

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ

КАФЕДРА ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ



БАЛАКОВСКАЯ АЭС АО «КОНЦЕРН РОСЭНЕРГОАТОМ»



**Сравнительный анализ коэффициентов реактивности для гадолиниевого и эрбиевого выгорающего поглотителя при использовании на удлиненных кампаниях в реакторах типа ВВЭР**

Обнинск 2024

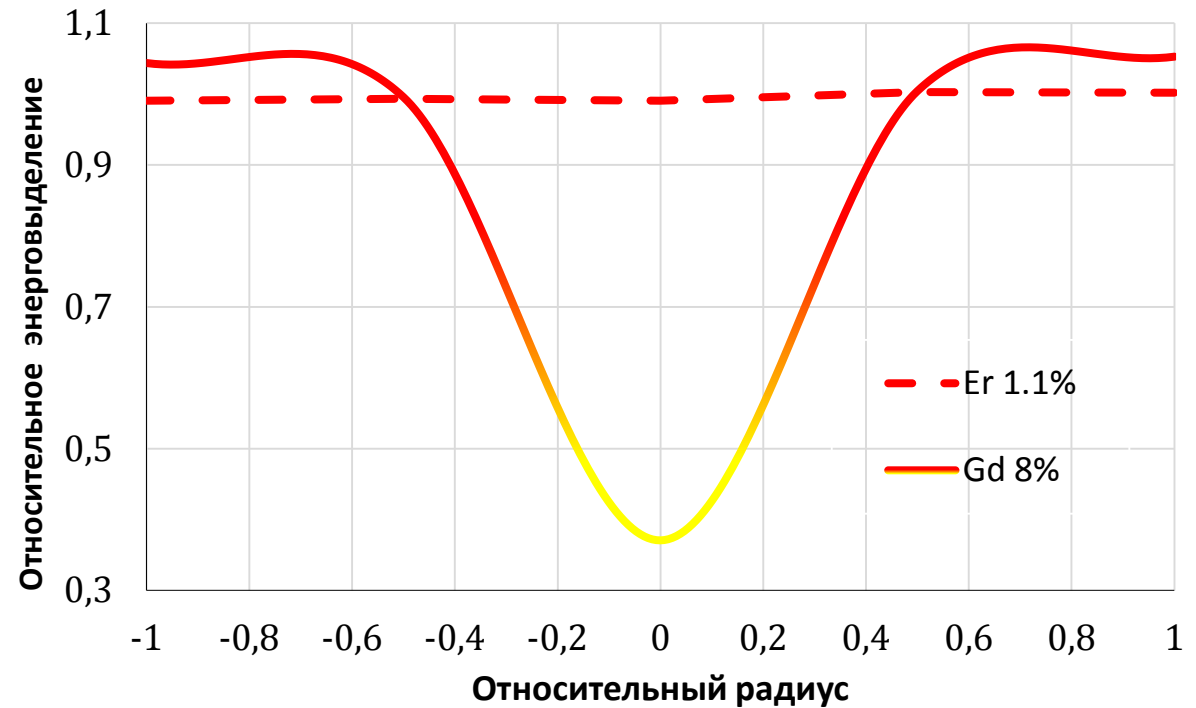
# Актуальность

В настоящее время для повышения экономической эффективности АЭС с реакторами типа ВВЭР осуществляются кампании длительностью 1,5 года. В перспективе рассматривается переход и на 2-х годовичные кампании. Применение удлиненных кампаний приводит к увеличению запаса реактивности реактора, который необходимо компенсировать как с помощью жидкостной системы, так и применением выгорающих поглотителей, интегрированных в топливную матрицу. Жидкостная система компенсации, основанная на растворении борного поглотителя в теплоносителе, является регулируемой и, в силу гомогенного размещения поглотителя по всей активной зоне, не вызывает локальных возмущений в распределении потока тепловых нейтронов и энерговыделения. Тем самым, не влияет на выгорание выгружаемого топлива. Однако наличие в теплоносителе дополнительного поглотителя негативно влияет на плотностной коэффициент реактивности, что накладывает ограничение на предельную концентрацию борного поглотителя в теплоносителе. Поэтому, для реализации удлиненных кампаний необходимо использовать выгорающие поглотители, интегрированные в топливную матрицу.

# Основная цель

Недостатки применения выгорающих поглотителей:

- Большое содержание гадолиния оказывает влияние на неравномерность энерговыделения.
- Однородное расположение эрбия не создает неравномерности энерговыделения по ТВС. Однако потеря в выгорании тем больше, чем выше содержание эрбиевого поглотителя в топливе.



Основная цель – Нейтронно-физическое обоснование применения эрбия в качестве выгорающего поглотителя для компенсации избыточной реактивности в реакторах типа ВВЭР-1200.

# Постановка задачи

Рассматривается возможность использования эрбиевого топлива в реакторе типа ВВЭР-1200 для компенсации избыточной реактивности вместо применяемой системы ТВЭГов с гадолинием, при этом основное внимание уделяется сравнению внутренне присущих свойств безопасности для обоих вариантов в качестве которых используются плотностной и температурный коэффициенты реактивности. Главный фактор, влияющий на плотностной коэффициент реактивности, является концентрация борного поглотителя в теплоносителе при использовании жидкостной системы реактивности.

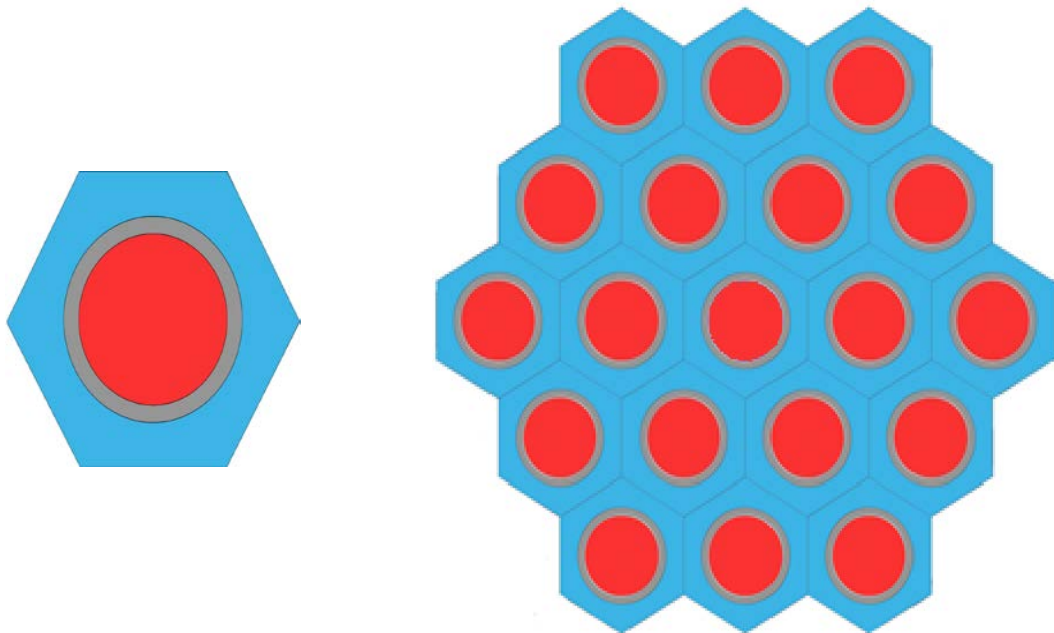


Рисунок – 1. Элементарная ячейка и полячейка

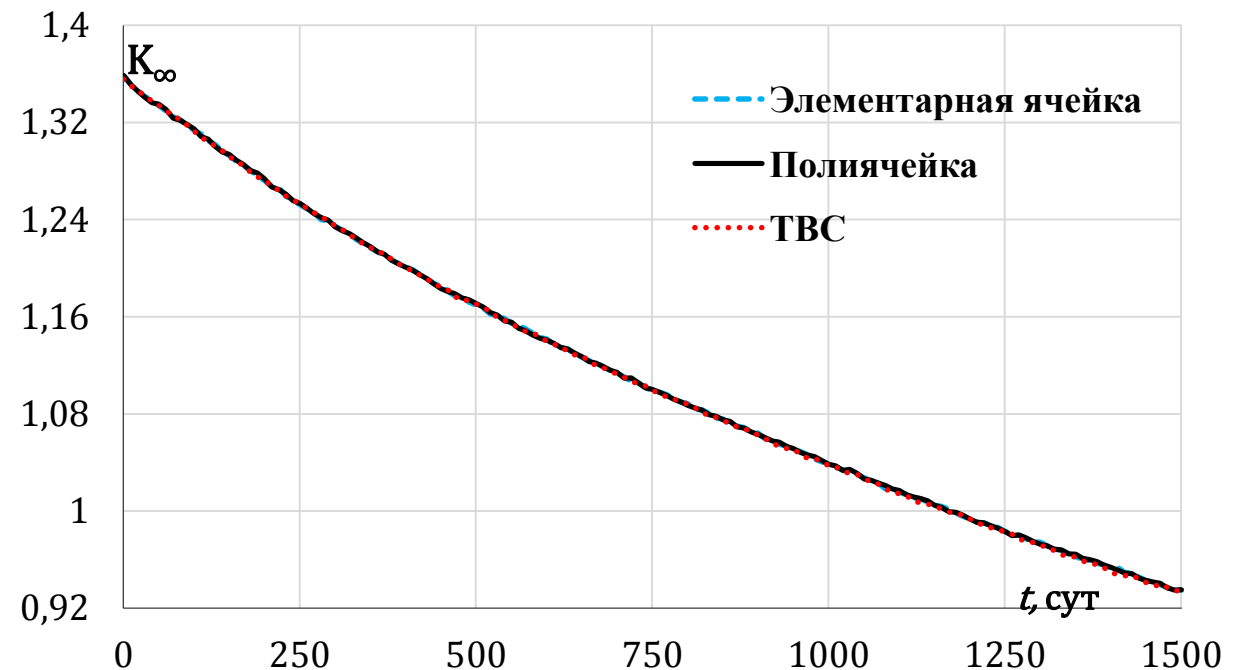


Рисунок – 2. Проверка зависимости  $K_{\infty}(t)$  для различных моделей

# Расчетный анализ

1. В качестве реперных приняты значения коэффициентов реактивности уран-водной ячейки моделирующей конец топливной кампании.
2. Для моделирования эрбиевого выгорающего поглотителя взята элементарная ячейка. Расчетная модель для гадолиния представляется полячейкой в центре которой располагается твэг окруженный двумя рядами твэлов. Содержание гадолиния принята равной 8% весовых по отношению к топливу.
3. В расчетных моделях содержание поглотителей в топливе задается, варьируется содержание борного поглотителя в теплоносителе и подбирается обогащение топлива для поддержания критичности.

$$\frac{\delta\rho}{\delta\gamma} = \frac{\Delta\rho}{\Delta\gamma} = \frac{1}{\Delta\gamma} \times \frac{(K_{\infty}(\gamma \pm \Delta\gamma) - 1)}{K_{\infty}(\gamma \pm \Delta\gamma)}$$

$$\frac{\delta\rho}{\delta\gamma} = \frac{\delta\rho^+}{\delta\gamma} + \frac{\delta\rho^-}{\delta\gamma}$$

$$K_{\infty} = \varphi \times \theta \times \mu \times \eta$$

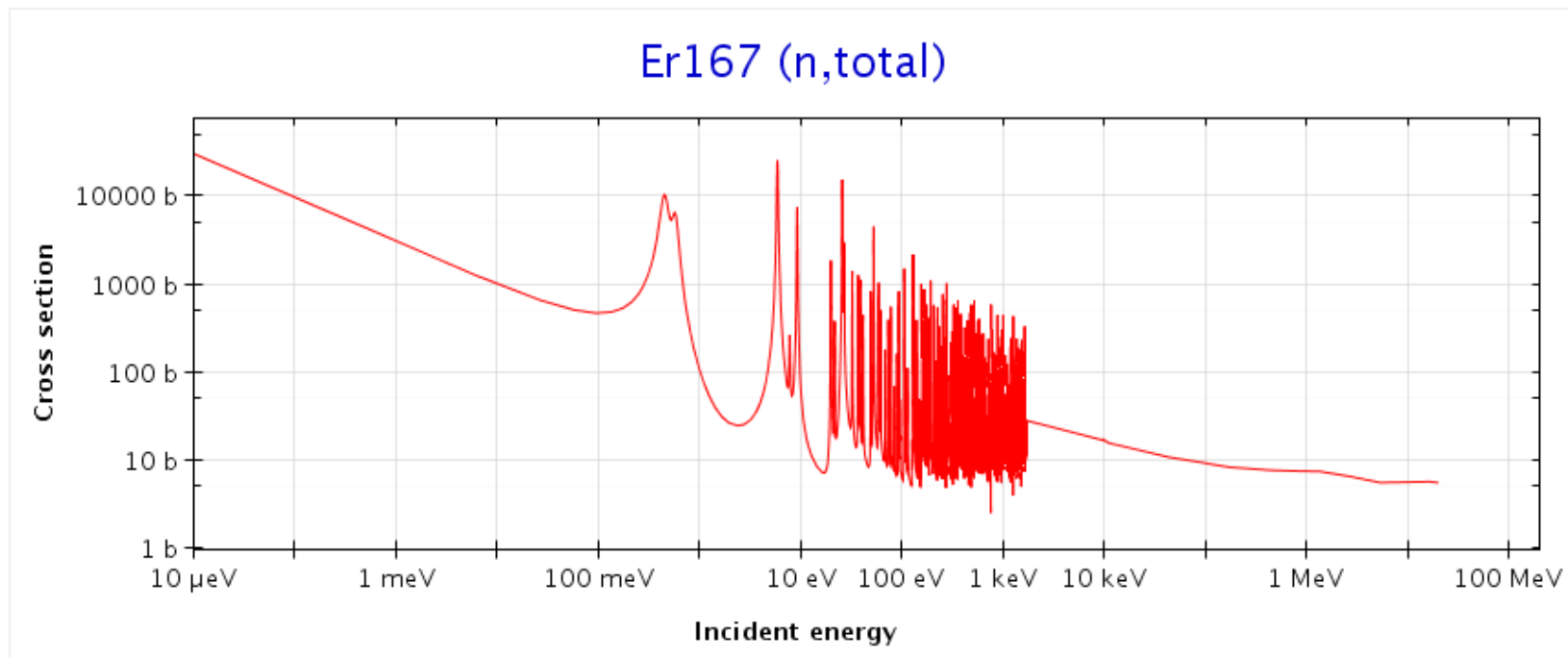
$$\frac{\delta\rho}{\delta T} = \frac{\Delta\rho}{\Delta T} = \frac{1}{\Delta T} \times \frac{(K_{\infty}(T \pm \Delta T) - 1)}{K_{\infty}(T \pm \Delta T)}$$

$$\frac{\delta\rho}{\delta T} = \frac{\delta\rho^+}{\delta T} + \frac{\delta\rho^-}{\delta T}$$

$$\frac{d\rho}{dT} = \frac{\delta\rho}{\delta T} + \frac{\delta\rho}{\delta\gamma} \times \frac{\delta\gamma}{\delta T}$$

Здесь:

$\frac{\delta\rho}{\delta\gamma}$   $\frac{\delta\rho}{\delta T}$  и  $\frac{d\rho}{dT}$  — плотностной, спектральный и полный температурный коэффициент реактивности;  $\Delta\rho$  — приращение реактивности;  $\Delta\gamma$  — приращение плотности теплоносителя;  $K_{\infty}$  — коэффициент размножения нейтронов;  $\mu$  — коэффициент размножения на быстрых нейтронах;  $\phi$  — вероятность избежать резонансного захвата;  $\theta$  — коэффициент использования тепловых нейтронов;  $\eta$  — выход нейтронов на одно поглощение;  $\Delta T$  — приращение температуры теплоносителя;  $\frac{\delta\gamma}{\delta T}$  — теплофизический параметр;



# Относительные значения коэффициентов реактивности для элементарной ячейки

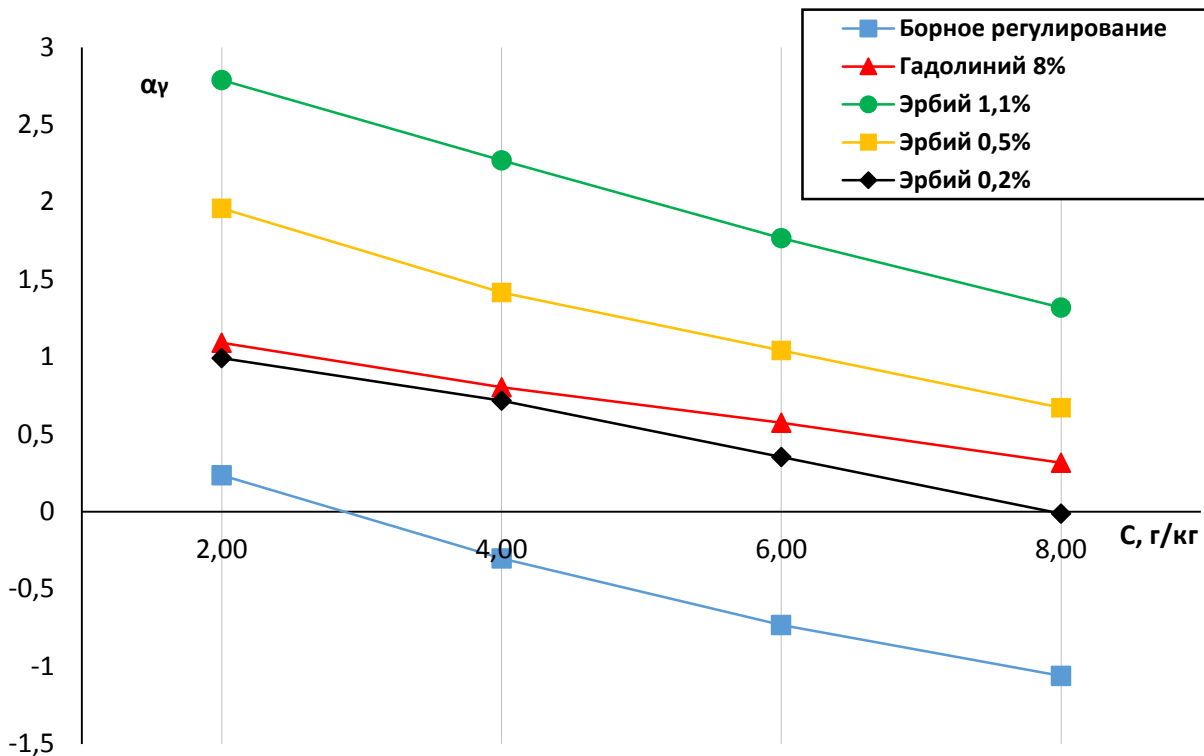


Рисунок – 3. Плотностной коэффициент реактивности

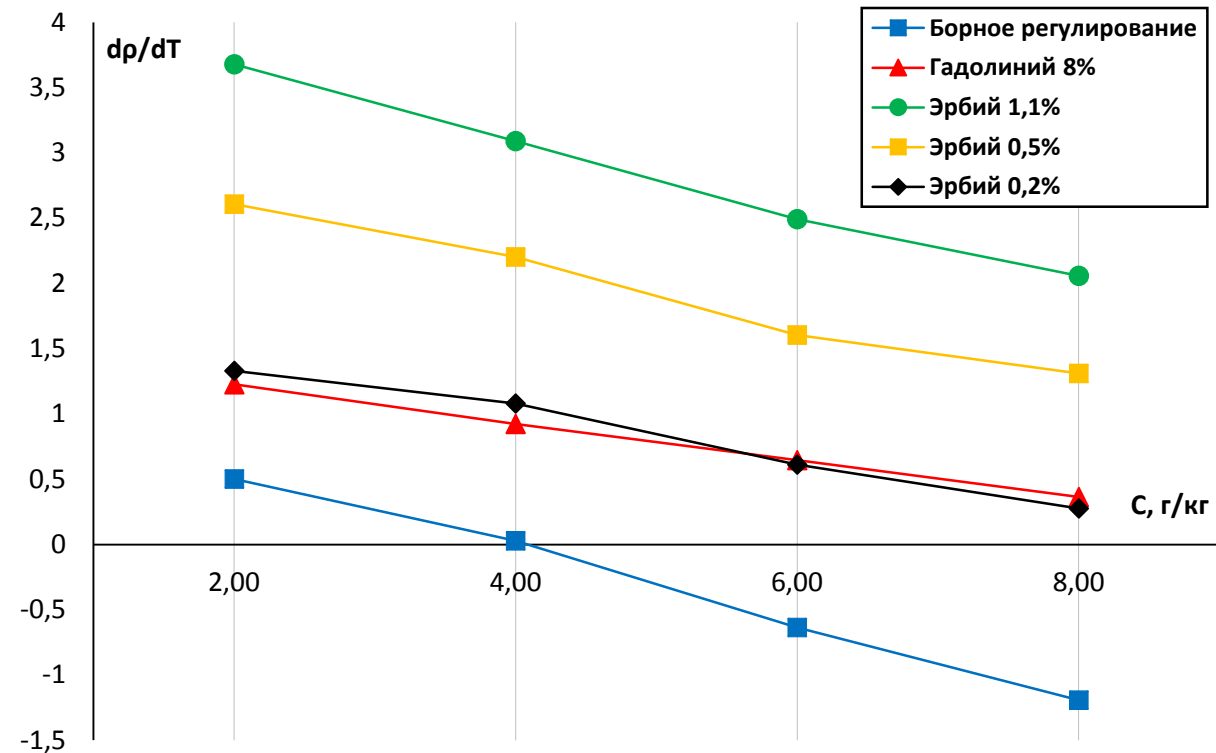


Рисунок – 4. Полный температурный коэффициент реактивности

# Частичные перегрузки

1. Рассматривается 3-х кратной перегрузкой без перестановок с обогащением топливом принято за 4,9 %

2. Предполагая условие критичности с учетом утечки нейтронов, определяется длительность кампании по следующей формуле:

$$K_{\infty}^{POLY}(T) = \frac{K_{\infty}^{TBC}(T) + K_{\infty}^{TBC}(2T) + K_{\infty}^{TBC}(3T)}{3} \quad 0 < t < T$$

В конце кампании  $K_{\infty}^{POLY}(T) = K_{\infty}^{krit} = 1,05$  из этого соотношения находится длина одной кампании. Здесь введены следующие обозначения:

$K_{\infty}^{POLY}(t)$  – коэффициент размножения полиячейки;

$K_{\infty}^{TBC}(t)$  – коэффициент размножения ТВС;

$K_{\infty}^{krit}$  – критическое значение коэффициента размножения активной зоны реактора;



# Модель для частичных перегрузок

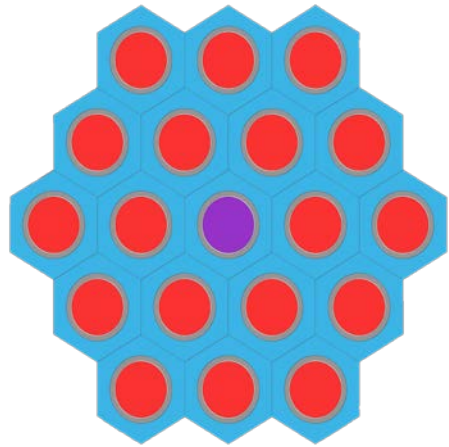


Рисунок – 5. Полячейка

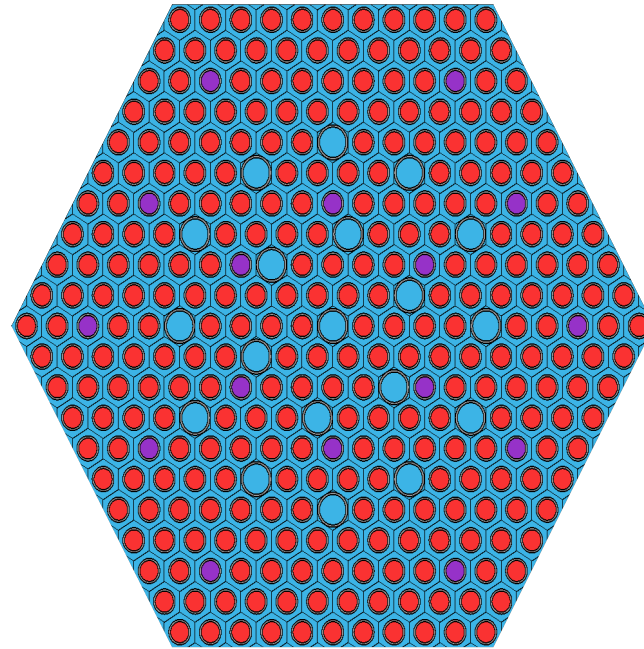
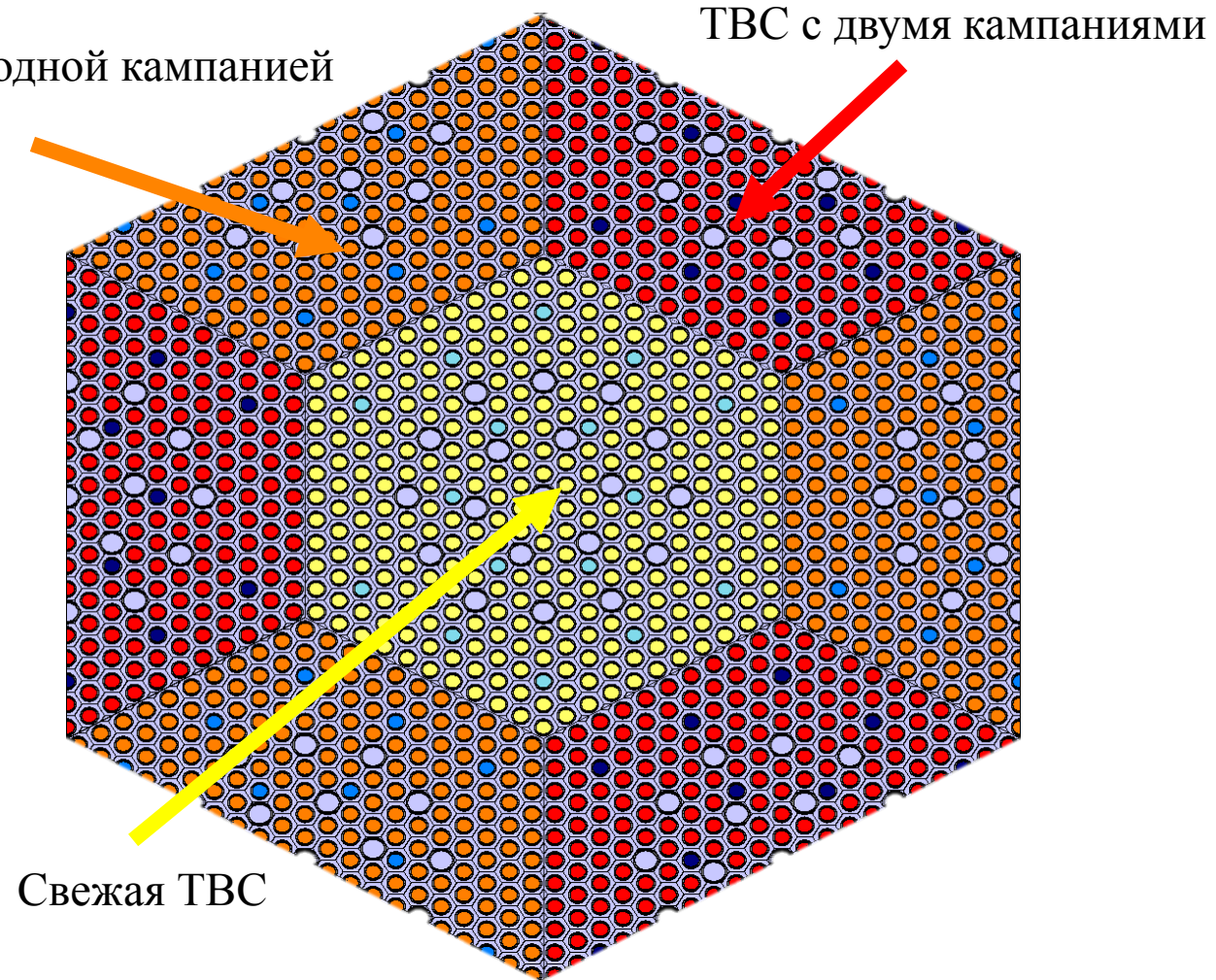


Рисунок – 6. Тепловыделяющая сборка

ТВС с одной кампанией



ТВС с двумя кампаниями

Свежая ТВС

Рисунок – 7. Периодический элемент активной зоны

## Проверка с остальными геометрическими моделями

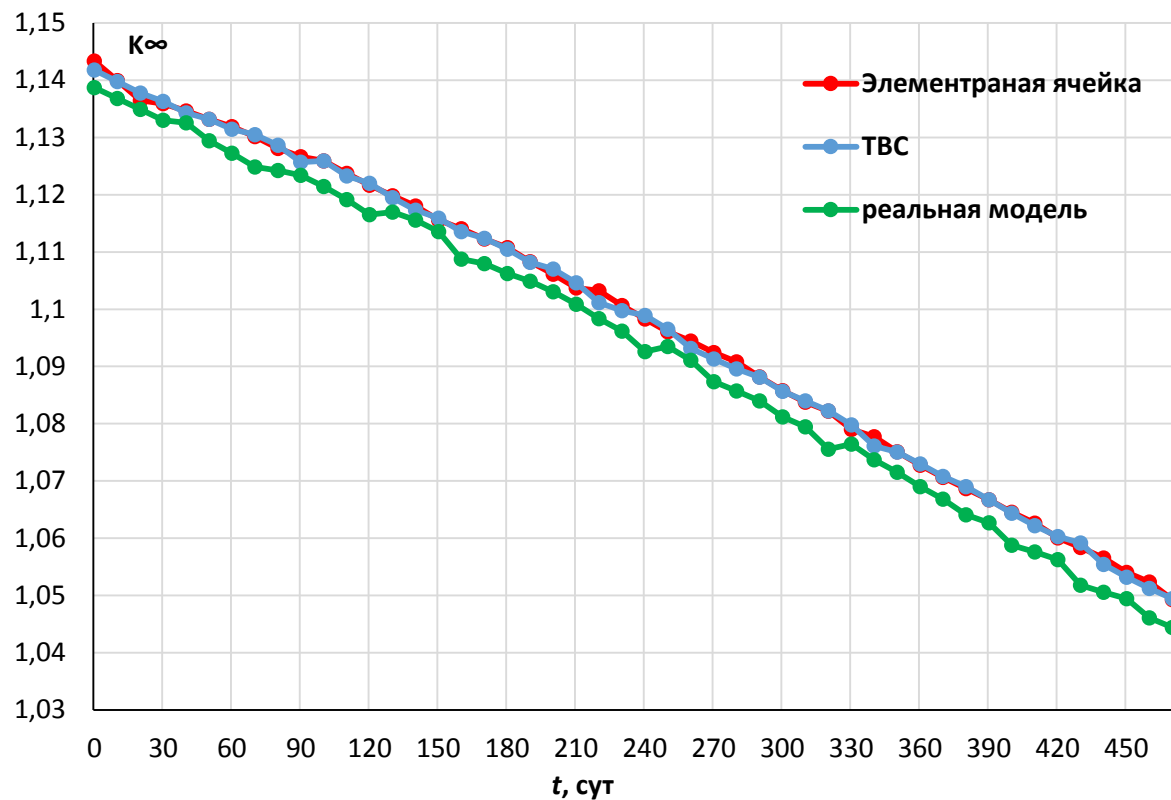


Рисунок – 8. Зависимость  $K_{\infty}^{POLY}(t)$  для эрбия

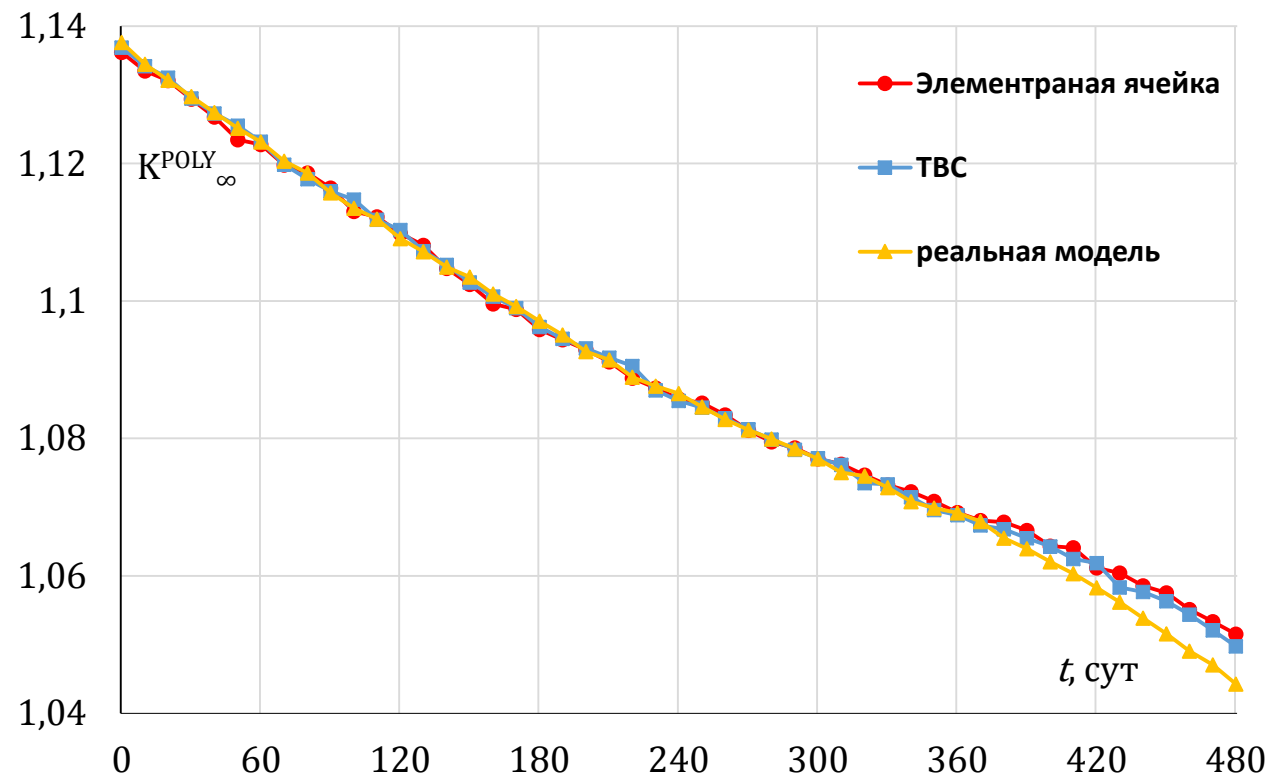


Рисунок – 9. Зависимость  $K_{\infty}^{POLY}(t)$  для гадолиния

# Относительные значения коэффициентов реактивности для модели частичных перегрузок

Er 1.1%		
плотностной	полный температурный	потери в выгорании, %
1.34	1.42	12

Er 0.5%		
плотностной	полный температурный	потери в выгорании, %
0.78	0.75	2

Er 0.2%		
плотностной	полный температурный	потери в выгорании, %
0.13	0.15	-

Gd 8%		
плотностной	полный температурный	потери в выгорании, %
0.56	0.53	-

## Выводы

В широком диапазоне изменения содержания борного поглотителя в теплоносителе значения плотностного и полного температурного коэффициента реактивности для вариантов с эрбием в качестве выгорающего поглотителя имеют более высокие амплитудные значения, чем для варианта с гадолинием.

По мере возрастания весового содержания эрбия в твэлах амплитудные значения указанных коэффициентов реактивности так же возрастают.

Для варианта с максимальным весовым содержанием гадолиния в твэгах был подобран вариант с весовым содержанием эрбия, при котором компенсируется одинаковая избыточная реактивность без потерь в выгорании топлива с эрбием.

**Спасибо за внимание !**