



Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору

ФЕДЕРАЛЬНОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ

«Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности»



## Одновременное определение эффективности аварийной защиты реактора типа ВВЭР-1000 и эффективности аварийной защиты без одного органа системы управления и защиты

В.И. Куликов, ООО «НТЦ ТУК», Санкт-Петербург

**А.И. Попыкин**, Н.А. Старова ФБУ «НТЦ ЯРБ», Москва

Научно-техническая конференция  
«Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики (Нейтроника-2024)»  
31.05 2024 г.

[www.secncrs.ru](http://www.secncrs.ru)

Из ПБЯ РУ АС (НП-082-07):

п. 3.1.1 «В процессе физического пуска должны быть получены экспериментальные данные о нейтронно-физических параметрах реактора, эффектах реактивности, эффективности органов регулирования и АЗ и др.»

п. 2.7.2.13 «Для реакторов с частичной перегрузкой после завершения перегрузки должны быть проведены испытания (измерения) по подтверждению основных проектных и расчетных нейтронно-физических характеристик активной зоны...»

$$\frac{\rho_{изм}}{\beta_{эф}} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N a_i \lambda_i \int_{-\infty}^t \exp(-\lambda_i(t-t')) I(t') dt'}{I(t)} \neq \rho_k = 1 - 1/k_{эф} \quad (1)$$

Согласно Положению о рекомендациях по сопоставлению рассчитанной и измеренной реактивности при обосновании безопасности в реакторах ВВЭР (РБ-074-12) выделяют:

- Измеренная реактивность;
- Рассчитанная реактивность (по программе стационарного расчета);
- Реактивность, полученная в результате расчетного моделирования измерения.

# Метод расчета реактивности



## Вводимые предположения:

1. Рассматривается квазистационарная задача, а, именно, принимается, что плотность потока нейтронов зависит от времени только в результате изменения концентрации предшественников запаздывающих нейтронов и перемещения ОР СУЗ.
2. Пространственная зависимость концентраций предшественников запаздывающих нейтронов в процессе ввода реактивности изменяется незначительно, так что этим изменением можно пренебречь.

$$(\chi F)\varphi - M\varphi + q(t) = 0,$$

$$\frac{1}{k_{эф}}(\chi F)^+ \varphi_k^+ - M^+ \varphi_k^+ = 0,$$

$$\rho_k = 1 - \frac{1}{k_{эф}} = \beta_{эф} - \frac{(\varphi_k^+, q_3)}{(\varphi_k^+, (\chi F)\varphi)}.$$

(\*)

$$\frac{\rho_k}{\beta_{эф}} - 1 = - \frac{\bar{q}_3}{\bar{q}_{3,0}} \frac{I_0(e_k, R_{k,0})}{I(e_k, R)} \frac{(e_1, R)}{(e_1, R_{k,0})},$$

$$\frac{\rho_k}{\beta_{эф}} - 1 = - \frac{\bar{q}_3}{\bar{q}_{3,0}} \frac{I_0}{I} b_1 b_2$$

(\*) В.И. Куликов, Н.М. Жылмаганбетов, А.И. Попыкин, А.А. Смирнова Использование решений сопряженных задач для расчета и расчетного моделирования измерений больших реактивностей. Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика ядерных реакторов», 2019, вып.1.

Связь между рассчитанной и непосредственно измеренной величиной — отношением токов ИК «до» и «после» сброса ОР СУЗ устанавливается формулой

$$\frac{\rho_k}{\beta_{эф}} - 1 = - \frac{\bar{q}_3}{\bar{q}_{3,0}} \frac{I_0}{I} b_1 b_2$$

$\frac{I_0}{I}$  отношение токов ИК «до» и «после» сброса ОР СУЗ

$b_1$  учет пространственных эффектов формулы ОРУК внутри активной зоны

$\frac{\bar{q}_3}{\bar{q}_{3,0}}$  отношение источников запаздывающих нейтронов «до» и «после» сброса ОР СУЗ

$b_2$  характеризует положения ИК

# Этапы расчета



➤ Расчет распределения энерговыделения в начальном состоянии (все ОР СУЗ, кроме рабочей группы, находятся в крайнем верхнем положении), которое принимается критическим, а также распределения энерговыделения в конечном состоянии (с погруженными в активную зону ОР СУЗ);

➤ Расчет коэффициентов влияния ТВС на плотность потока тепловых нейтронов в месте расположения ИК по программе, реализующей решение уравнения переноса нейтронов методом Монте-Карло;

➤ Расчет источника запаздывающих нейтронов. Концентрации предшественников запаздывающих нейтронов рассчитывались с использованием программы для ЭВМ «RAINBOW-TPP»;

$$\bar{q}_3 = \sum_{i=1}^{163} \sum_{j=1}^6 \lambda_j \cdot c_{ij}$$

➤ Расчет функции ценности нейтронов, входящей в определение коэффициента  $b_1$ .

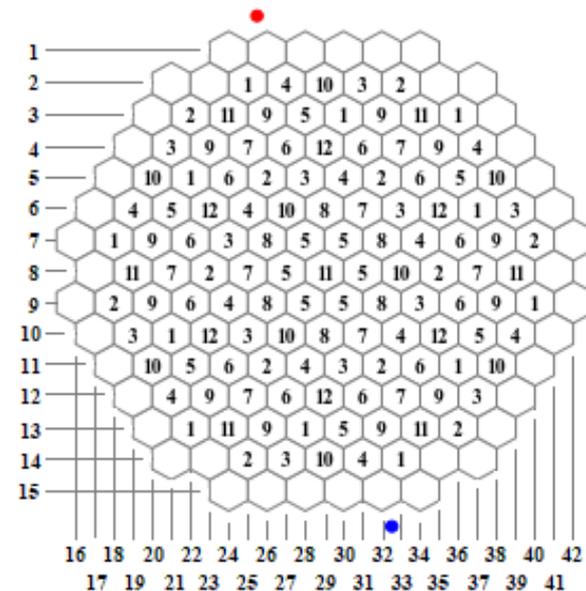


Схема расположения ИК и распределения ОР СУЗ по группам

- — ионизационная камера № 8;
- — ионизационная камера № 16

# Этапы расчета. Расчет тока ИК



$$I(t) = \sum_{i,k} I_{i,k}(t) = \sum_{i,k} \xi_{i,k} N_{i,k}(t)$$

— ток ИК

Распределение энерговыделения в критической ( $R_{к,0}$ ) задаче и в задаче с источником ( $R$ ) для 3-ей топливной кампании

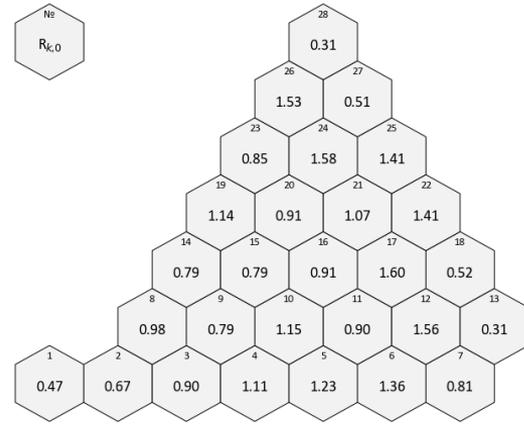


Рис. 2

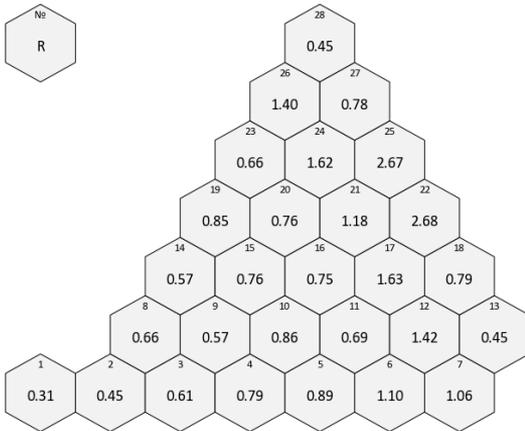


Рис. 3

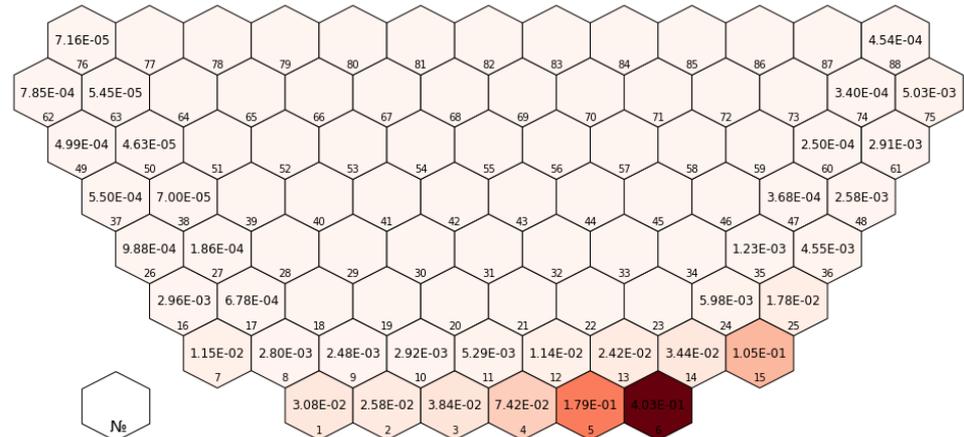


Рис. 1 Значения коэффициентов влияния ТВС на показания ИК № 16

# Результаты оценки функционалов, входящих в формулу «обобщенного метода сброса» в процессе сброса АЗ без «наиболее эффективного» ОР СУЗ в начале 1-ой, 2-ой и 3-ей кампаний реактора ВВЭР-1200



|                   | $\frac{\bar{q}_3}{\bar{q}_{3,0}}$ | $\frac{I_0}{I}$ |         |               |         | $b_1 = \frac{(e_k, R_{k,0})}{(e_k, R)}$ | $b_2 = \frac{(e_1, R)}{(e_1, R_{k,0})}$ |
|-------------------|-----------------------------------|-----------------|---------|---------------|---------|---|---|
|                   |                                   | измерение       |         | моделирование |         |   |   |
| <b>1 кампания</b> | 0,75                              | 17,7            |         | 17,6          |         | 0,7                                     | 1,63                                    |
| <b>2 кампания</b> | 0,7                               | ИК № 8          | ИК № 16 | ИК № 8        | ИК № 16 | 0,7                                     | 1,62                                    |
|                   |                                   | 19,0            | 21,9    | 21,5          | 24,8    |   |   |
| <b>3 кампания</b> | 0,69                              | ИК № 8          | ИК № 16 | ИК № 8        | ИК № 16 | 0,6                                     | 1,53                                    |
|                   |                                   | 23,8            | 26,5    | 24,0          | 27,1    |   |   |

\*Куликов В.И., Куракин К.Ю., Семенова Т.В. [и др.] Расчётное моделирование измерений на этапе физического пуска энергоблока № 1 Нововоронежской АЭС-2 /Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. – 2018. – № 1. – С. 55-60.

\*\*Жылмаганбетов Н.М., Попыкин А.И., Смирнова А.А., Старова Н.А., Кряквин Л.В., Денисова М.О.// Результаты расчётного моделирования измерений эффективности аварийной защиты, проведённых на этапе пуска 2-й и 3-й топливных кампаний энергоблока № 6 Нововоронежской АЭС / Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. – 2023. – № 2. – С. 27-33.

## Сопоставление значений эффективностей АЗ реактора энергоблока № 6 Нововоронежской АЭС

|                   | Измерение | Расчетное моделирование измерений | Обобщенный метод сброса |           | Условно-критическая задача RAINBOW |
|-------------------|-----------|-----------------------------------|-------------------------|-----------|------------------------------------|
|                   |           |                                   | Расч. токи              | Изм. токи |                                    |
| <b>1 кампания</b> | 8,1       | 7,9                               | 10,4                    | 10,5      | 10,8                               |
| <b>2 кампания</b> | 9,4       | 9,9                               | 13,1                    | 11,5      | 12,2                               |
| <b>3 кампания</b> | 10,5      | 10,7                              | 11,3                    | 11,0      | 12,3                               |

\*Куликов В.И., Куракин К.Ю., Семенова Т.В. [и др.] Расчётное моделирование измерений на этапе физического пуска энергоблока № 1 Нововоронежской АЭС-2 /Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. – 2018. – № 1. – С. 55-60.

\*\*Жылмаганбетов Н.М., Попыкин А.И., Смирнова А.А., Старова Н.А., Кряквин Л.В., Денисова М.О.// Результаты расчётного моделирования измерений эффективности аварийной защиты, проведённых на этапе пуска 2-й и 3-й топливных кампаний энергоблока № 6 Нововоронежской АЭС / Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. – 2023. – № 2. – С. 27-33.

# Выводы



- ✓ Авторами доклада развит метод расчетного моделирования измерений реактивности;
- ✓ Представлено описание способа расчета полной и без одного ОР СУЗ эффективности АЗ за один сброс ОР СУЗ на МКУ мощности по показаниям двух ИК;
- ✓ Представлено описание способа расчета эффективности АЗ в реакторах ВВЭР-1000, ВВЭР-1200, который позволяет связать непосредственно измеряемую величину — ток ИК с реактивностью, определяемой по формуле (1);
- ✓ Проведено сопоставление измеренной реактивности и реактивности, полученной с использованием обобщенного метода расчета реактивности для этапа физического пуска, в начале 2-ой и 3-ей топливных кампаний реактора ВВЭР-1200;
- ✓ Продемонстрированы удовлетворительные результаты применения развитого авторами доклада метода для реактора ВВЭР-1200.



**ETSON**

EUROPEAN  
TECHNICAL SAFETY  
ORGANISATIONS  
NETWORK

Спасибо за внимание!