



Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору

Федеральное бюджетное учреждение
«Научно-технический центр по
ядерной и радиационной безопасности»



ETSON

EUROPEAN
TECHNICAL SAFETY
ORGANISATIONS
NETWORK

Учет неопределенностей в исходных данных при проведении расчетов эффективного коэффициента размножения активной зоны исследовательской ядерной установки

И.Г. Новаков
«Нейтроника-2019»
г. Обнинск

Цели и особенности работы



- ➔ *Неопределенности, обусловленные технологическими допусками и используемыми при расчетах приближениях могут оказывать существенное влияние на параметры ЯБ*
- ➔ *Некорректный учет неопределенностей исходных данных может привести к искажению получаемых результатов и, следовательно некорректной оценке нейтронно-физических характеристик ЯУ*
- ➔ *В настоящей работе на примере ЯУ проведен анализ влияния основных возможных неопределенностей на параметры ЯБ*
- ➔ *В качестве примера ЯУ выбран исследовательский ядерный реактор ПИК, который характеризуется рядом специфических особенностей*

НП-001-15

ФЕДЕРАЛЬНЫЕ НОРМЫ И ПРАВИЛА
в области использования атомной энергии

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ
ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ
АТОМНЫХ СТАНЦИЙ

НП-001-15

НП-033-11

ФЕДЕРАЛЬНЫЕ НОРМЫ И ПРАВИЛА
в области использования атомной энергии

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ
ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК

НП-033-11

НП-009-17

ФЕДЕРАЛЬНЫЕ НОРМЫ И ПРАВИЛА
в области использования атомной энергии

ПРАВИЛА ЯДЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РЕАКТОРОВ

НП-009-17

- ✓ **п. 1.2.9 НП-001-15**
анализы безопасности должны сопровождаться оценками погрешностей и неопределенностей получаемых результатов
- ✓ **п. 1.2.5 НП-033-11**
проект ИЯУ необходимо разрабатывать на основе консервативного подхода (должны использоваться параметры и характеристики ИЯУ, приводящие к наихудшим результатам)
- ✓ **п. 10 НП-009-17**
Запас реактивности ИР должен быть определен в проекте ИЯУ с учетом возможных отклонений параметров от номинальных значений

- ➔ *Разработка расчетных моделей ИЯУ как для нормальной эксплуатации, так и для нарушений нормальной эксплуатации*
- ➔ *Определение перечня параметров, неопределенности в которых могут оказывать значимое влияние на обеспечение ЯБ*
- ➔ *Анализ влияния неопределенностей на величину $K_{эфф}$ активной зоны*

Общие сведения о ИЯУ ПИК



Предназначен для проведения широкого круга работ в области

- ✓ *ядерной физики и физики слабого взаимодействия*
- ✓ *физики конденсированного состояния*
- ✓ *структурной и радиационной биологии и биофизики*
- ✓ *радиационной физики и химии*

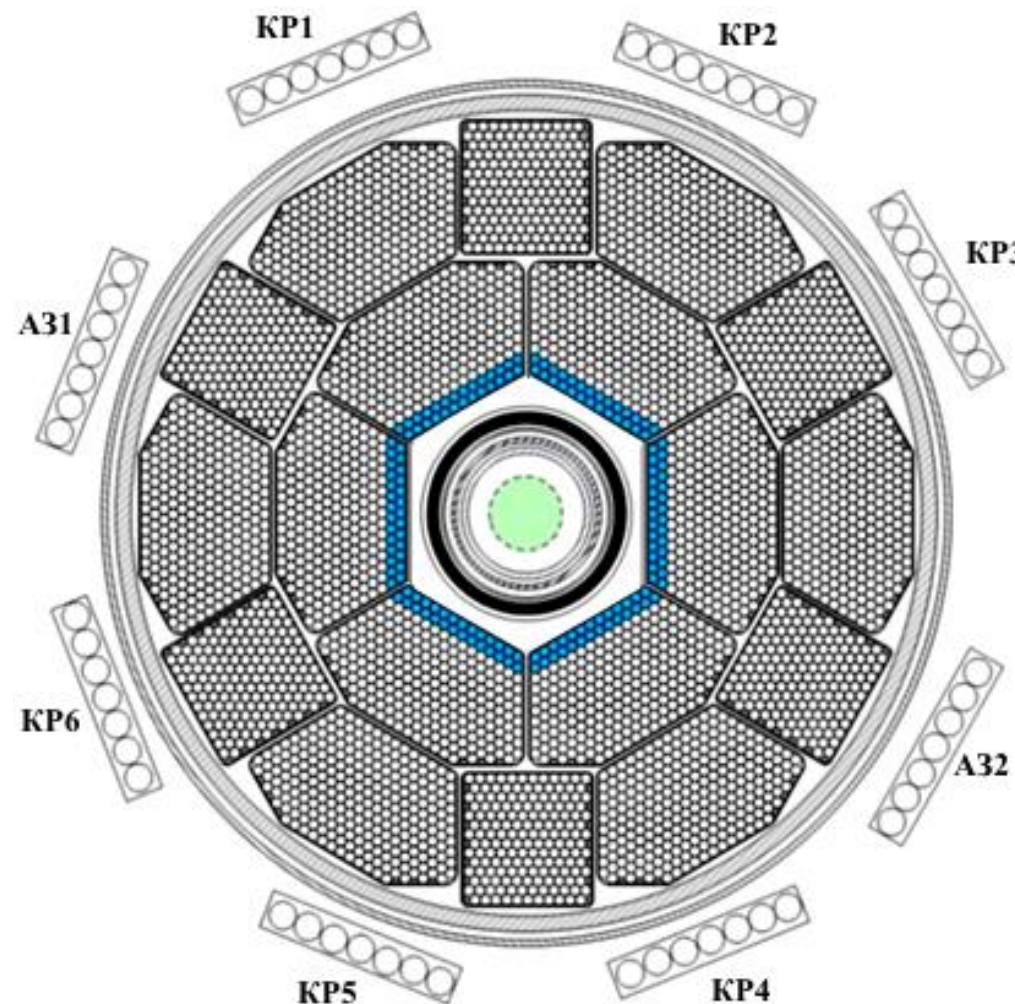


В настоящее время на ИЯУ ПИК проводятся испытания для перехода в режим освоения мощности до 10 МВт

Основные характеристики ИЯУ ПИК

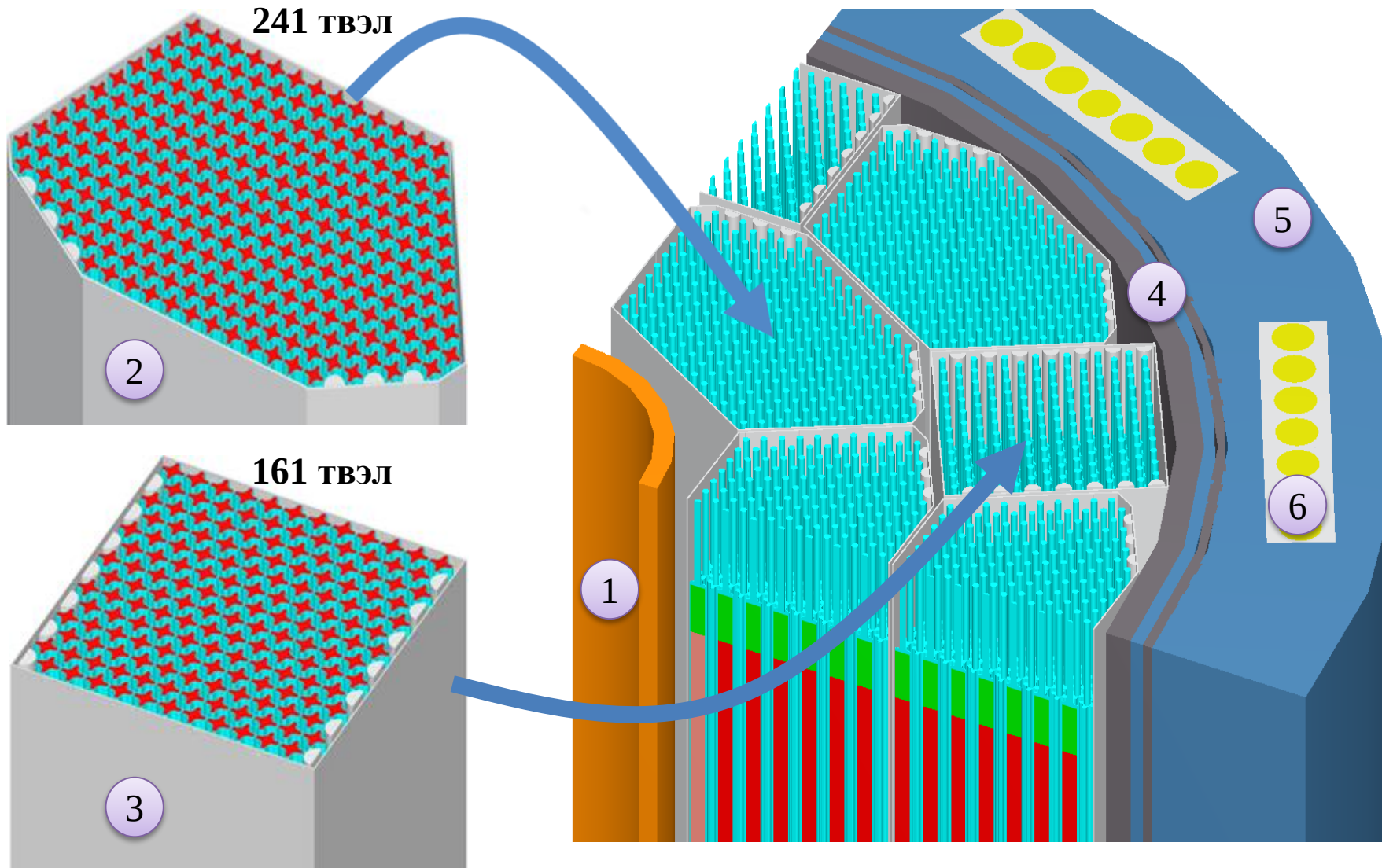


- ✓ *Максимальная тепловая мощность – 100 МВт*
- ✓ *Максимальная плотность потока тепловых нейтронов – $5 \cdot 10^{15} \text{ н/см}^2 \cdot \text{с}$*
- ✓ *Максимальное объемное энерговыделение – 6,6 МВт/л*
- ✓ *Топливо – UO_2 , диспергированный в медно-бериллиевой матрице, с обогащением 90 % по ^{235}U*
- ✓ *Уникальная форма твэлов*
- ✓ *Уникальная конструкция РО АЗ*
- ✓ *Отражатель – тяжелая вода*



Разрез активной зоны РУ ПИК

Описание расчетных моделей

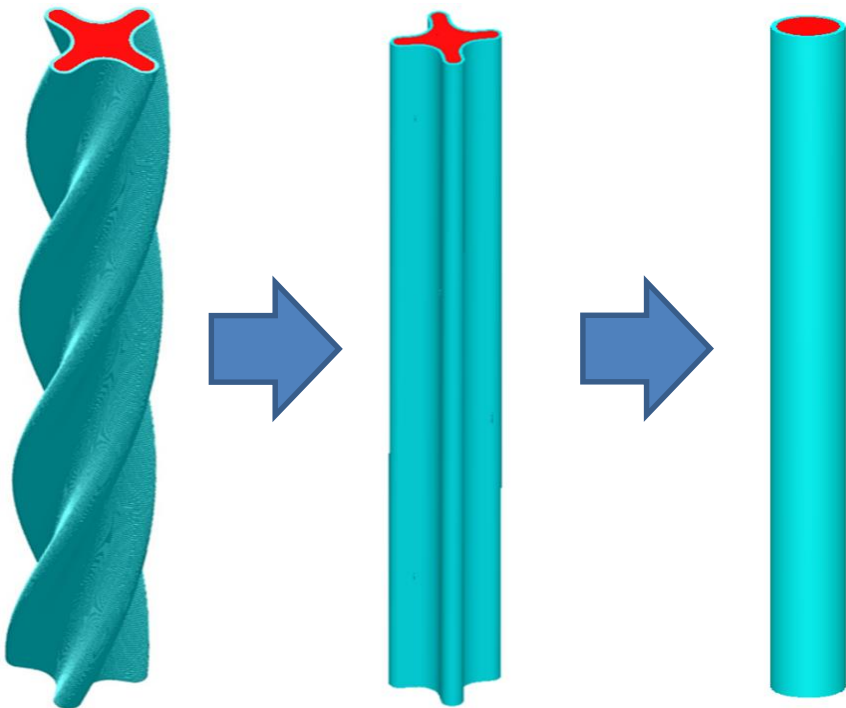


- 1 – центральные РО АЗ*
- 2 – шестигранная ТВС*
- 3 – квадратная ТВС*
- 4 – корпус активной зоны*
- 5 – отражатель*
- 6 – РО СУЗ на периферии*

Основные возможные источники неопределенностей



✓ Упрощения геометрической модели



✓ Технологические допуски на материалы

Обогащение топлива по ^{235}U

Плотность топлива

Высота топливного столба

Плотность поглощающих элементов РО СУЗ

Содержание изотопа ^{177}Hf в РО АЗ

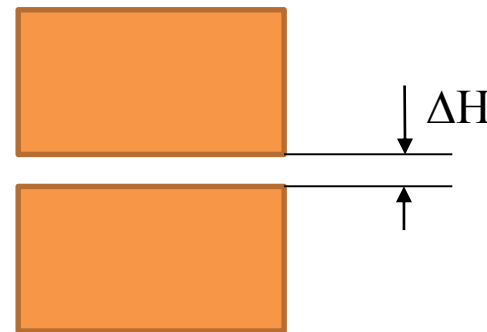
✓ Эксплуатационные параметры

Положение центральных РО АЗ («шторок»)

Температура топлива

Плотность теплоносителя

Плотность отражателя



Положение центральных РО АЗ («шторок»)

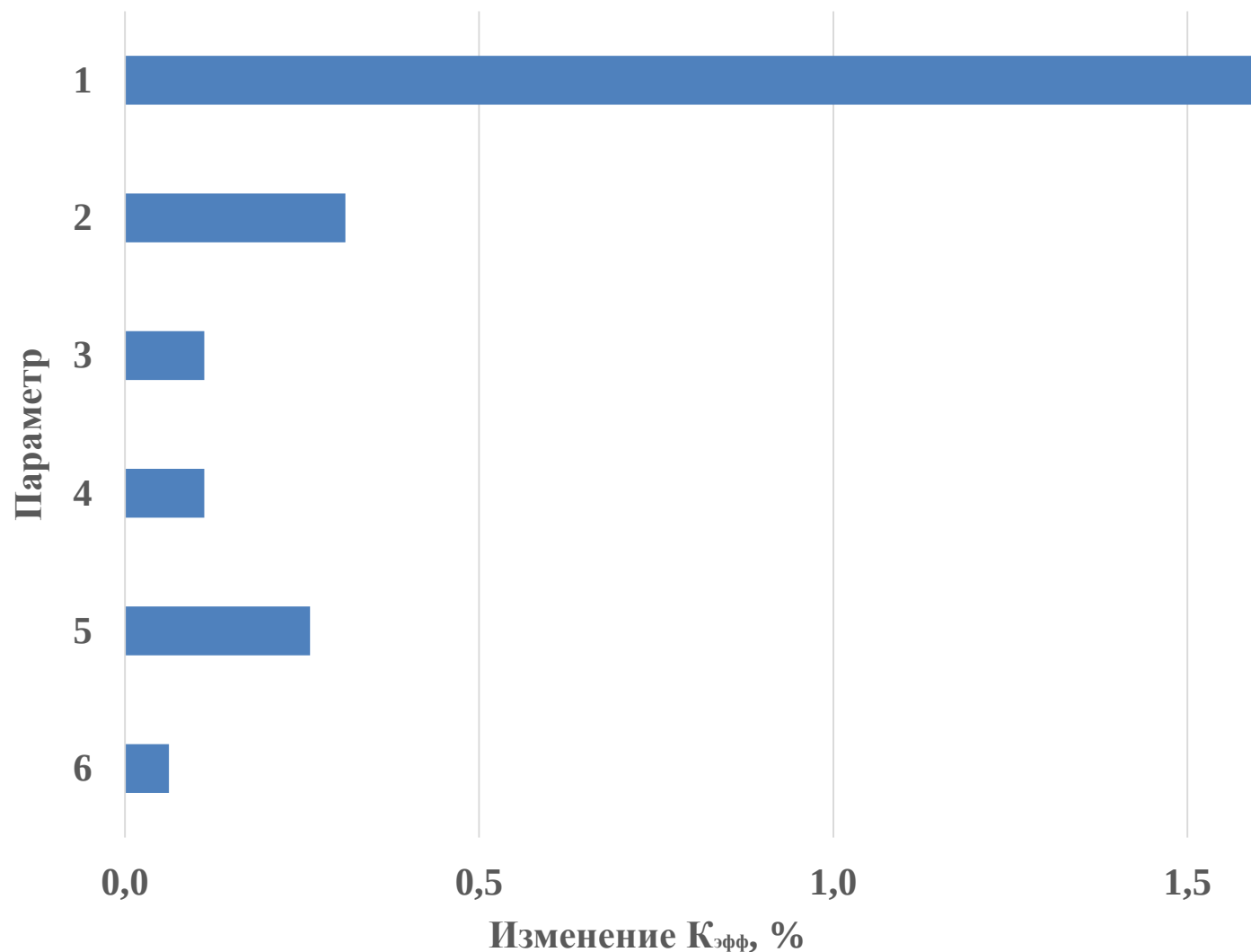
Коэффициент чувствительности функционала F определяется по формуле

$$P_{F,i}(x_i = x_{i,0}) = P_i = \frac{\partial F(\{x_i\}_{i=1}^N)}{\partial (x_i)} \Big|_{x_i=x_{i,0}} = \lim_{\Delta x_i \rightarrow 0} \left(\frac{\frac{F(x_{i,0} + \Delta x_i) - F(x_{i,0})}{F(x_{i,0})}}{\frac{\Delta x_i}{x_{i,0}}} \right)$$

*Предположения теории малых возмущений
(линейная зависимость $K_{эфф}$)*

$$\frac{K_{эфф}(x_{i,0} + \Delta x_i) - K_{эфф}(x_{i,0})}{K_{эфф}(x_{i,0})} = \sum_{i=1}^N P_{x_i} \cdot \Delta x_i$$

Результаты проведенного исследования при нормальной эксплуатации ИЯУ ПИК (1/2)



1 – цилиндрическая форма твэла

2 – обогащение по ^{235}U

3 – плотность топлива

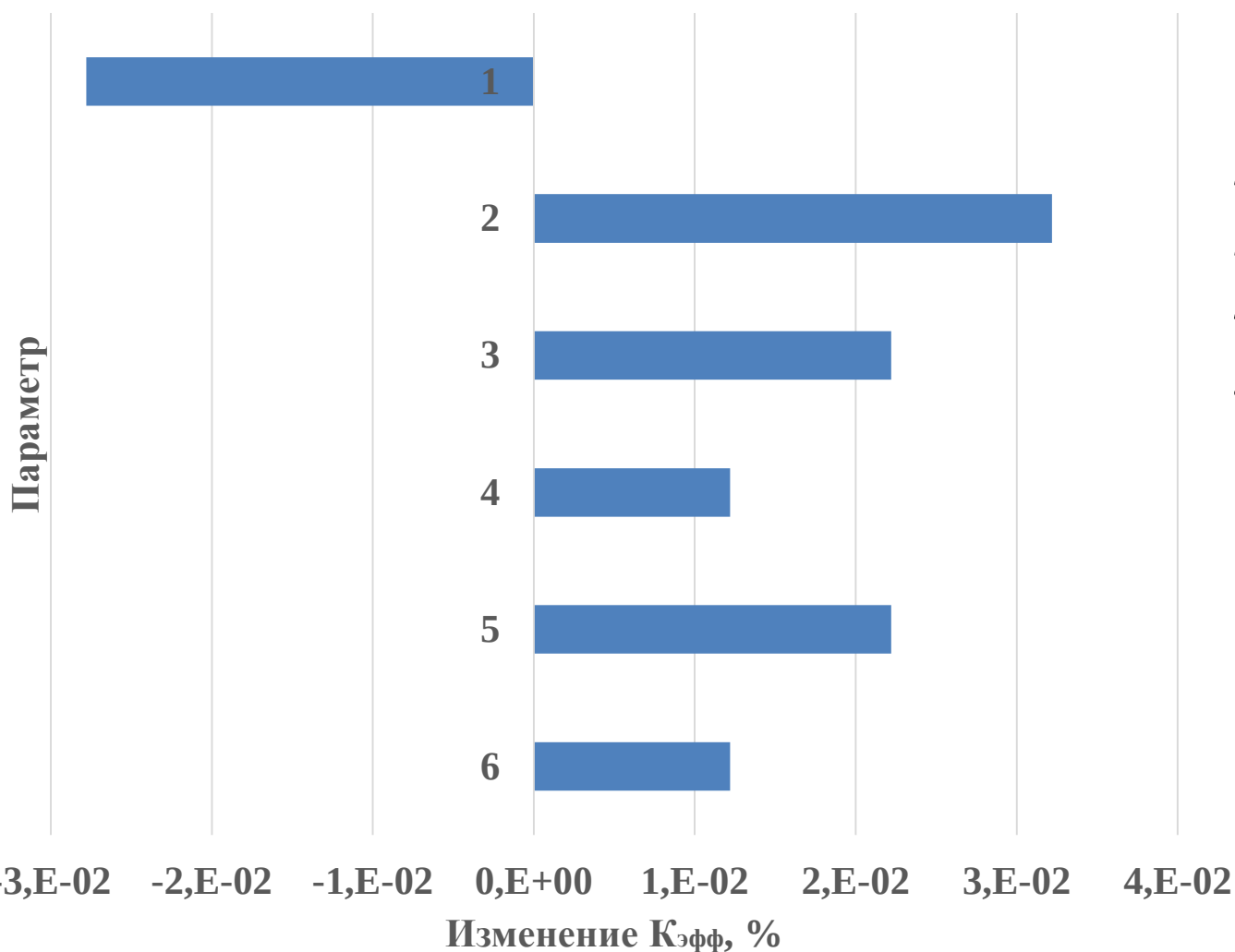
4 – высота топливного столба

5 – плотность теплоносителя

6 – плотность отражателя

Неопределенность расчета $K_{эфф}$, обусловленная указанными факторами, может достигать значительных величин

Результаты проведенного исследования при нормальной эксплуатации ИЯУ ПИК (2/2)



1 – неспиралевидная крестообразная форма твэла

2 – расстояние между «шторками»

3 – температура топлива

4 – плотность металлического гафния

5 – содержание изотопа ^{177}Hf в РО АЗ

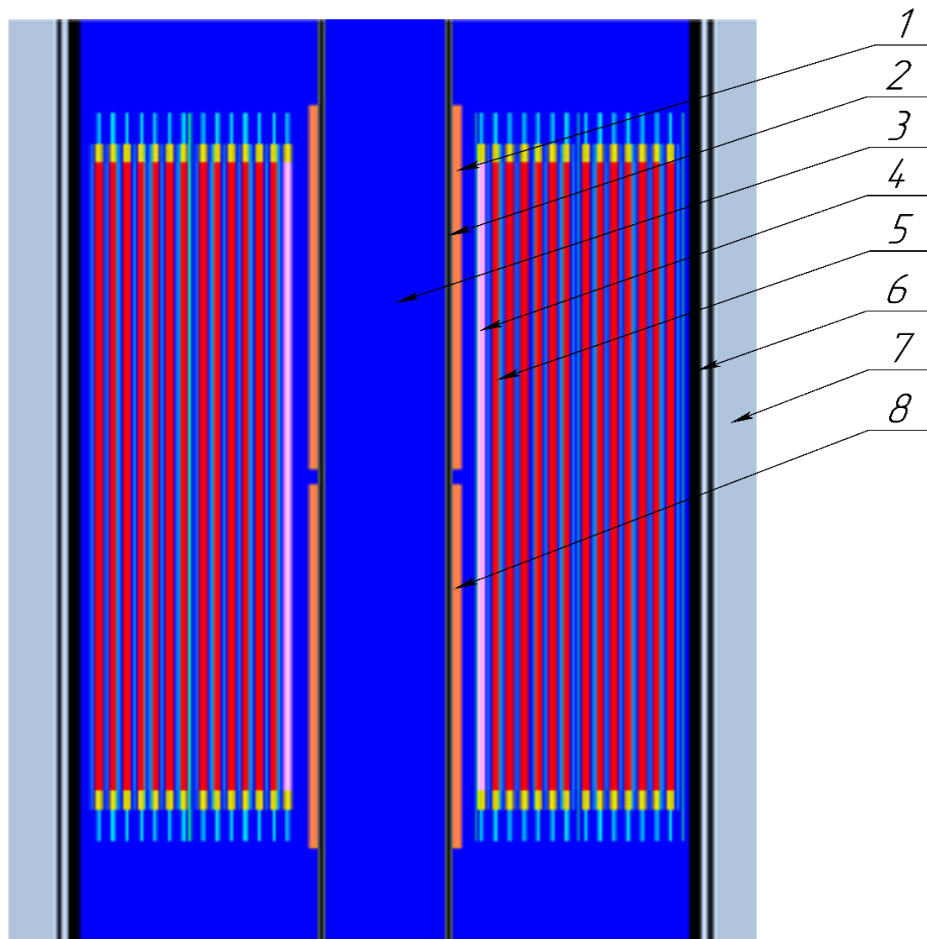
6 – плотность Eu_2O_3

Вклад указанных факторов не превышает статистической погрешности расчетов

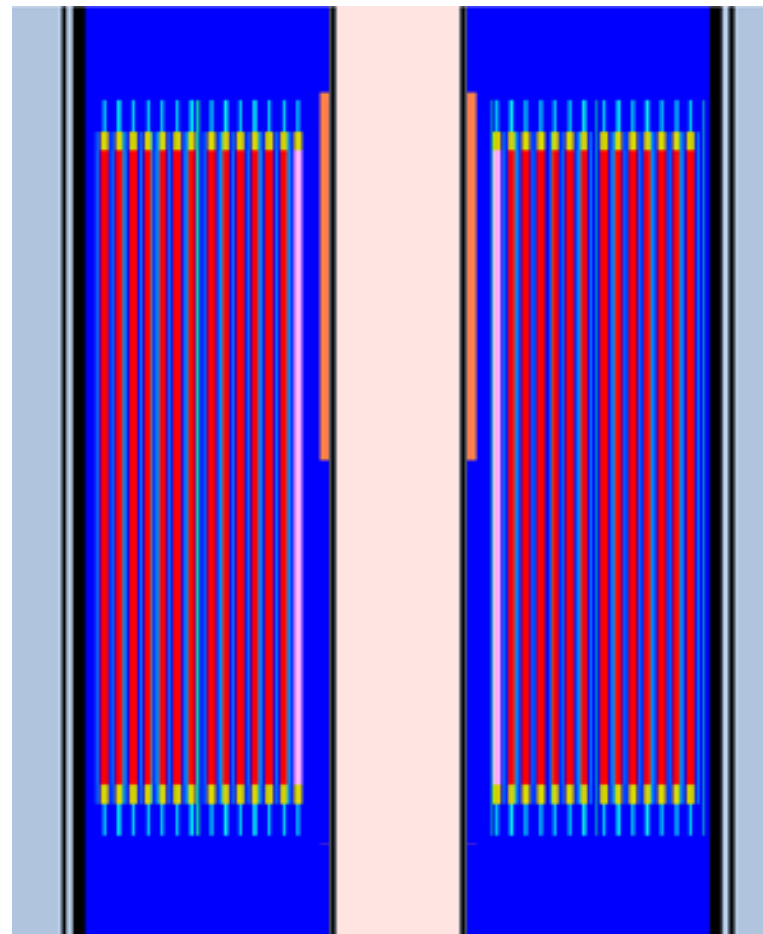
Результаты проведенного исследования при нарушениях нормальной эксплуатации ИЯУ ПИК (1/3)



Сечение расчетной модели активной зоны РУ ПИК



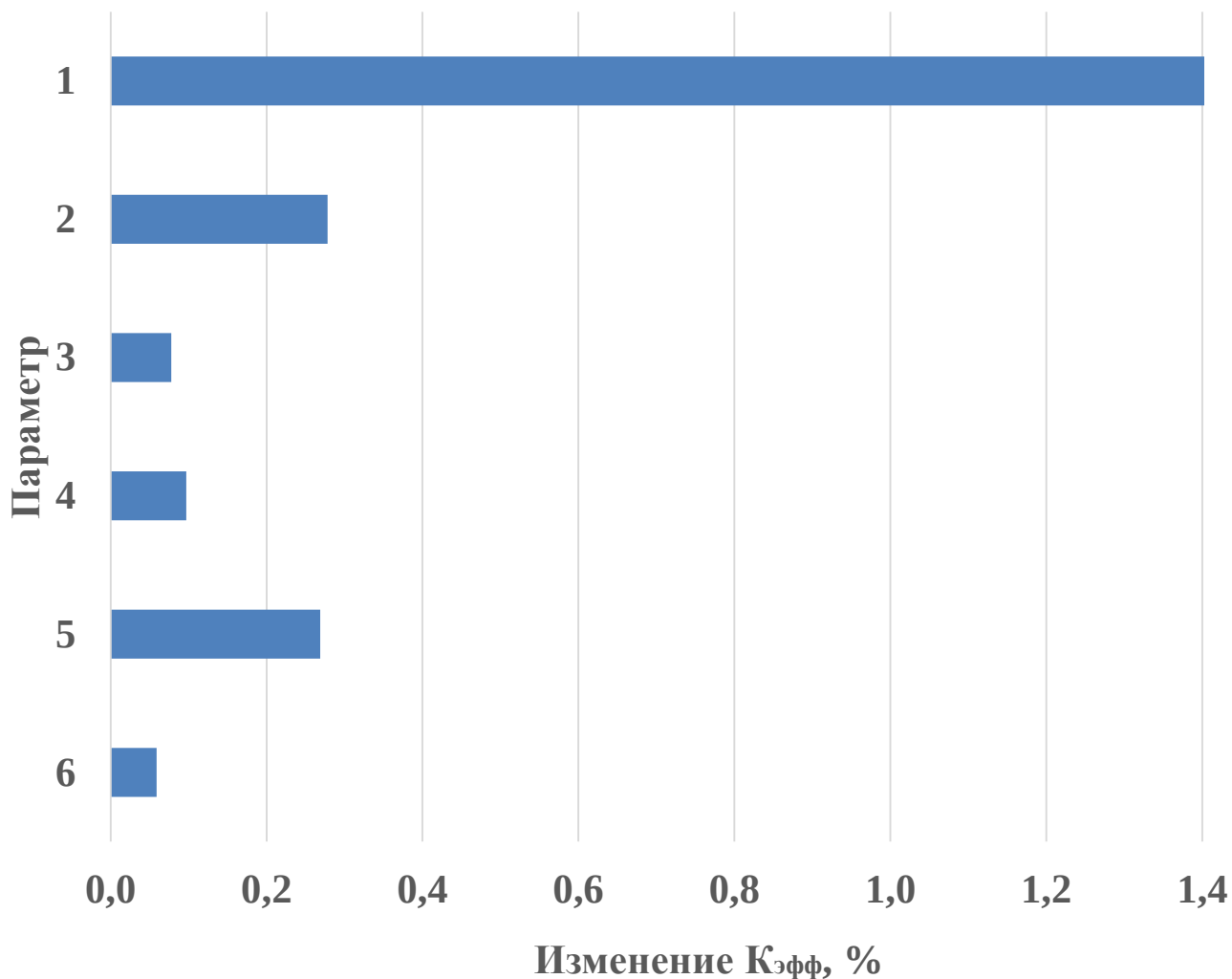
Нормальная эксплуатация



Нарушение нормальной эксплуатации

- 1 – верхняя «шторка»
- 2 – ЦЭК
- 3 – теплоноситель
- 4 – ТВЭЛ с 2,38 г ^{235}U
- 5 – ТВЭЛ с 7,14 г ^{235}U
- 6 – корпус активной зоны
- 7 – отражатель
- 8 – нижняя «шторка»

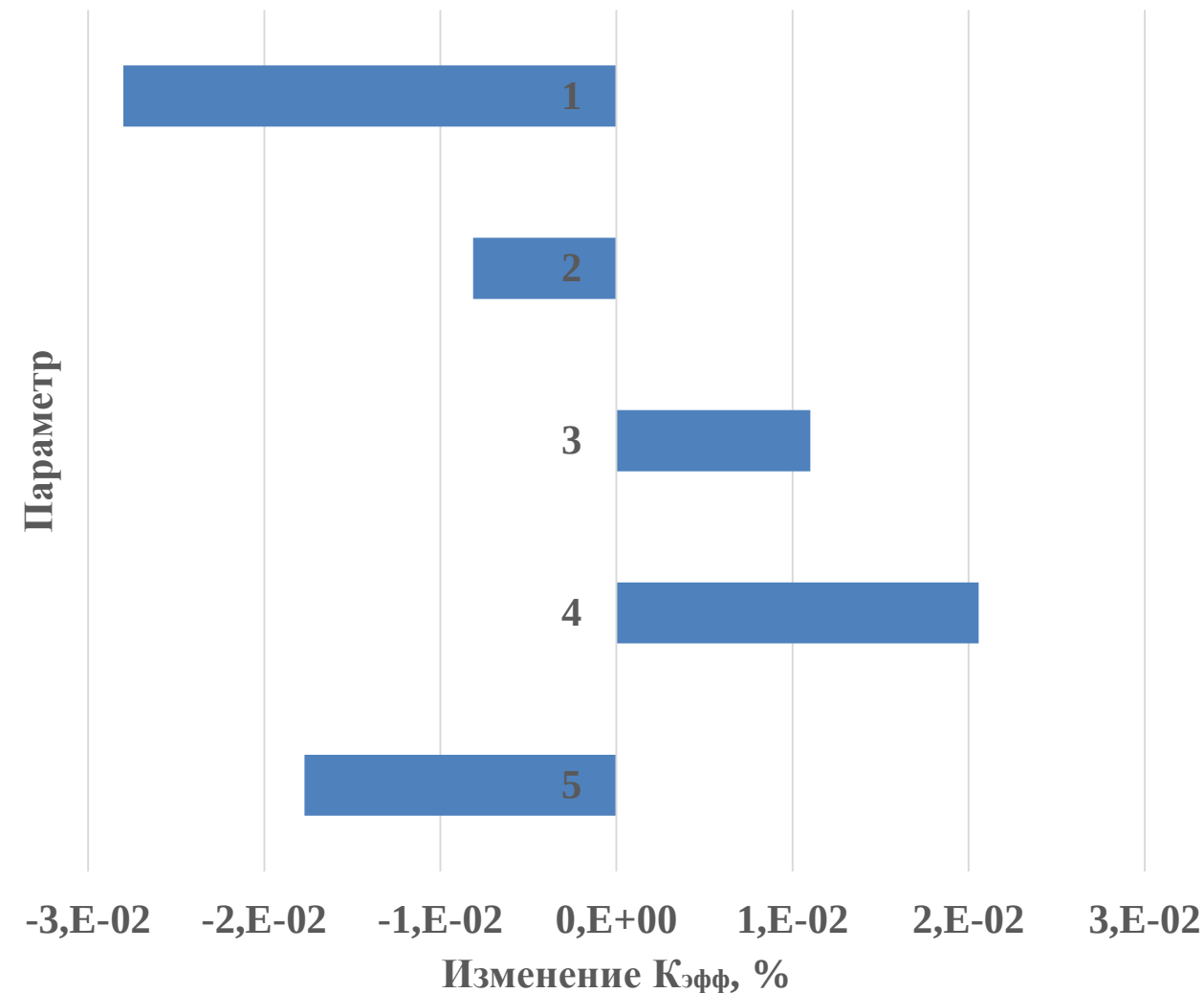
Результаты проведенного исследования при нарушениях нормальной эксплуатации ИЯУ ПИК (2/3)



- 1 – цилиндрическая форма твэла*
- 2 – обогащение по ^{235}U*
- 3 – плотность топлива*
- 4 – высота топливного столба*
- 5 – плотность теплоносителя*
- 6 – плотность отражателя*

Неопределенность расчета $K_{эфф}$, обусловленная указанными факторами, может достигать значительных величин

Результаты проведенного исследования при нарушениях нормальной эксплуатации ИЯУ ПИК (3/3)



1 – неспиралевидная крестообразная форма твэла

2 – температура топлива

3 – плотность металлического гафния

4 – содержание изотопа ^{177}Hf в РО АЗ

5 – плотность Eu_2O_3

Вклад указанных факторов не превышает статистической погрешности расчетов

- ✓ *Отказ от учета неопределенностей противоречит принципу консервативного подхода, установленному в ФНП и требованиям пунктов 1.2.5 НП-033-11 и 10 НП-009-17*
- ✓ *Некорректный учет неопределенностей в исходных данных может привести к занижению реальной величины подкритичности ЯУ в различных режимах нормальной эксплуатации, а также при нарушениях нормальной эксплуатации*
- ✓ *Наибольший вклад могут оказывать применяемые упрощения геометрии, а также неопределенности в задании технологических и эксплуатационных параметров, связанных с обогащением ^{235}U , плотностью топлива, высотой топливного столба, а также плотностями теплоносителя и отражателя*



Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору

Федеральное бюджетное учреждение
«Научно-технический центр по
ядерной и радиационной безопасности»



Спасибо за внимание!