\beta_{\text{эфф}} N(t)}, \quad (2)$$

$$\frac{\rho(t)}{\beta_{\text{эфф}}} = 1 - \frac{\left\langle \psi^+ \sum_m \lambda_m \chi_m \beta_{\text{эфф}m} \int_{-\infty}^t dt' \exp[-\lambda_m(t-t')] \hat{Q}\phi \right\rangle}{\left\langle \psi^+ \sum_m \chi_m \beta_{\text{эфф}m} \hat{Q}\phi \right\rangle}, \quad (3)$$

которому с точностью до значения эффективной доли запаздывающих нейтронов $\beta_{\text{эфф}}$ соответствует соотношение:

$$\Delta\rho_{\text{расч}}^{\text{стац}} = \frac{1}{k_{\text{эфф}}^2} - \frac{1}{k_{\text{эфф}}^1}, \quad (4)$$

Результаты коррекции при сбросах РО СУЗ



НИТИ
РОСАТОМ

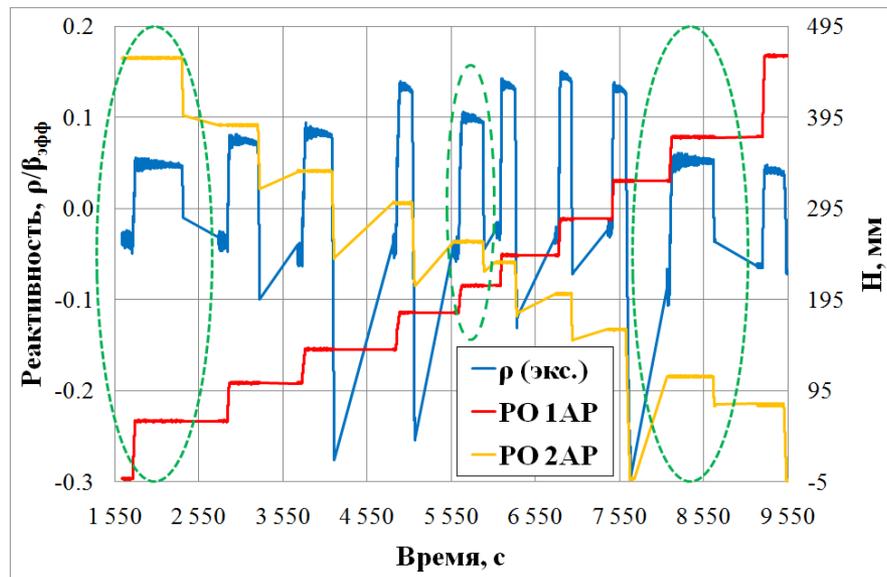
Таблица 1 – Результаты коррекции экспериментальных данных (метод сброса), учет пространственного эффекта и внешнего источника нейтронов

| РО СУЗ (номер ИК) | $\rho/\beta_{эфф}$ | | | $\Delta\rho_{экс}^{корр}$ | Отклонение, % |
|----------------------|--------------------|------------------------|------------------------|---------------------------|---|
| | $\Delta\rho_{экс}$ | Моделирование | | | |
| | | $\Delta\rho_{мод} (2)$ | $\Delta\rho_{мод} (3)$ | | $\frac{\Delta\rho_{мод} (2)}{\Delta\rho_{мод} (3)}$ |
| 1АР (ИК-1) | -1.29 | -1.35 | -1.38 | -1.32 | -2.17 |
| 1АР (ИК-2) | -1.36 | -1.44 | -1.38 | -1.30 | 4.35 |
| 1АР (ИК-3) | -1.30 | -1.37 | -1.38 | -1.31 | -0.72 |
| Среднее значение | | | | -1.31±0.01 | 0.48 |
| 2АР (ИК-1) | -1.37 | -1.43 | -1.38 | -1.32 | 3.62 |
| 2АР (ИК-2) | -1.27 | -1.35 | -1.38 | -1.30 | -2.17 |
| 2АР (ИК-3) | -1.30 | -1.37 | -1.38 | -1.31 | -0.72 |
| Среднее значение | | | | -1.31±0.01 | 0.24 |

Моделирование экспериментов с извлечением РО СУЗ

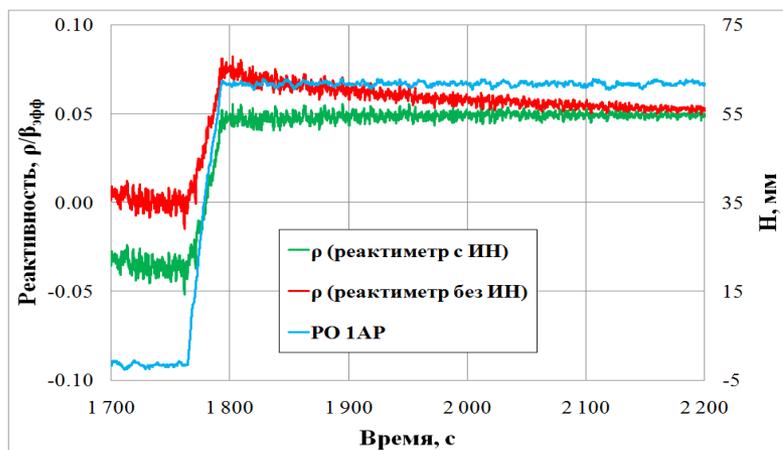


НИТИ
РОСАТОМ

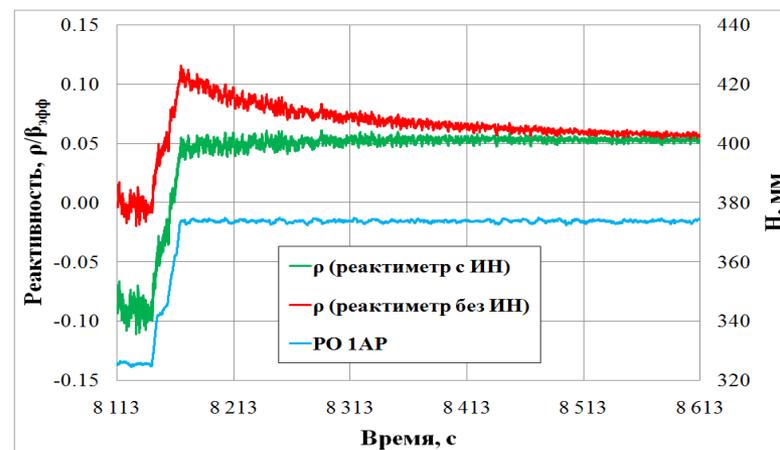


На рис. 7, в качестве примера, приведена запись результатов измерений реактивности РО 1АР при его пошаговом извлечении («разгон») и компенсация реактивности погружением РО 2АР.

Рис. 7 – Определение эффективности РО 1АР методом перекомпенсации



а)



б)

Рис. 8 – Изменение реактивности при перемещении РО 1АР.

а) - начало, б) - конец эксперимента

Учет влияния внешнего источника нейтронов при извлечении РО СУЗ



НИТИ
РОСАТОМ

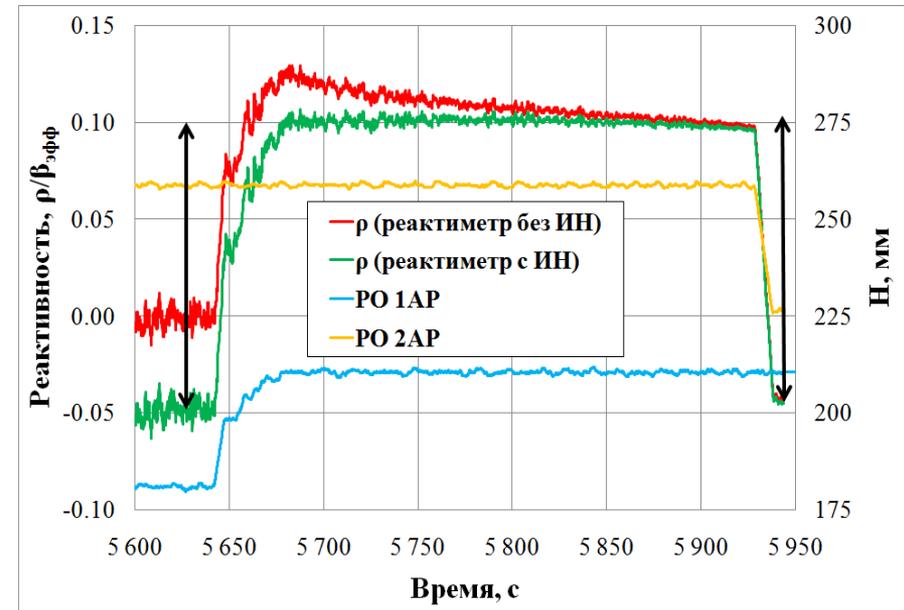
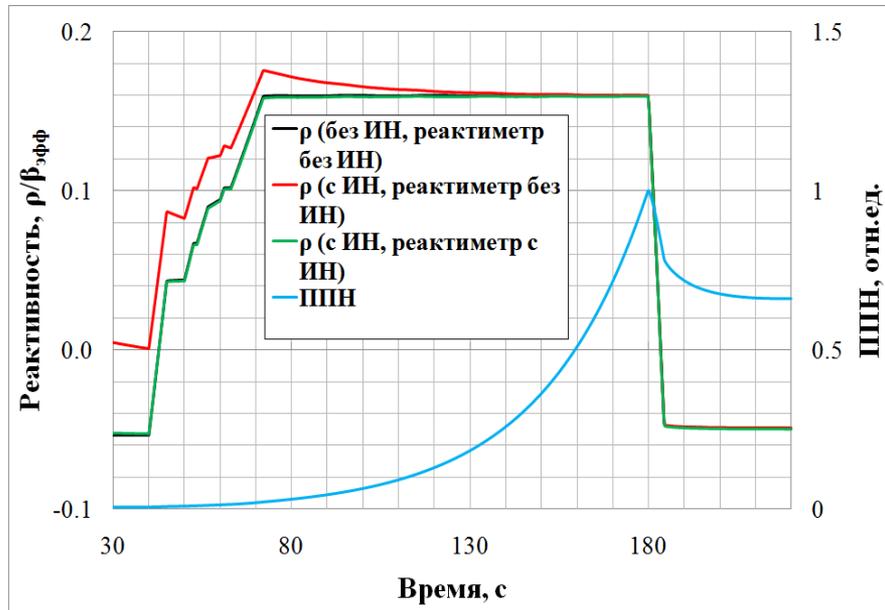


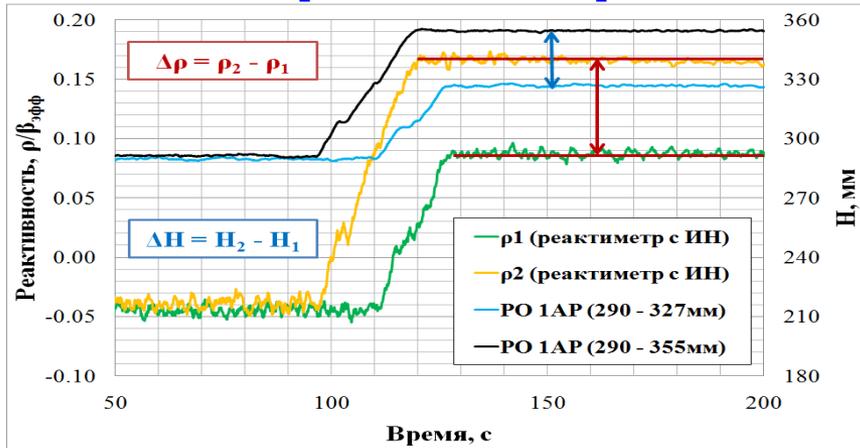
Рис. 9 – Изменение реактивности при извлечении и погружении РО ЦКР с учетом и без учета ИН

Рис. 10 – Изменение реактивности при извлечении РО 1АР и введении РО 2АР

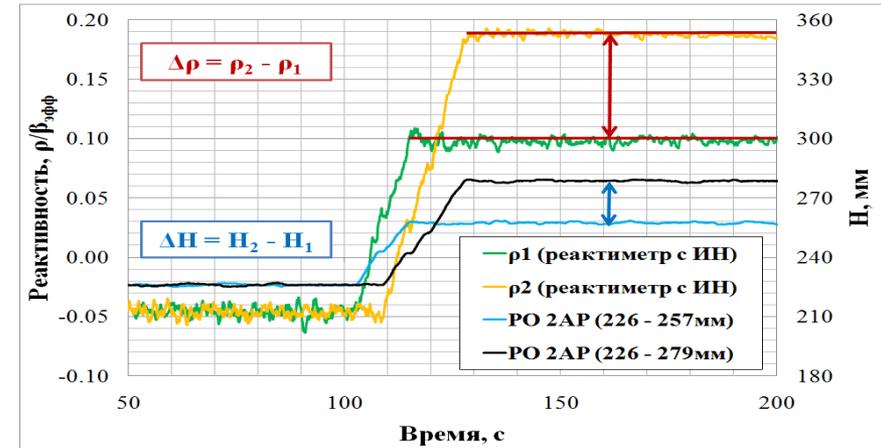
Учет влияния внешнего источника нейтронов при извлечении РО СУЗ



НИТИ
РОСАТОМ



РО 1АР (290 – 327 – 355мм)



РО 2АР (226 – 257 – 279мм)

Рис. 11 – Изменение реактивности при извлечении РО 1АР и 2АР

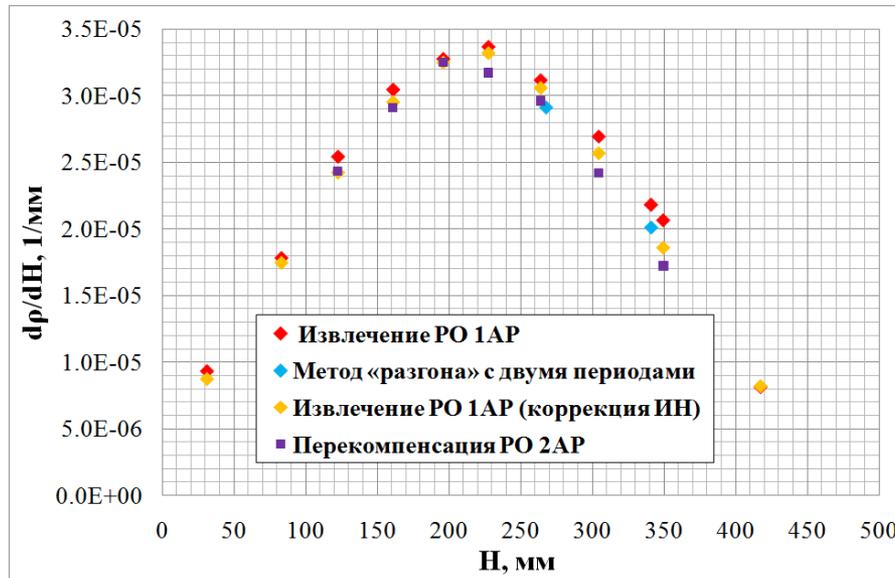


Рис. 12 – Дифференциальная эффективность РО 1АР. Коррекция величины ИН

Учет эффекта интерференции при извлечении РО СУЗ



Коррекция экспериментальных данных проведена по формуле (5):

$$\Delta\rho_{\text{эксп}}^{\text{корр}} = \Delta\rho_{\text{эксп}}^{\text{извл}} \frac{\Delta\rho_{\text{расч}}}{\Delta\rho_{\text{расч}}^{\text{извл}}}, \quad (5)$$

$\Delta\rho_{\text{расч}}^{\text{извл}}$ - получено путем пошагового моделирования измерений при последовательном извлечении калибруемого РО СУЗ и вводе в активную зону компенсирующего РО СУЗ на каждом шаге;

$\Delta\rho_{\text{расч}}$ - получено по разности значений коэффициента размножения (4) для положений РО СУЗ в исходном и конечном состояниях, которые были зарегистрированы в экспериментах со сбросом РО СУЗ.

Таблица 2 – Результаты коррекции экспериментальных данных (метод перекомпенсации), учет внешнего источника нейтронов и эффекта интерференции стержней

| РО СУЗ | $\rho, \%$ | | $\rho/\beta_{\text{эфф}}$ | |
|--------|----------------------------|--|---|---|
| | $\Delta\rho_{\text{расч}}$ | $\Delta\rho_{\text{расч}}^{\text{извл}}$ | $\Delta\rho_{\text{экс}}^{\text{извл}}$ | $\Delta\rho_{\text{экс}}^{\text{корр}}$ |
| 1АР | 1.00 | 0.98 | 1.31 | 1.34 |
| 2АР | 1.00 | 0.97 | 1.30 | 1.34 |

Сравнение результатов по методам сброса и перекомпенсации



Таблица 3 – Сравнение результатов измерения эффективности РО 1АР и 2АР, полученных по методам сброса и перекомпенсации после коррекции величины ИН и введении поправок на эффект интерференции

| РО СУЗ | $\rho/\beta_{эфф}$ | | Отклонение, % |
|--------|--------------------|-----------------------|---------------|
| | Метод сброса | Метод перекомпенсации | |
| 1АР | 1.31 | 1.34 | 2.3 |
| 2АР | 1.31 | 1.34 | 2.3 |

Таблица 4 – Результаты измерений эффективности РО 2АР методом перекомпенсации по показаниям скоростей счета ИК-1 и ИК-2

| РО СУЗ | $\rho/\beta_{эфф}$ | |
|--------|--------------------|------|
| | ИК-1 | ИК-2 |
| 2АР | 1.34 | 1.34 |

Сопоставление эффективности РО СУЗ по программам RC и MCU-FR с экспериментальными данными



Таблица 5 – Оценки эффективности РО СУЗ, полученные по программам RC и MCU-FR

| Положение РО СУЗ | ρ , % (метод сброса) | | Отклонение, % |
|---------------------|---------------------------|--------|------------------|
| | RC (2 группы) | MCU-FR | |
| Введен 1АР | 1.00 | 0.94 | 6.4 |
| Введен 2АР | 1.00 | 0.94 | 6.4 |

Таблица 6 – Сравнение эффективности при сбросах РО СУЗ между MCU-FR и экспериментом

| Положение РО СУЗ | $\rho/\beta_{эфф}$ | | Отклонение, % |
|---------------------|--------------------|--------|------------------|
| | Эксперимент | MCU-FR | |
| Введен 1АР | 1.31 | 1.32 | 0.8 |
| Введен 2АР | 1.31 | 1.32 | 0.8 |

Заключение



1. Для обеспечения расчетного моделирования измерений реактивности в КП САПФИР_РФ&РС разработаны и реализованы:

- модель для расчета реактивности в исходном и возмущенном стационарном состояниях;
- модель для расчета ППН в активной зоне и в местах расположения детекторов в переходных режимах;
- модель реактиметра.

2. Изложена и обоснована схема сопоставления результатов расчетов и результатов экспериментов, включающая следующую последовательность действий:

- измерение реактивности;
- расчетное моделирование вычисления реактивности с имитацией условий эксперимента;
- оценка влияния методических особенностей измерения реактивности и коррекция результатов экспериментов на основе результатов расчетного моделирования измерений и прямых расчетов реактивности;
- проведение прецизионных расчетов и сопоставление с откорректированными экспериментальными результатами.

3. Предложенная методика и расчетная модель позволяют с высокой точностью корректно сопоставить результаты расчетов реактивности по программе MCU-FR с экспериментальными данными.

**СПАСИБО
ЗА ВНИМАНИЕ**

