

Определение константной составляющей расчетного сдвига коэффициента размножения для начальной загрузки реактора ПИК ТВС ПИК-2.

Онегин М.С.

НЕЙТРОНИКА-2024
Обнинск, 28 – 31 мая 2024 г.

Переход на активную зону с ТВС ПИК-2

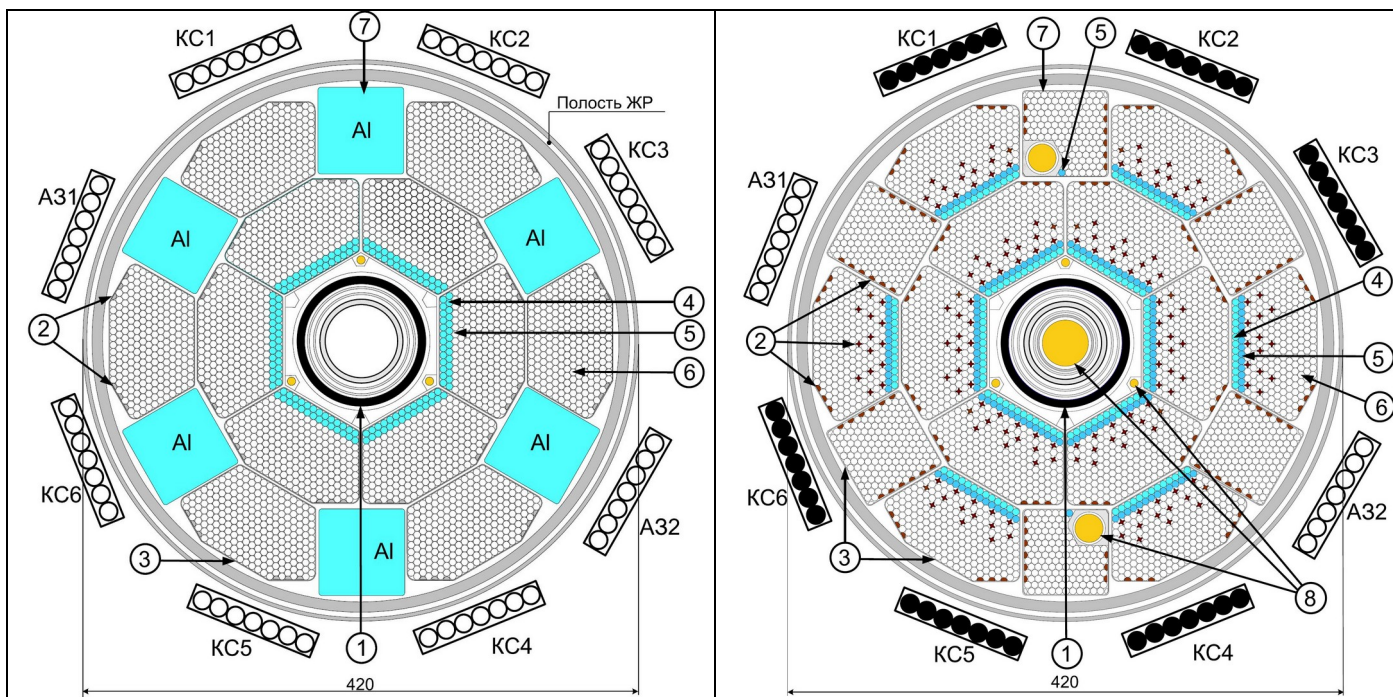


Рис. 1. Пусковая активная зона реактора ПИК на основе ТВС ПИК-1 при энергетическом пуске

- 1 – поглощающие шторки из гафния;
- 2 – вытеснители из нержавеющей стали в ТВС;
- 3 – чехлы ТВС из нержавеющей стали;
- 4 – твэлы с топливной загрузкой 0,33 номинала (2 ряда);
- 5 – твэлы с номинальным содержанием ^{235}U ;
- 6 – ТВС без топливного профилирования;
- 7 –алюминиевый вытеснитель.

Рис. 2 Активная зона реактора ПИК на основе ТВС ПИК-2

- 1 – поглощающие шторки из гафния;
- 2 – стержни выгорающего поглотителя (СВП) крестообразного и полуцилиндрического профиля на основе $\text{Gd}_2\text{O}_3+\text{ZrO}_2$;
- 3 – циркониевые чехлы ТВС;
- 4 – твэлы с топливной загрузкой 0,38 номинала;
- 5– твэлы с топливной загрузкой 0,69 номинала;
- 6– твэлы с увеличенным номинальным содержанием топлива;
- 7 – ТВС с образцами-свидетелями применяемых конструкционных материалов;
- 8– облучаемые образцы.

В настоящее время общепринято, что разница между бенчмарк-экспериментами по определению критичности и расчетами по прецизионным программам **обусловлены неточностями ядерных данных.**

- Под расчетами по прецизионным программам понимаются расчеты методом Монте-Карло с учетом всех особенностей геометрии и с хорошо определенным нуклидным составом.

- Под ядерными данными понимаются файлы оцененных нейтронных данных, например ENDF/B-7.1, РОСФОНД-2010 или др.

Таким образом, в случае, если требуется сделать какие-то предсказательные расчеты коэффициента размножения нейтронов какой-то новой системы требуется определить вероятное отклонение расчетных значений от реальных значений.

Раньше для этого собиралась критическая сборка с ТВС исследуемой системы и экспериментально определялась критическая конфигурация. Затем или определялся сдвиг расчетного значения коэффициента размножения, вычисленного с использованием определенной базы ядерных данных, или параметры расчетной модели варьировались в допустимых пределах, чтобы расчет предсказывал правильное значение коэффициента размножения.

Вопрос: можно ли обойтись вообще без критических сборок, особенно в том случае, когда в процессе эксплуатации возникает множество конфигураций содержащих делящиеся материалы?

Одним из методов решения такой задачи стало создание библиотеки критических сборок – **ICSBEP**. Данная библиотека содержит порядка 2000 детальных описаний критических экспериментов с различными типами и видами ядерного топлива. Нас интересуют эксперименты с высокообогащенным урановым топливом с использованием диоксида урана и водным замедлителем или растворные эксперименты. Имеются там и эксперименты и с твэлами типа СМ, в том числе с гадолиниевыми и самариевыми поглотителями в активной зоне.

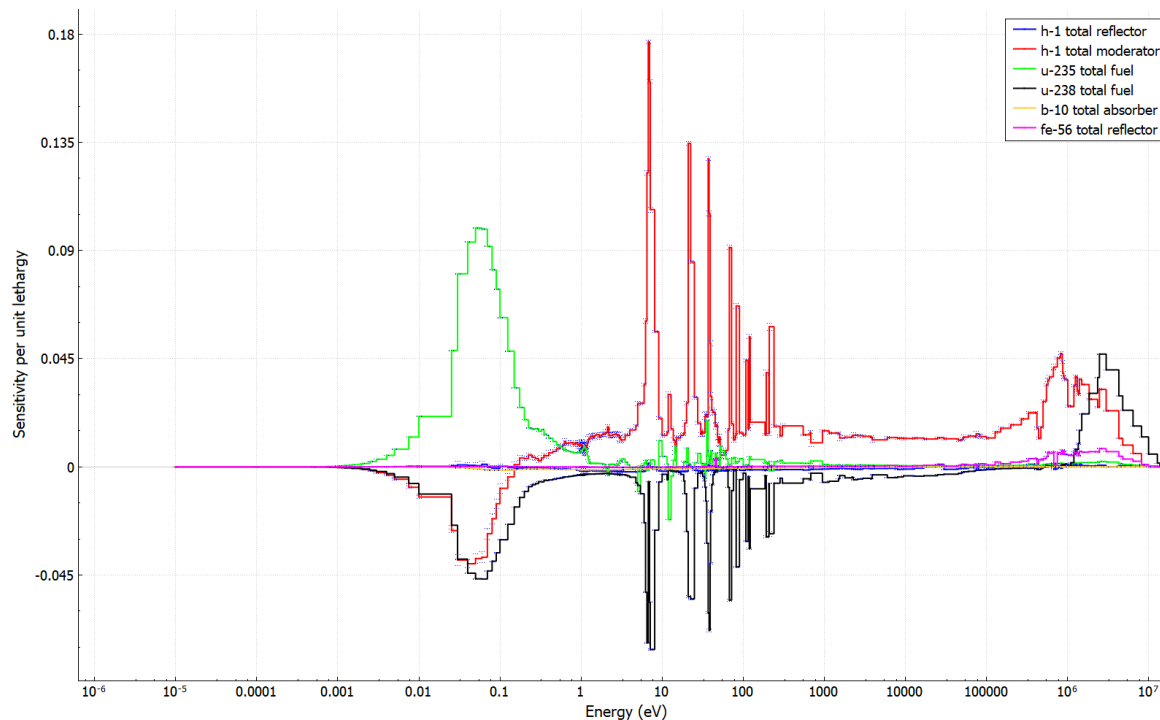
При рассмотрении всей совокупности критических сборок, которые подходят к нам по компоновке (порядка 100), необходимо выбрать некоторую меру близости той или иной критической сборки к реактору ПИК. Конечно, идеальным было бы полное совпадение нейтронных спектров в исследуемых системах и присутствие одних и тех же элементов в активной зоне. Однако в реальной ситуации спектры для различных сборок только подобны и содержат только часть атомных элементов имеющих в активной зоне реактора ПИК.

Важное понятие, которое вводится для анализа критических систем является коэффициент чувствительности:

$$S_i = \frac{\delta K_{eff} / K_{eff}}{\delta \Sigma_i / \Sigma_i}$$

Σ_i - макроскопическое сечение для i -го изотопа

Аналогично определяются $S_{ij,k}$. Индекс j относится к типу реакции, k - номер энергетической группы взаимодействующего нейтрона.



Если рассчитаны коэффициенты чувствительности и библиотека ядерных данных содержит ковариационные матрицы экспериментальных неопределенностей сечений реакций, тогда можно вычислить неопределенность коэффициента размножения определяемой неопределенностями ядерных данных:

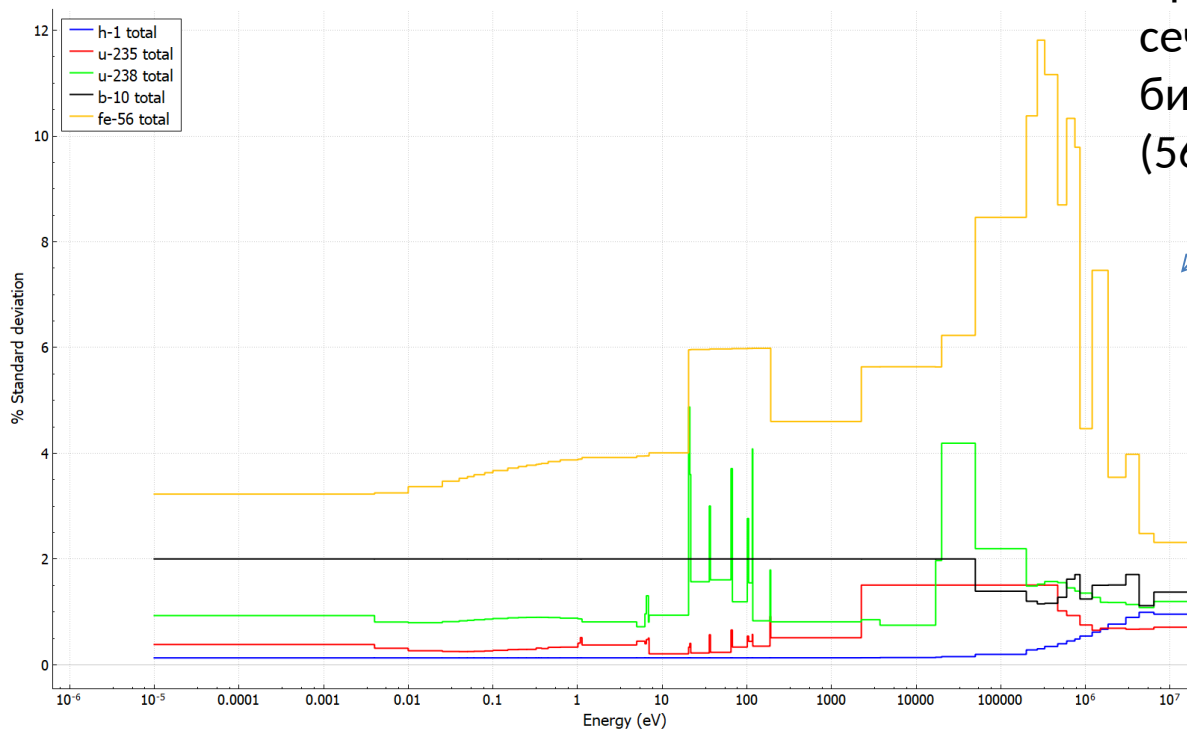
$$\sigma_K^2 = \mathbf{S} \text{Cov}(\Sigma, \Sigma) \mathbf{S}^T$$

$\left(\frac{\delta K}{K}\right)^2$

↑

$\left(\frac{\Delta \Sigma}{\Sigma}\right)^2$

↑



Пример неопределенностей сечений реакций для библиотеки ENDF/B-7.1 (56 групп)

Ядерные данные вызывающие основные неопределенности расчетного коэффициента размножения в реакторе ПИК

Делительный спектр нейтронов ^{235}U , $\chi_5(E)$ - 0,40%

Множественность нейтронов деления $\bar{\nu}_5$ - 0,33%

(n, γ) реакция: ^{235}U - 0,273%

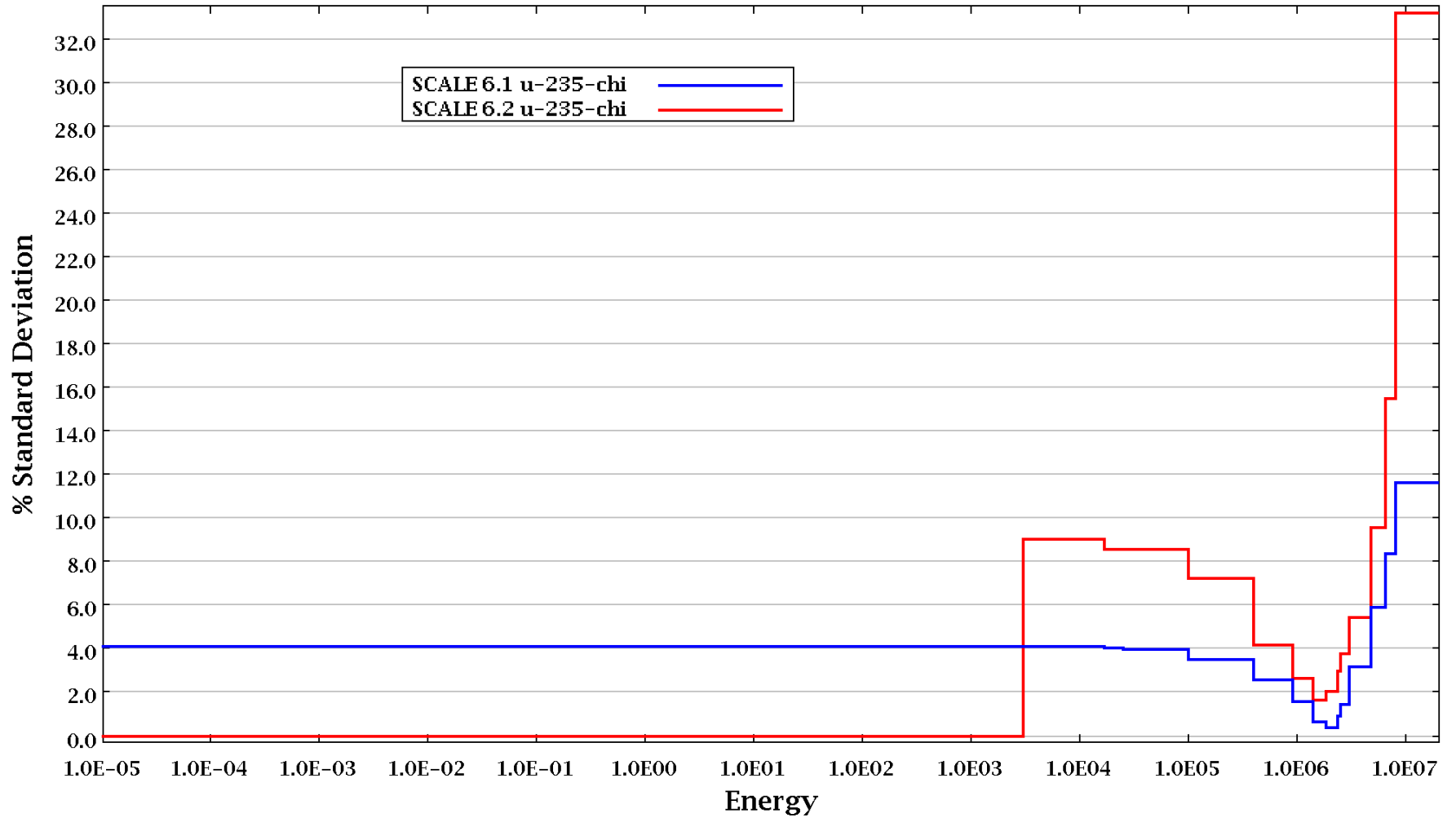
^{56}Fe - 0,196%

^{63}Cu - 0,170%

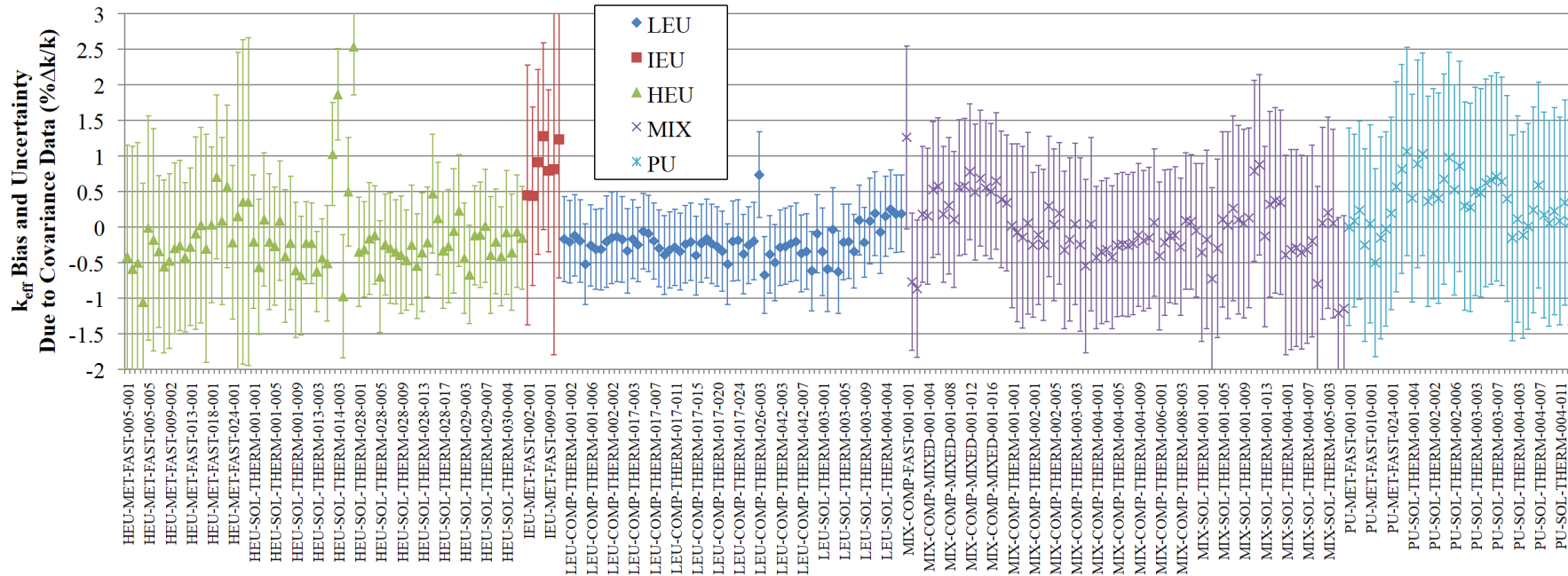
^{65}Cu - 0,163%

Суммарная неопределенность расчетного коэффициента размножения за счет неопределенности ядерных данных - 0.71%

Неопределенности делительного спектра мгновенных нейтронов

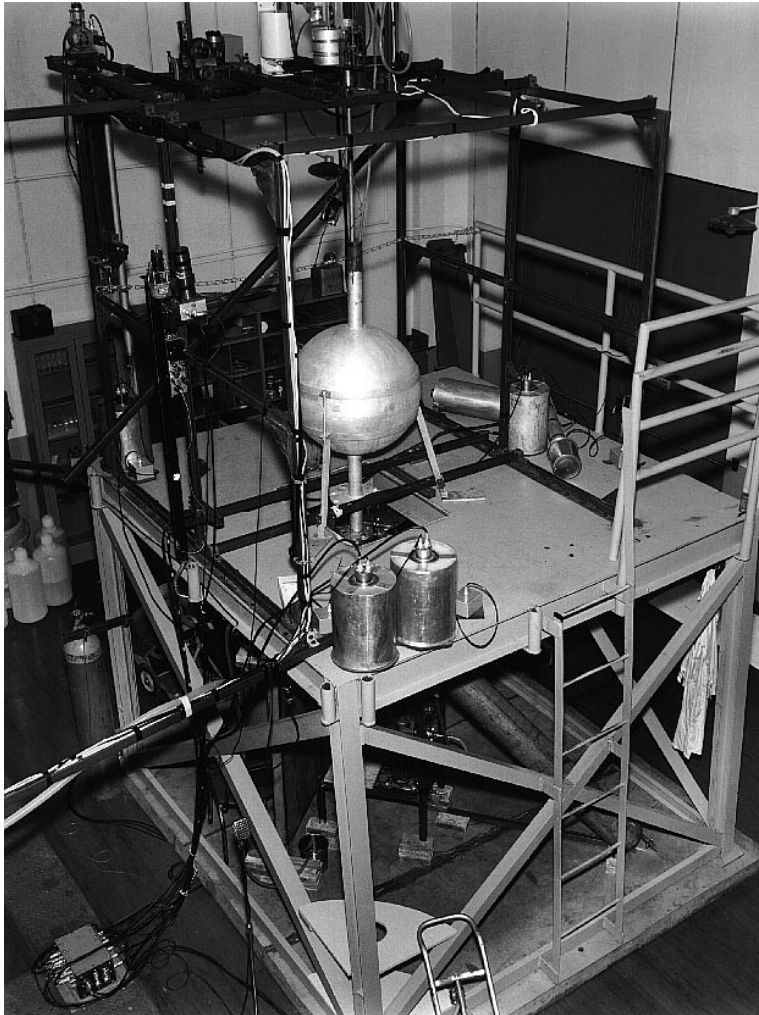


Расчетные коэффициенты размножения для сборок из ICSBER



Имеются сборки Курчатовского института с твэлами СМ: HEU-COMP-THERM-004 (содержат гадолиниевые и самариевые поглотители)

Также имеются серии крит. экспериментов с крестообразными твэлами большей длины и обогащением 80%: HEU-COMP-THERM-003,5-8



Растворные эксперименты

Использовался раствор нитрата уранила: $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$

Варьировалось содержание урана;
наличие или отсутствие отражателя;
наличие и число поглощающих стержней и т.д.

HEU-SOL-THERM-013

Ок-Ридж 50-е годы

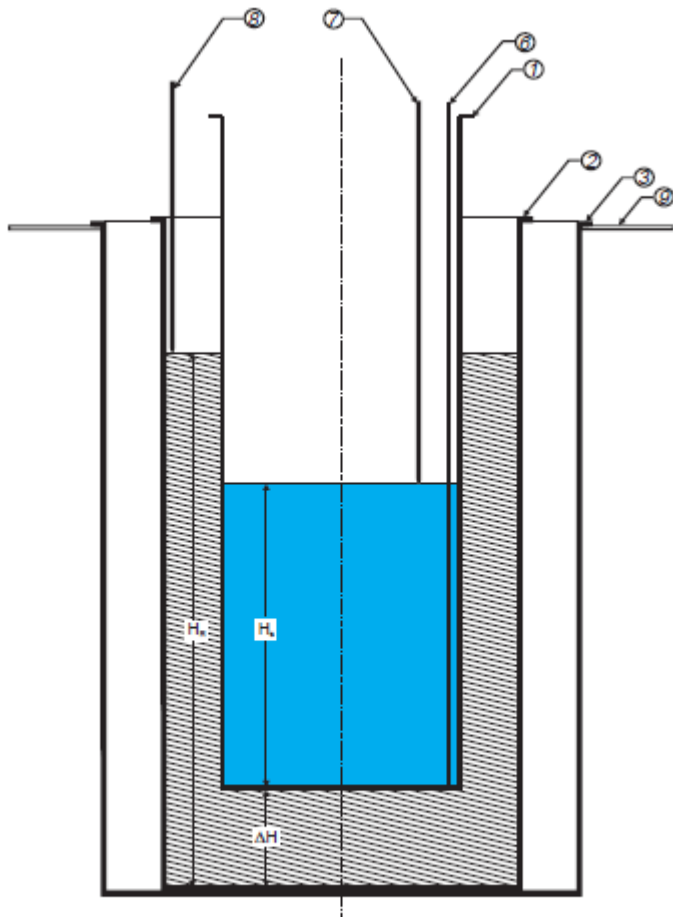
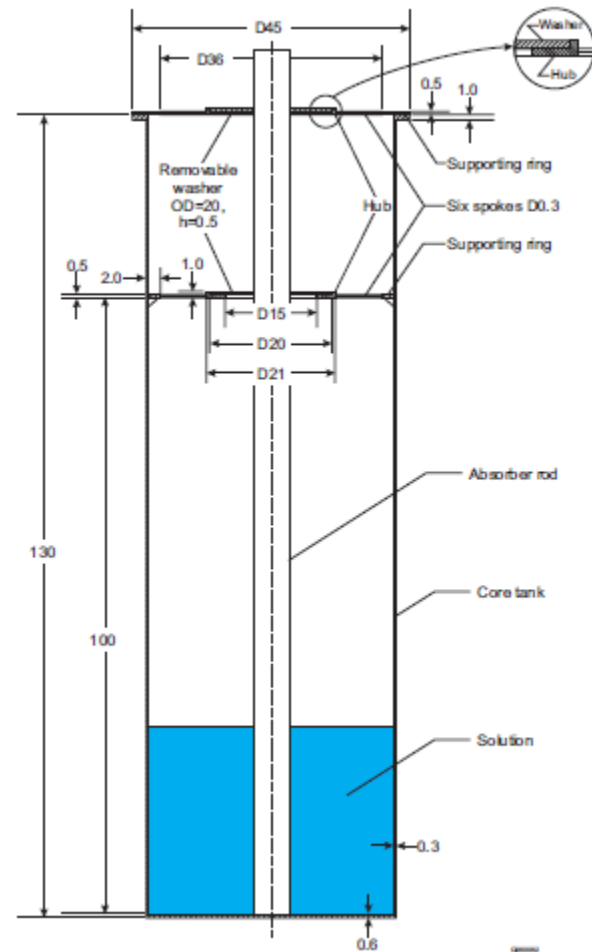


Figure 1. Sketch of Critical Assembly (vertical cut).

- | | | |
|--------------------|------------------|-------------------|
| 1 - core tank | 3 - empty tank | 7,8 - levelmeters |
| 2 - reflector tank | 6 - pumping pipe | 9 - angle bar |

HEU-SOL-THERM-014

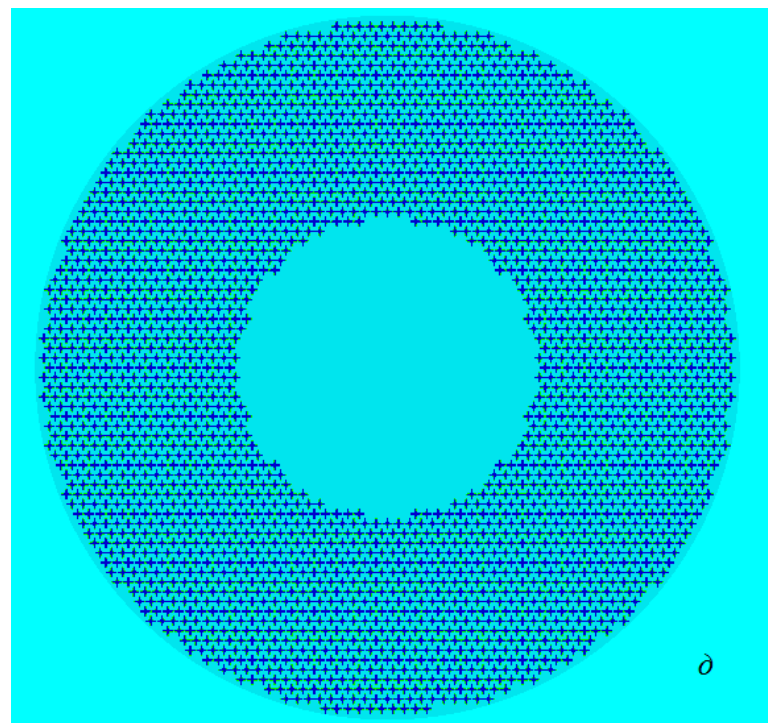
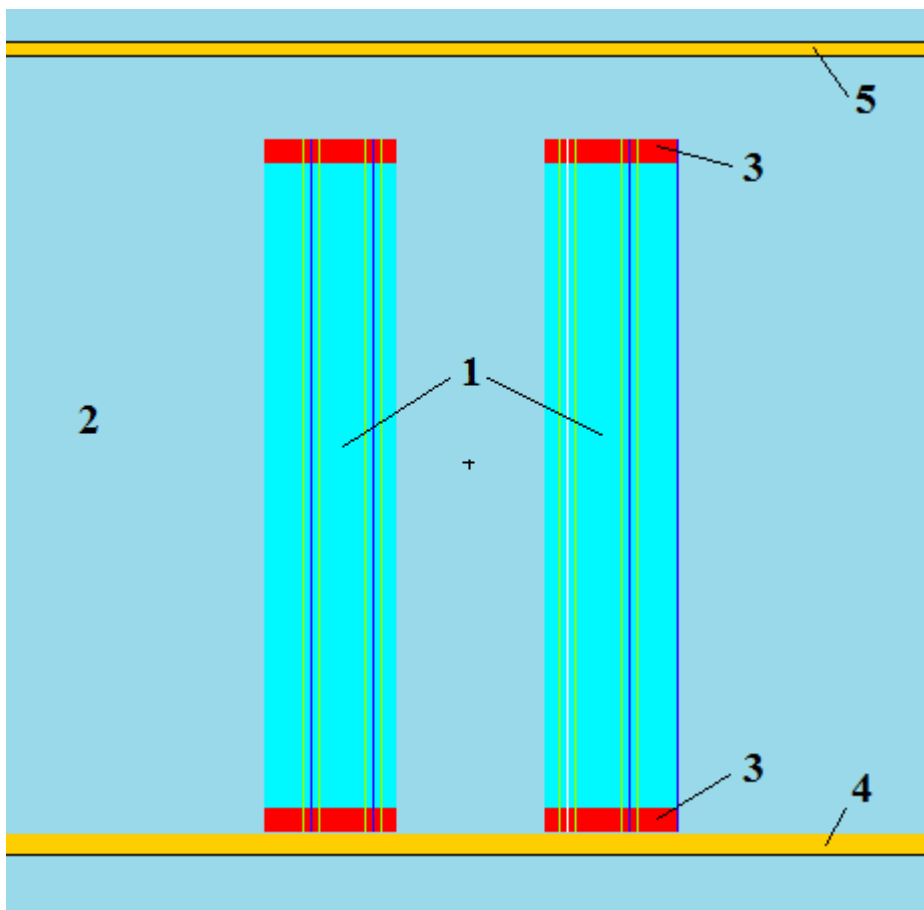


HEU-SOL-THERM-028

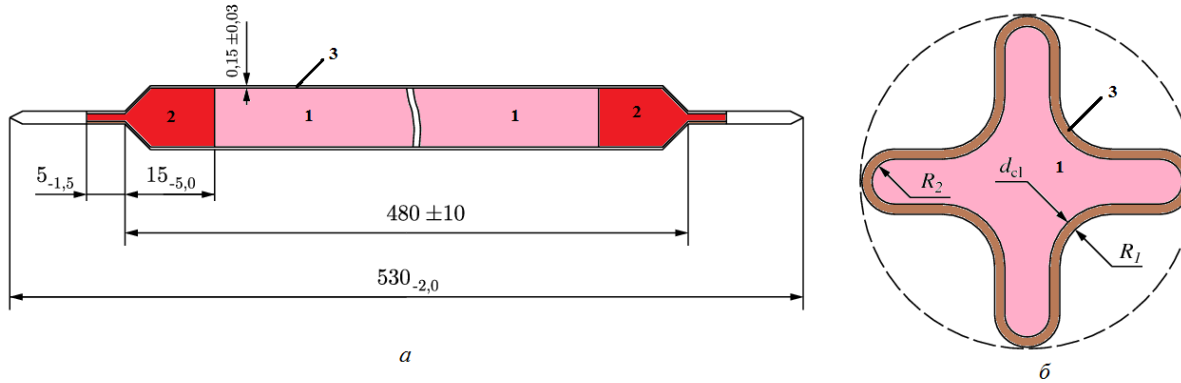
Обнинск

Эксперименты ПИК-04

Кроме крит. экспериментов из базы ICSBER, дополнительно рассматривались критические эксперименты с твэлами типа ПИК, выполненные в ЛИЯФ. Одними из таких были эксперименты с твэлами **ПИК-04**. Они отличались меньшей длиной, чем пусковые твэлы ПИК-1, а также имели некоторые другие отличия. Всего было собрано 7 критических конфигурация, отличающихся размерами водной полости.

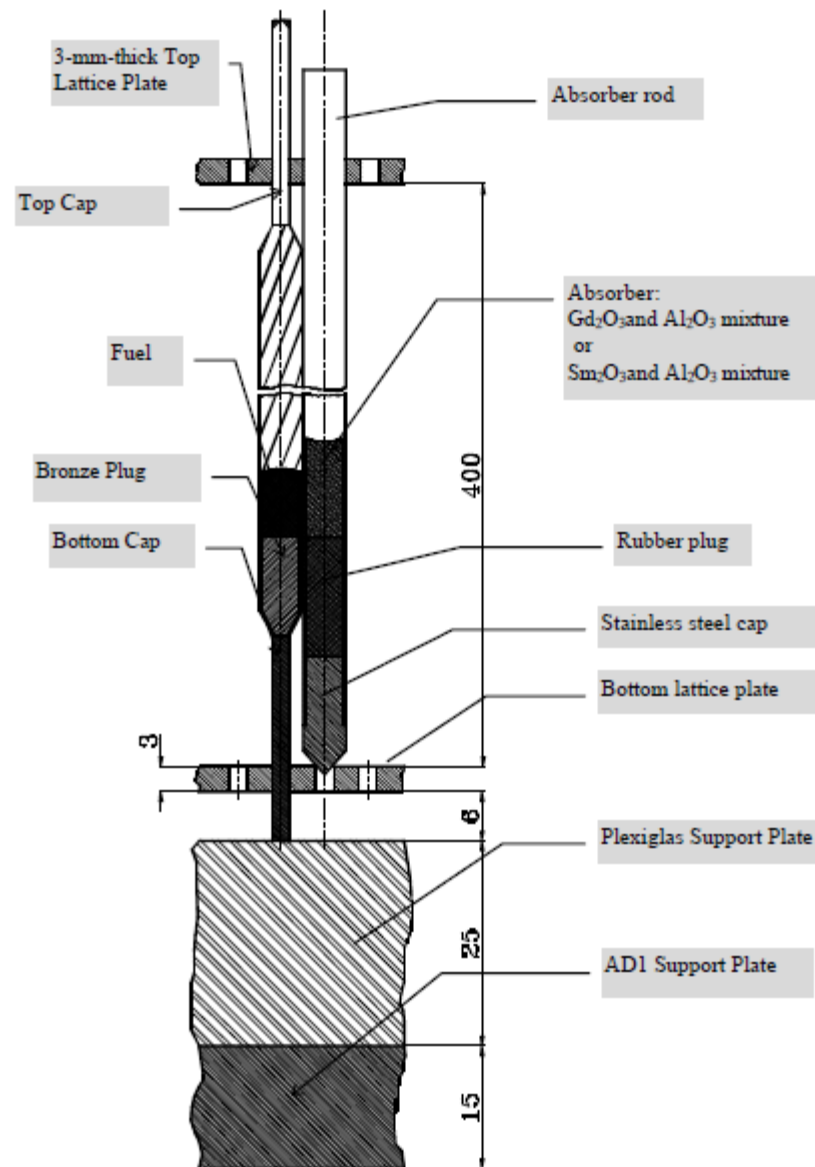
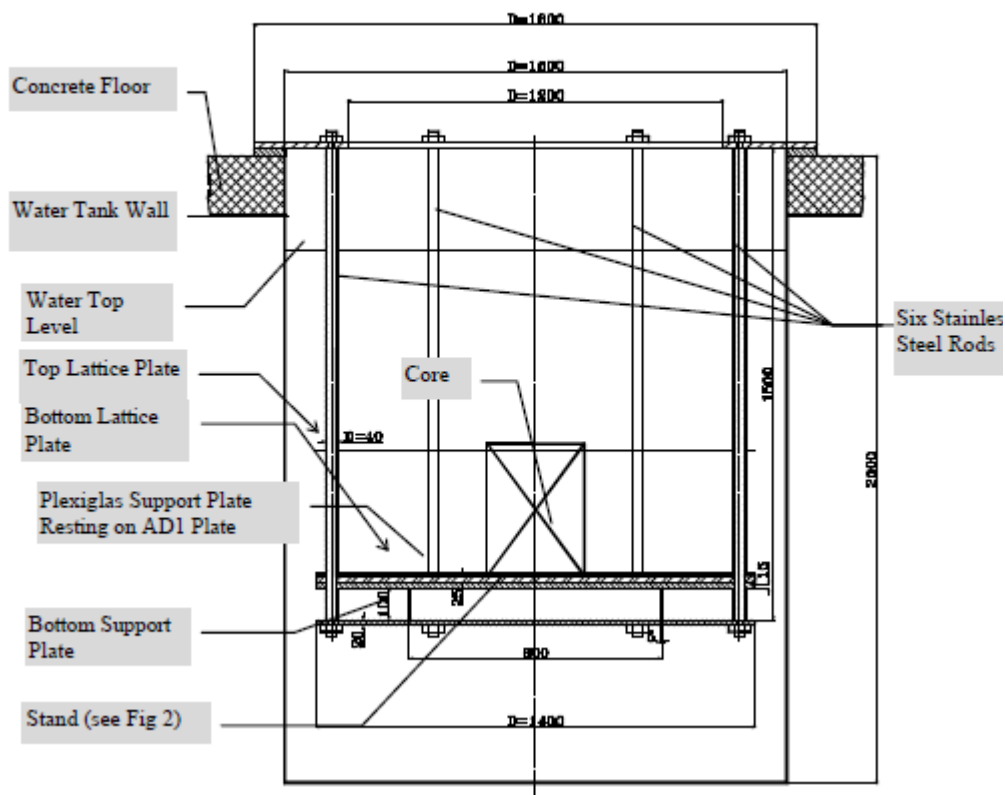


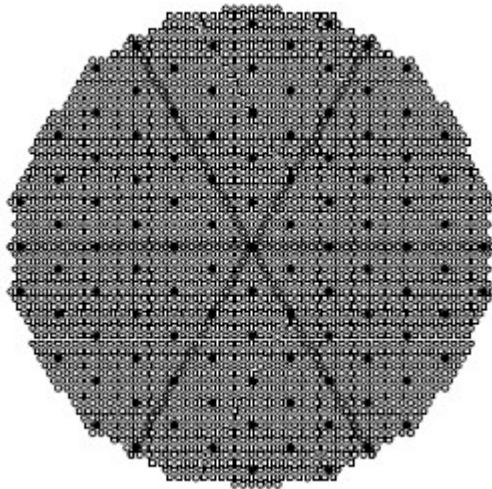
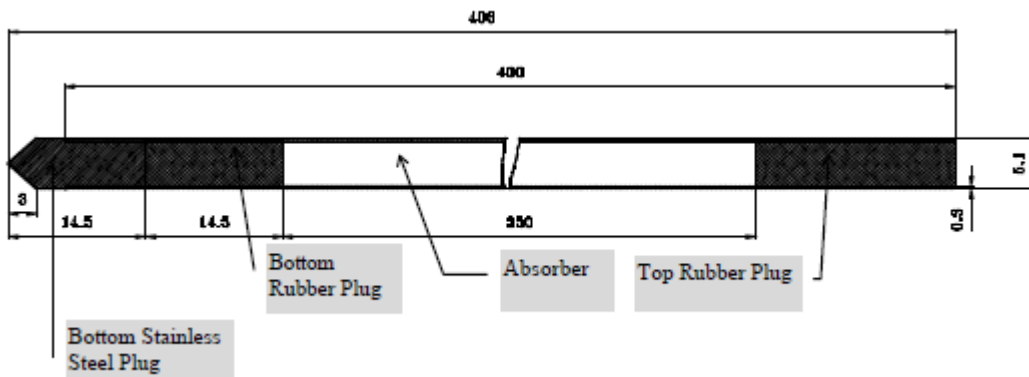
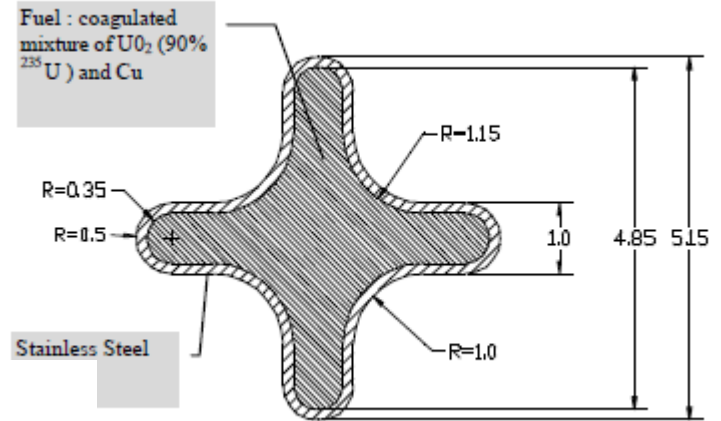
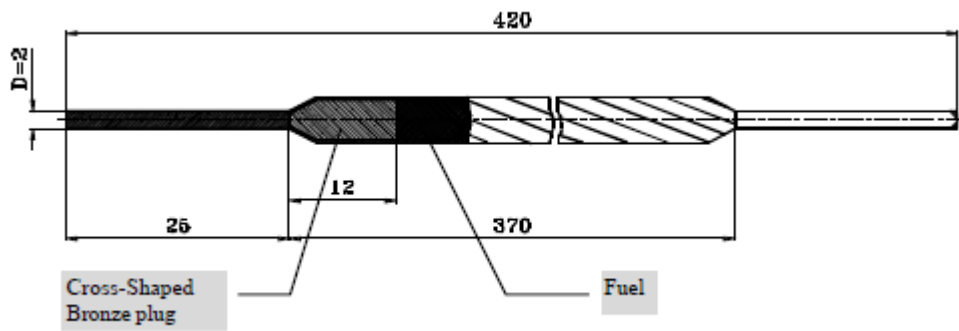
Твэл ПИК-04



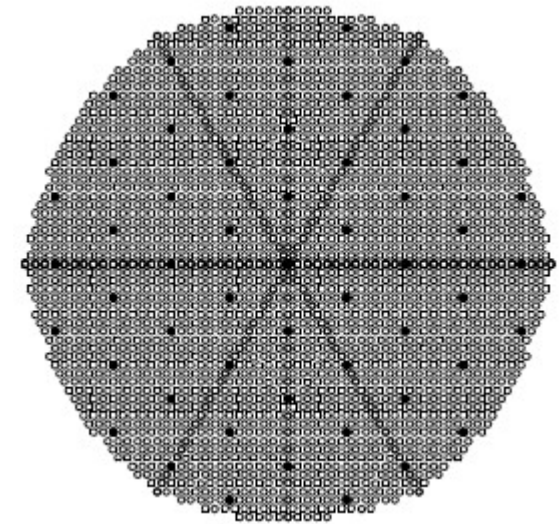
Параметр	Номинальная	Измеренная
Площадь твэла	9,729 мм ²	9,61 ± 0,11 мм ²
Площадь сердечника	7,225 мм ²	6,90 ± 0,14 мм ²
Оболочка	2,504 мм ²	2,71 ± 0,08 мм ²

Параметр	Неопределенность параметра (1σ), %	Неопределенность коэффициента размножения, %
Масса урана-235 в твэле	0,016	0,0020
Масса урана-238 в твэле	1,51	0,125
Масса меди в твэле	2,9	0,037
Площадь твэла	1,1	0,286
Длина твэла	2,1	0,15
Суммарная неопределенность	$k_{эфф}$	0,35





Шаг решетки ТВЭЛОВ
- 5,3 мм
Шаг решетки поглотителей
- 27,5 и 36,7 мм

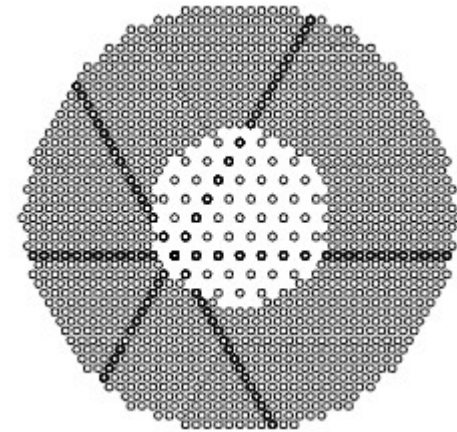
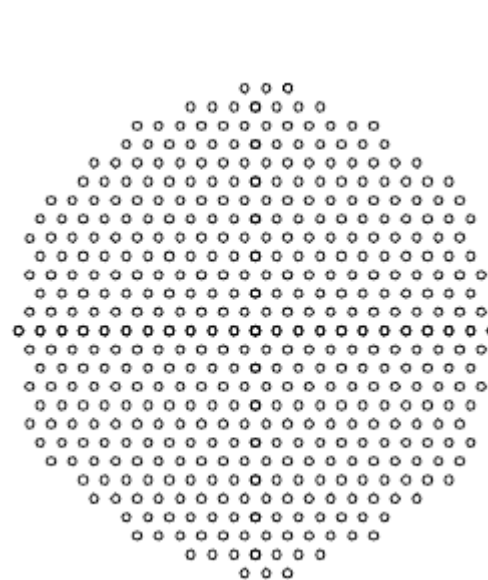
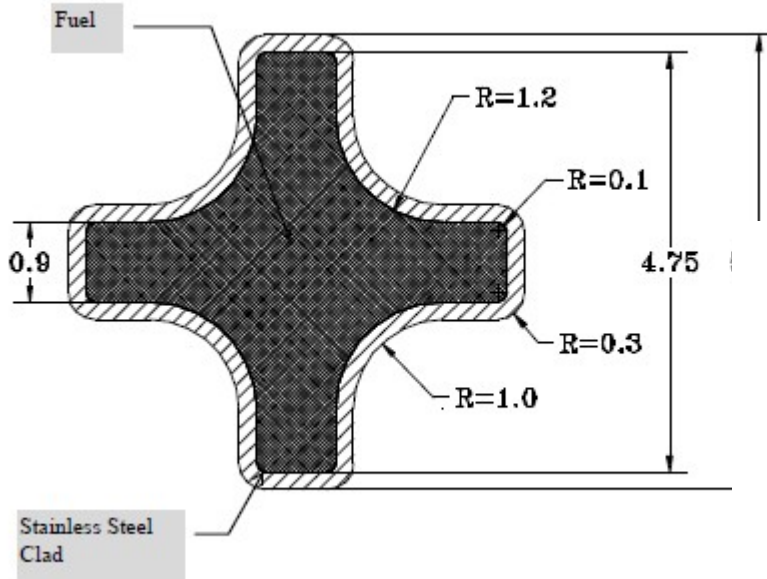
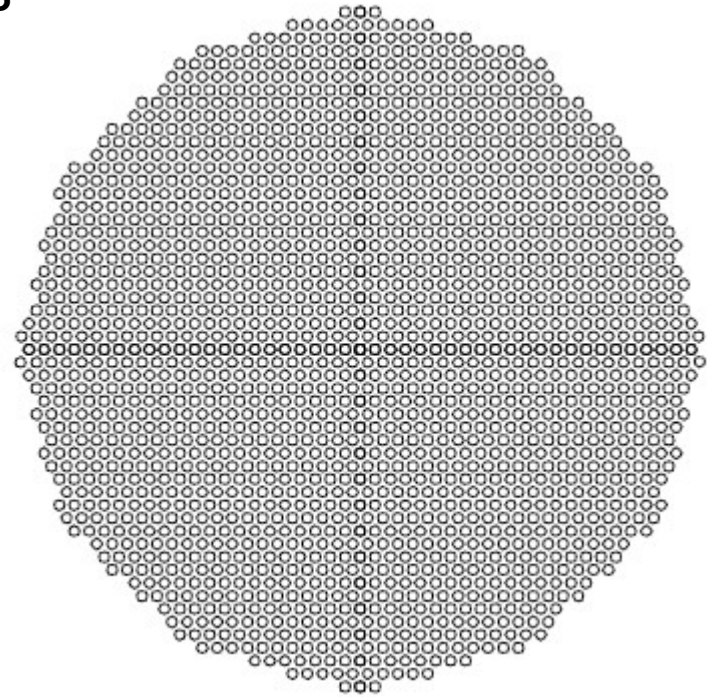
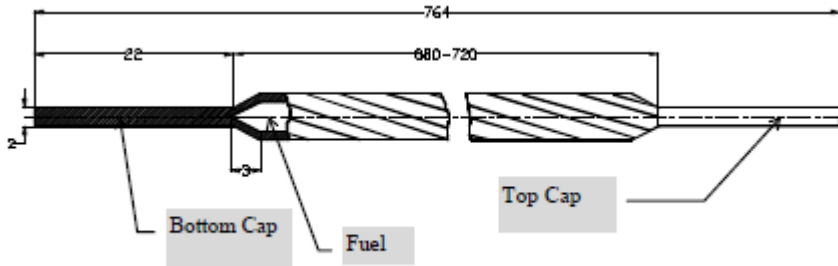


Твэл CM (Сборки COMP-THERM-004)

Параметр	Неопределенность параметра (1σ), %	Неопределенность коэффициента размножения, %
Шаг решетки твэлов	0,37	0,047
Масса урана	0,038	0,007
Масса гадолиния	0,19	0,003
Площадь твэла	2,5	0,290
Длина твэла	3,0	0,216
Суммарная неопределенность $k_{эфф}$		0,37

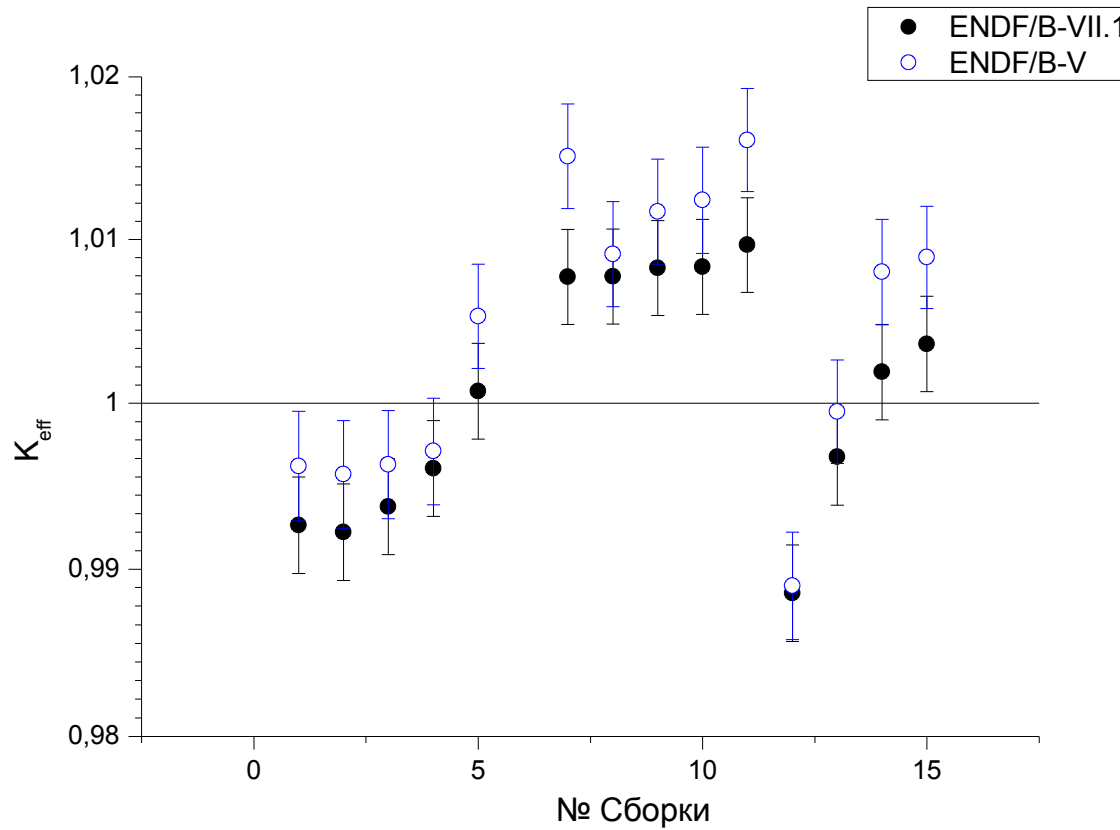
	Расчетный коэффициент размножения
Библиотека ABBN-93, KENO-VI	$0,9983 \pm 0,0009$
Библиотека ENDF/B-7.1 , KENO-VI, номинальные размеры твэла	0,9882
Библиотека ENDF/B-7.1 , KENO-VI, размеры твэла как для ПИК-04	0,9926
Библиотека РОСФОНД-2010, KENO-VI, размеры твэла как для ПИК-04	$0,9892 \pm 0,0001$

Сборки HEU-COMP-THERM-003



Шаг решетки - 6.1, 12.2, 18.3 мм

Результаты расчетов для сборки HEU-COMP-003



Экспериментальная неопределенность коэффициента размножения – 0.0029

Библиотека	Среднее K_{eff}	$\chi^2/(n-1)$
ENDF/B-V	1.0043	7
ENDF/B-VII.1	1.0006	6.2

В качестве меры близости двух сборок можно выбрать следующие функции:

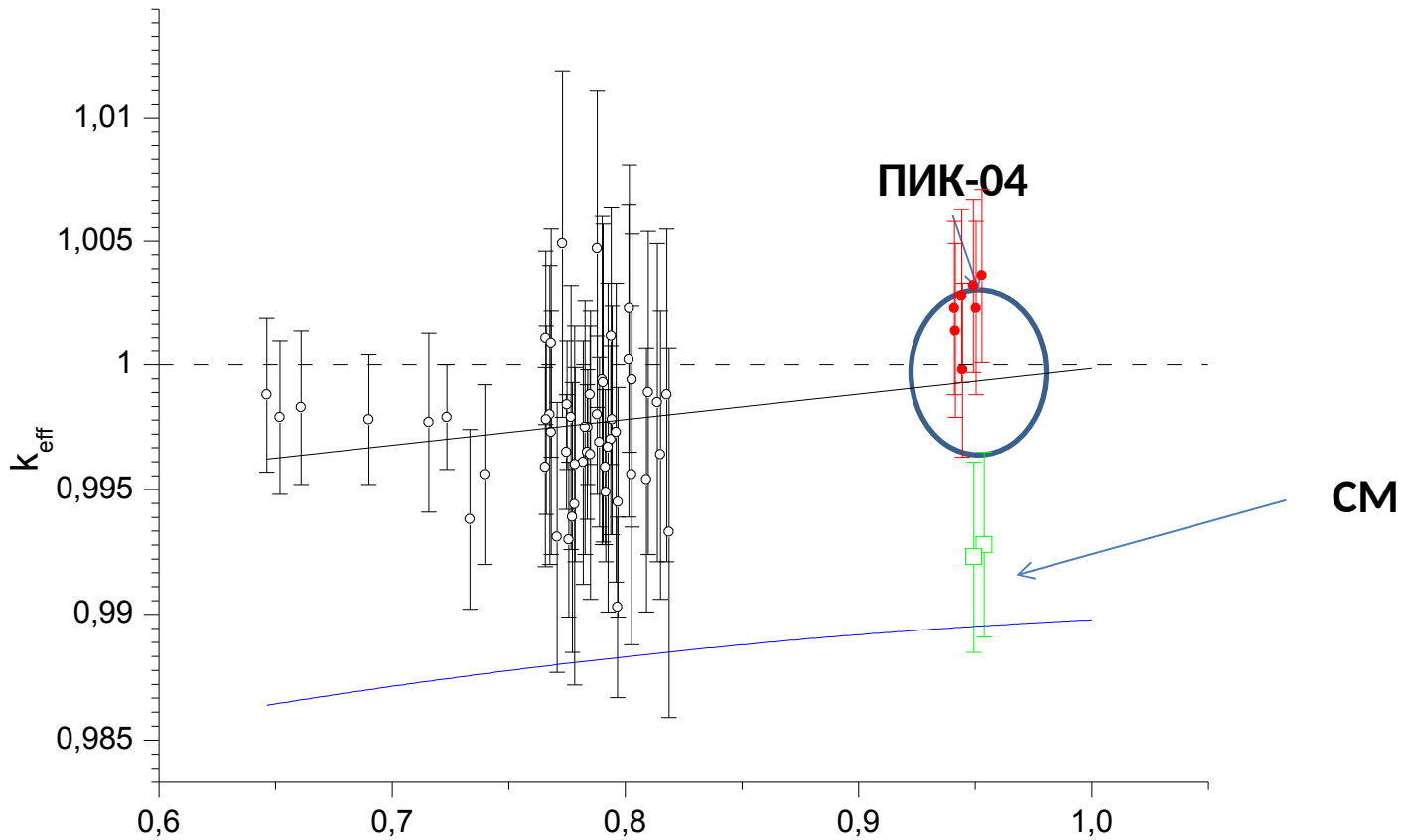
$$\sigma_{1,2}^2 = S_1 \text{Cov}(\Sigma, \Sigma) S_2^T$$

$$C_K = \frac{\sigma_{1,2}^2}{\sigma_{1,1}^2 \sigma_{2,2}^2}$$

$$-1 \leq C_K \leq 1$$

В качестве другой меры близости можно взять просто нормированное скалярное произведение векторов чувствительности двух систем, исследуемой и тестовой:

$$E_{12} = \frac{S_1 S_2^T}{|S_1| |S_2|}$$



Bias K_{eff} - **-0.02**; **$w(1)=1.05$ ($\gamma=0.05$)**

$$w(x) = t_{1-\gamma} s_p \left[1 + \frac{1}{n} + \frac{(x - \bar{x})^2}{\sum_{i=1, n} (x_i - \bar{x})^2} \right]^{1/2}$$

$$s_p^2 = s_{k(x)}^2 + s_w^2, \quad s_w^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1, n} \sigma_i^2$$

$$s_{k(x)}^2 = \frac{1}{n-2} \left[(k_i - \bar{k})^2 \frac{\left\{ \sum_{i=1, n} (x_i - \bar{x})(k_i - \bar{k}) \right\}^2}{\sum_{i=1, n} (x_i - \bar{x})^2} \right]$$

Коррекция ядерных данных за счет использования дополнительных экспериментов

Математическая формулировка процедуры основана на трех принципах:

1. Теореме Байеса
2. Принципа максимума энтропии
3. Обобщенном методе наименьших квадратов

Пусть имеется некоторая система результатов экспериментов D ; а также система ядерных данных в общем виде представляемых в виде вектора:

$$\mathbf{p} = (p_1, p_2, \dots, p_k, \dots, p_K)$$

Задача состоит в построении закона распределения параметров p_k - $P(\mathbf{p})$ с учетом результатов всех экспериментов D . Результаты экспериментов однозначно определяются системой ядерных данных \mathbf{p} .

Donald L. Smith. *Some guidelines for the evaluation of nuclear data*. ANL, Argonne, Illinois 60439. March 20, 1996.

Коррекция ядерных данных за счет использования интегральных экспериментов

Рассматривается некоторая библиотека оцененных ядерных данных. В наших исследованиях мы рассматриваем библиотеку **ENDF/B-7.1**. Данная библиотека содержит порядка 600 изотопов, основные изотопы конструкционных материалов, важных продуктов деления и делящихся материалов. Также имеются файлы содержащие информацию о неопределенностях приводимых ядерных данных.

Расчеты коэффициента размножения выполнялись в рамках пакета SCALE -6.2 (TSUNAMI) где имеются библиотеки ковариационные библиотеки неопределенностей ядерных данных рассчитанные на основе данных представленных в библиотеке ENDF/B-7.1 в групповом представлении (56 и 252 группы).

Пусть имеется I критических экспериментов для которых получены экспериментальные значения коэффициента размножения – m_i $i=1, I$. Пусть известна также ковариационная матрица экспериментальных ошибок для этой серии экспериментов – \mathbf{C}_{mm} .

Используя ядерные данные совокупно обозначаемые α можно рассчитать для каждой критической сборки коэффициент размножения $k_i(\alpha)$.

Тогда можно построить такой вектор:

$$\mathbf{d} = \left\{ d_i = \frac{k_i(\alpha) - m_i}{k_i(\alpha)}, \quad i = 1, \dots, I \right\}$$

Ковариационная матрица этого вектора имеет вид:

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_{dd} &= \mathbf{C}_{kk} + \mathbf{F}_{m/k} \mathbf{C}_{mm} \mathbf{F}_{m/k} = \\ &= \mathbf{S}_k \mathbf{C}_{\alpha\alpha} \mathbf{S}_k^T + \mathbf{F}_{m/k} \mathbf{C}_{mm} \mathbf{F}_{m/k} \end{aligned}$$

Используется обобщенный метод наименьших квадратов (GLLS) так что варьируются ядерные данные $\alpha \rightarrow \alpha'$ и результаты критических экспериментов ($\mathbf{m} \rightarrow \mathbf{m}'$), так чтобы минимизировать функционал

$$\chi^2 = [\Delta\alpha]^T \mathbf{C}_{\alpha\alpha}^{-1} [\Delta\alpha] + [\Delta\mathbf{m}]^T \mathbf{C}_{mm}^{-1} [\Delta\mathbf{m}]$$

$$\Delta\alpha_i = \frac{\alpha'_i - \alpha_i}{\alpha_i}$$

Дополнительные условия: $\mathbf{k}'(\alpha') = \mathbf{m}'$

$$[\Delta \mathbf{k}] = \mathbf{S}_k [\Delta \alpha]$$

$$\Delta k_i = \frac{k'_i - k_i}{k_i}$$

Решение:

$$[\Delta \alpha] = - \left[\mathbf{C}_{\alpha\alpha} \mathbf{S}_k^T \mathbf{C}_{dd}^{-1} \right] \mathbf{d}$$

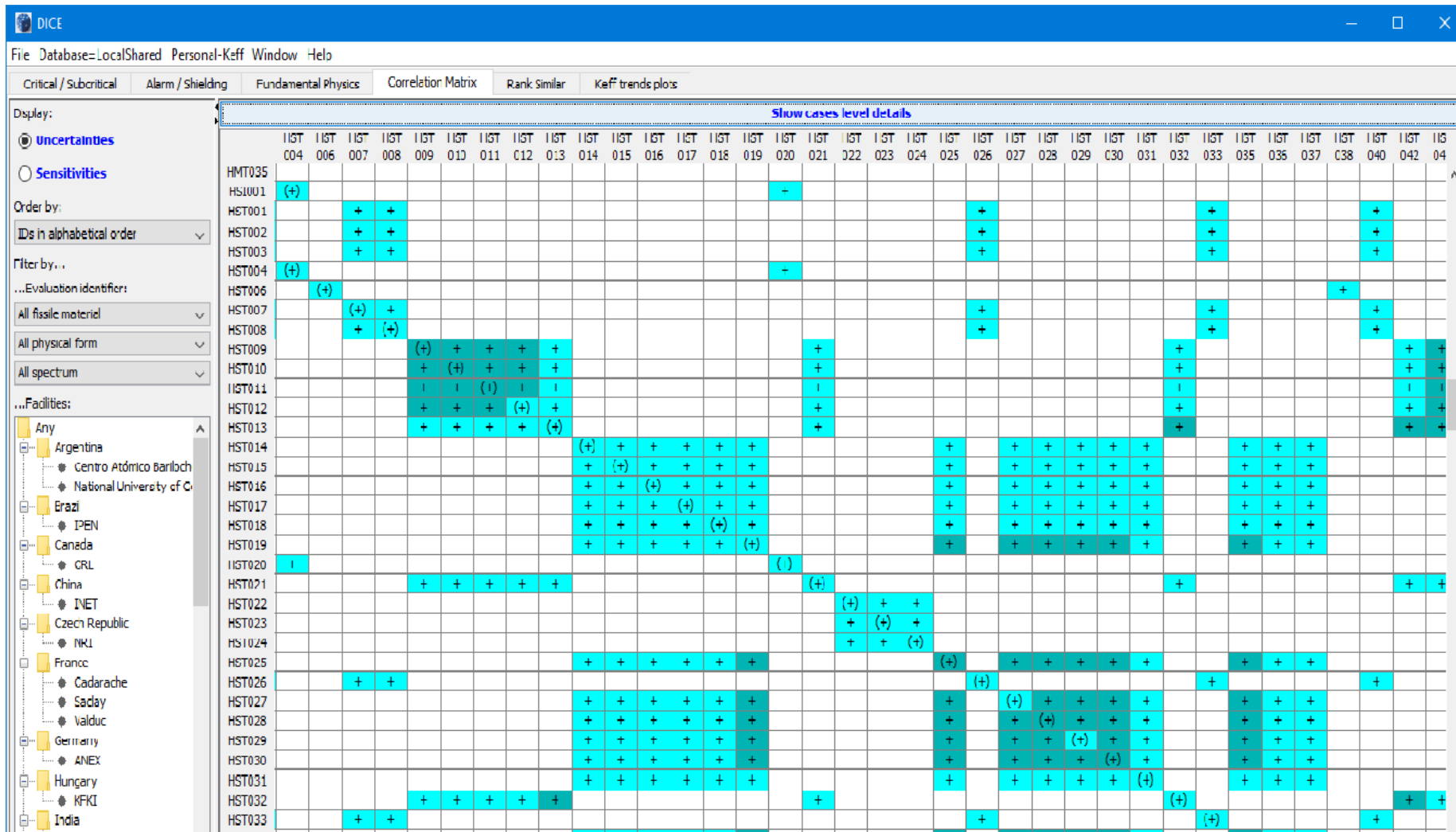
$$[\Delta \mathbf{m}] = \left[\mathbf{C}_{mm} \mathbf{F}_{m/k} \mathbf{C}_{dd}^{-1} \right] \mathbf{d}$$

Использование дополнительного знания приводит к изменению ковариационных матриц ядерных данных и неопределенностей расчетных значений коэффициента размножения:

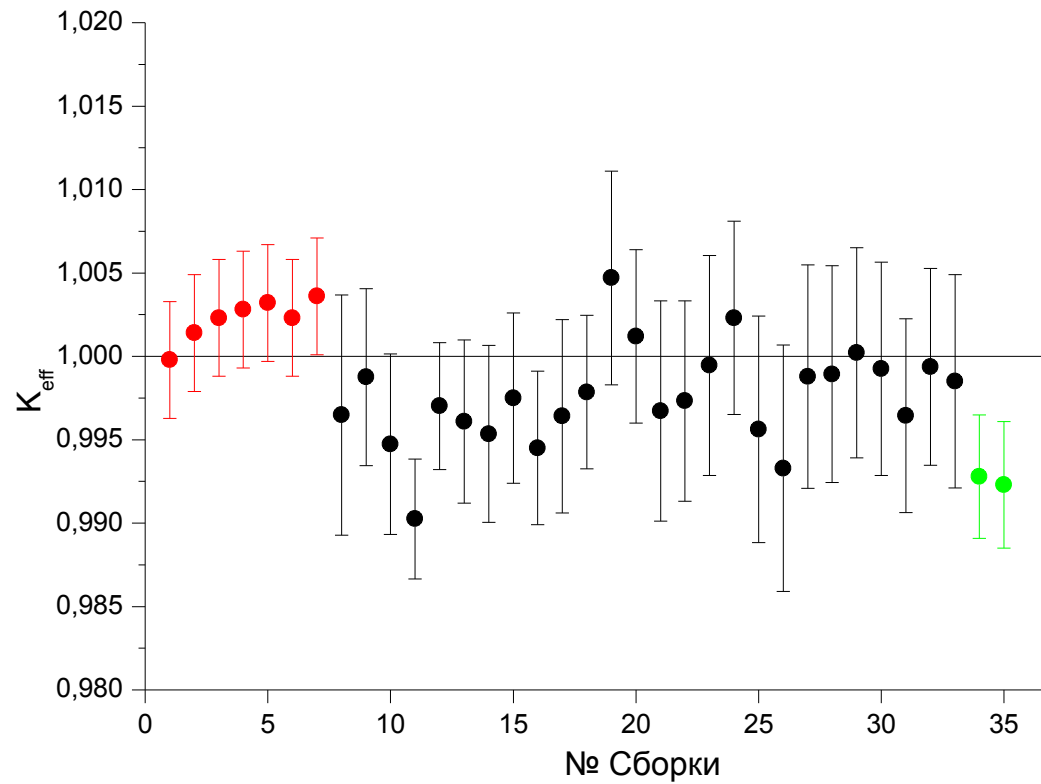
$$\mathbf{C}_{\alpha'\alpha'} = \mathbf{C}_{\alpha\alpha} - \left[\mathbf{C}_{\alpha\alpha} \mathbf{S}_k^T \mathbf{C}_{dd}^{-1} \mathbf{S}_k \mathbf{C}_{\alpha\alpha} \right]$$

$$\mathbf{C}_{k'k'} = \mathbf{C}_{kk} - \left[\mathbf{C}_{kk} \mathbf{C}_{dd}^{-1} \mathbf{C}_{kk} \right]$$

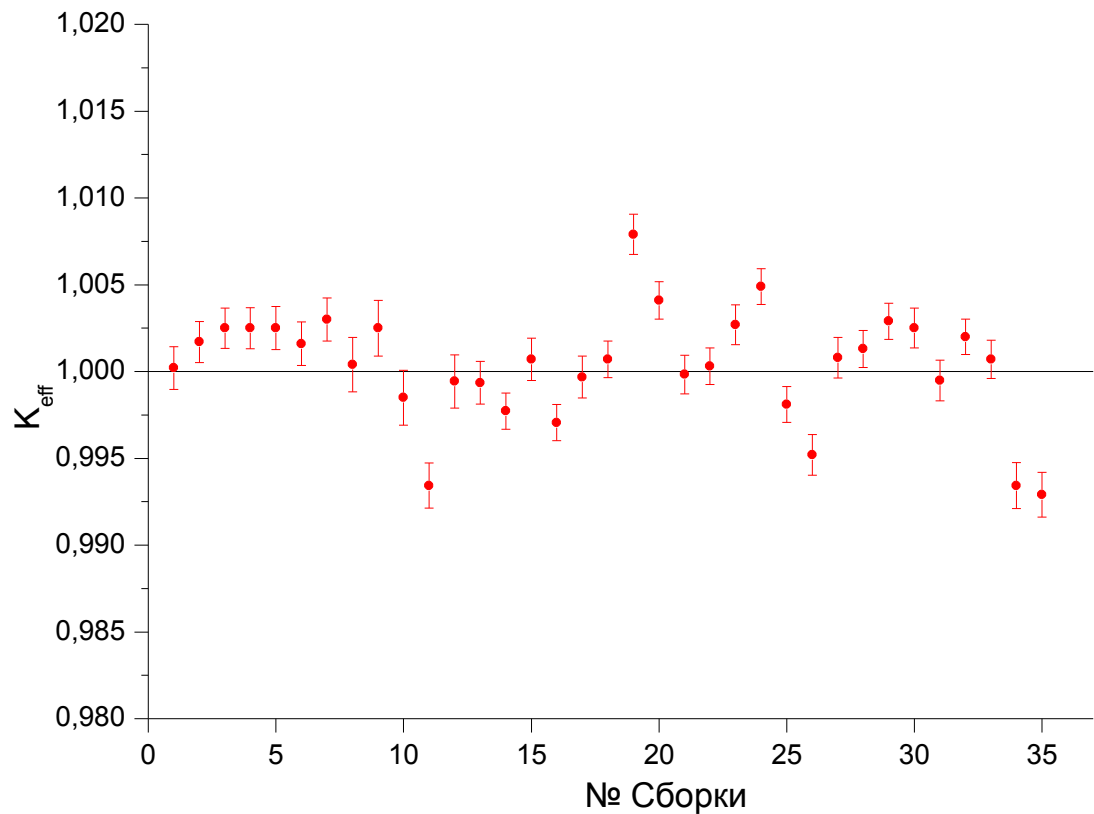
Данные о корреляциях растворных экспериментов в библиотеке DICE



Расчетные коэффициенты размножения сборок до коррекции констант



Расчетные коэффициенты размножения сборок после коррекции констант



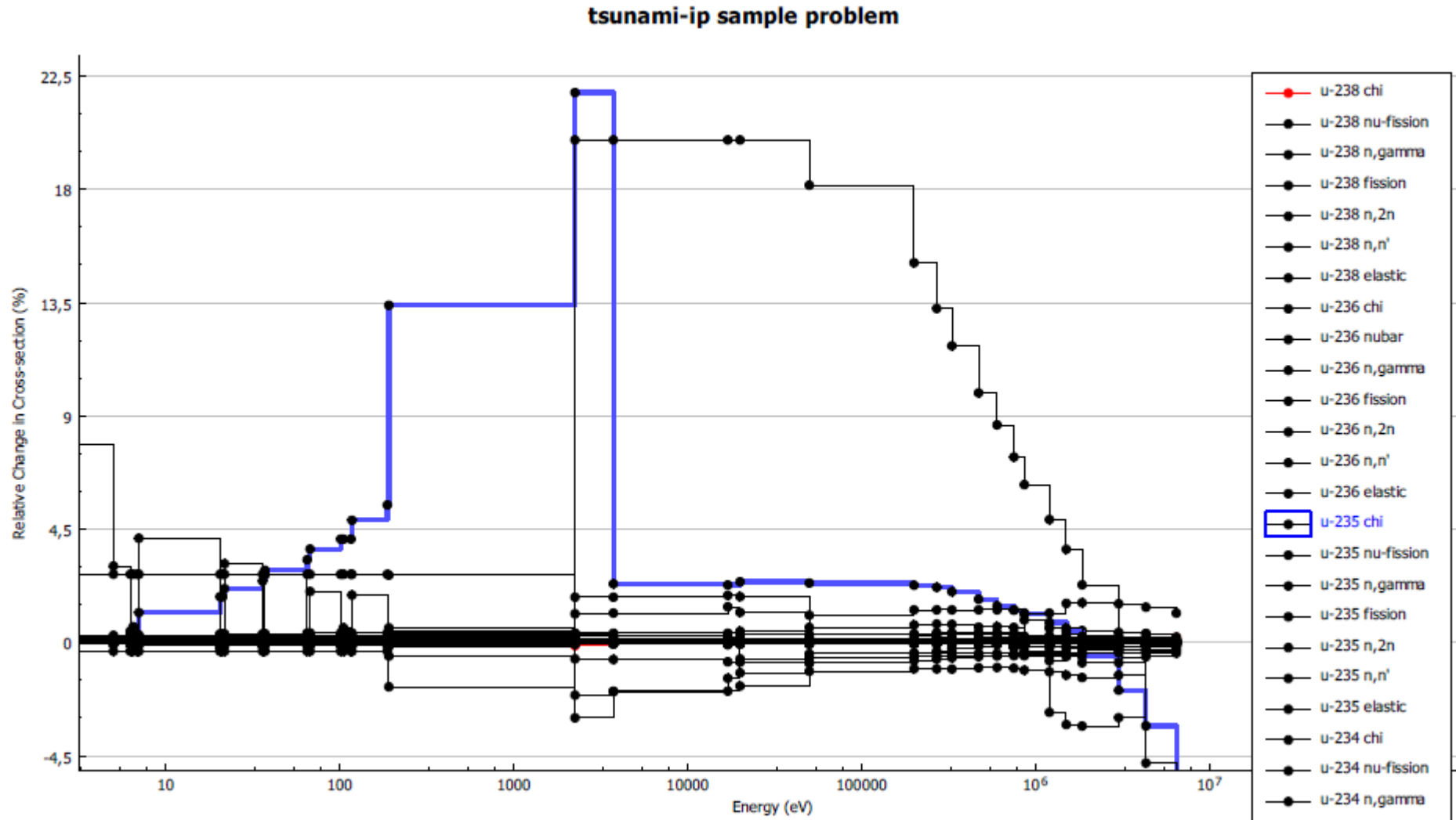
Влияние коррекции константного обеспечения по результатам анализа

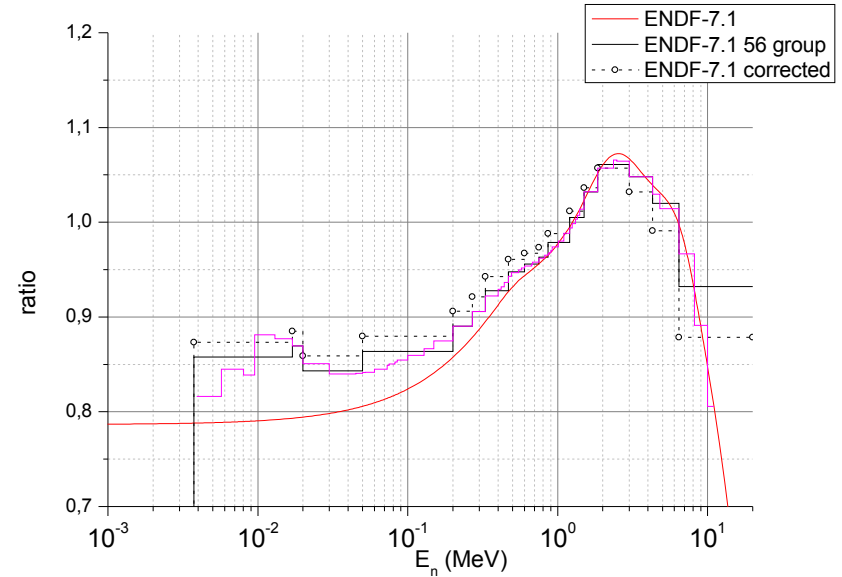
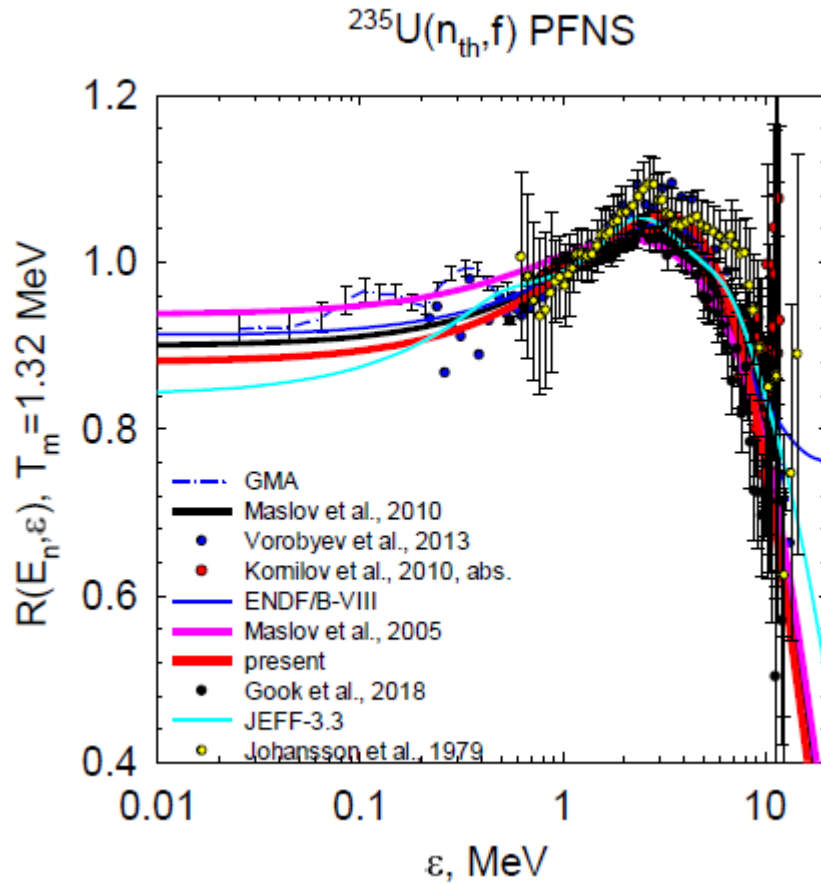
Изотоп	Реакция	$K_0 - K_{\text{corr}}, \%$	Доля
U-235	$\chi(E)$	-0,160	0,294
Cu-65	(n,g)	0,089	0,164
U-235	ν	0,07	0,130
Cu-63	(n,g)	0,068	0,127
Fe-56	(n,g)	-0,045	0,083
U-235	(n,g)	0,025	0,045
H-1	(n,n)	-0,014	0,027
...
Сумма		+0.01	1,0

Полный предсказываемый сдвиг расчетного коэффициента размножения в расчетах эффективного коэффициента размножения нейтронов реактора ПИК с ТВС ПИК-2 с использованием библиотеки ENDF/B-7.1 составляет величину **+0,01%** с доверительным интервалом 0,22%

Preliminary!

Рекомендуемая вариация ^{235}U $\chi(E)$





Доклад на

LXXII International Conference "Nucleus-2022" July 11-16, 2022, Moscow

Владимир Маслов, Беларусь

Выводы

- Используемые в расчетах ядерные данные, даже в виде библиотек оцененных ядерных данных, могут приводить к неконтролируемым сдвигам расчетного коэффициента размножения нейтронов для рассчитываемого реактора.
- Для уточнения величины этого сдвига необходимо проводить дополнительное расчетное исследование критических сборок (бенчмарк-эксперименты) подобных исследуемой критической системе.
- Степень близости характеризуется коэффициентами близости, которые определяются близостью спектров нейтронов в двух системах, а также количественным содержанием делящихся и конструкционных элементов.
- Чем больше имеется бенчмарков близких к исследуемой критической системе, тем более достоверны прогнозные расчеты критичности исследуемой системы.
- В настоящее время неопределенности расчетного коэффициента размножения нейтронов для реактора ПИК без учета дополнительных интегральных экспериментов составляет величину $\sim 0,7\%$ (1 – сигма), но ее можно существенно уменьшить (где то до $0,25\%$) при использовании дополнительных интегральных экспериментов.

Спасибо за внимание!