

Акционерное общество «Государственный научный центр  
Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени  
А.И. Лейпунского».

---

## **Расчёт эффектов реактивности и их погрешностей в системе СКАЛА-РОКОКО**

**Авторы:** Жердев Геннадий Михайлович,  
Теплухина Евгения Сергеевна

# Введение

---

**Рассчитываются эффекты реактивности и погрешности:**

- Перемещения Элементов А.З реактора
  - эффективности СУЗ
  
- функционалов от эффектов, описываемых возмущением концентраций/материалов среды
  - НПЭР
  - изотопной кинетики при выгорании/накоплении плутония
  - Температурный эффект
  - Концентрации борной кислоты

# Алгоритм расчёта

---

В обоих случаях используется метод прямого возмущения геометрии АЗ или материалов

- рассчитываются два состояния реактора с различными геометрическими конфигурациями, например, положениями органов СУЗ. Задаётся и читается программой два описания геометрии.
- с различными содержаниями/свойствами вещества, например, наличия или отсутствия натрия в АЗ, натриевой полости, температуры, изотопного состава

Для каждого состояния производится заданное число полных расчётов реактора с возмущением констант, в соответствии с ковариационными матрицами погрешностей МАКОВКА.

Возмущение констант производится один раз для каждого полного расчёта.

При расчётах первого и второго состояния используются одинаковые возмущения, т.е. для каждого возмущения констант производятся расчёты обоих состояний. Проводится так же расчёты обоих состояний на не возмущённых константах. Таким образом, в результате расчётов получаются  $npert+1$  результатов для первого и столько же для второго состояния, где  $npert$  это число возмущений констант плюс один расчёт на невозмущённых.

Далее, производится статистический анализ по  $2*(npert+1)$  рассчитанным функционалам. Из чего делается заключение о величинах погрешностей, связанных с неточностью знания нейтронных данных.

# Статистический анализ

Основа, как было отмечено выше, расчёты  $npert+1$  возмущений на две геометрические конфигурации. Для каждого  $p$  возмущения констант вычисляется изменение  $\rho'$  реактивности  $\rho$  :

$$\rho'_p = \frac{1}{k_{2,p}} - \frac{1}{k_{1,p}}$$

где:

1,2 – это первое и второе состояние по геометрии

$p$  – номер возмущения констант

Статистическая погрешность изменения реактивности:

$$\Delta\rho'_p = \sqrt{\left(\frac{\Delta k_{1,p}}{k_{1,p}^2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta k_{2,p}}{k_{2,p}^2}\right)^2 - 2 \cdot \frac{\Delta k_{1,p} \cdot c_{1,2} \cdot \Delta k_{2,p}}{k_{1,p}^2 \cdot k_{2,p}^2}}$$

где:

$\Delta\rho'_p$  – искомая статистическая погрешность изменения реактивности

$\Delta k_{1,p}$   $\Delta k_{2,p}$  – статистическая погрешность коэффициента размножения первого и второго геометрических состояний

$k_{1,p}$   $k_{2,p}$  – коэффициент размножения первого и второго геометрического состояния

$c_{1,2}$  – коэффициент корреляции статистических погрешностей первого и второго геометрических состояний.

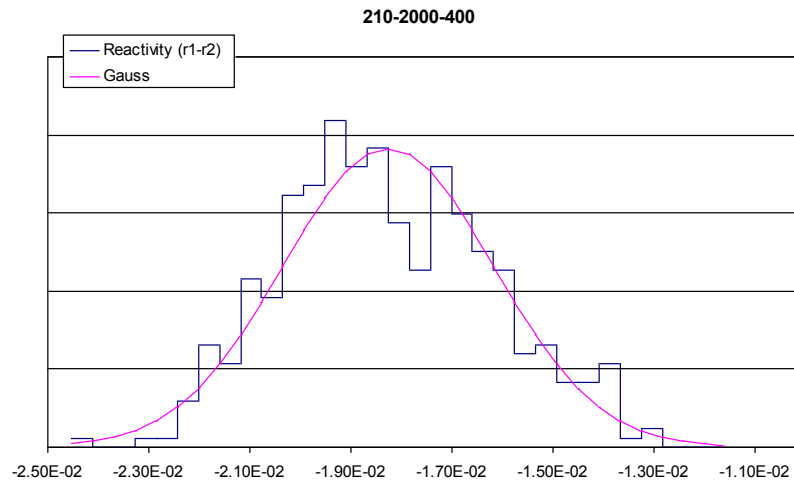
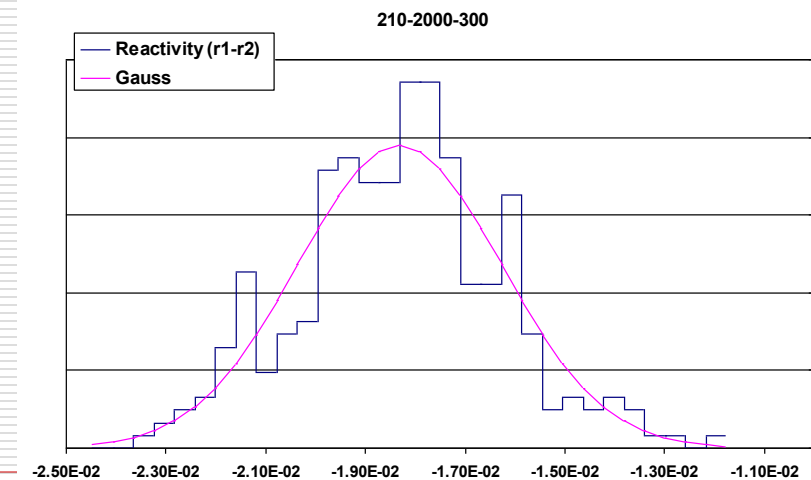
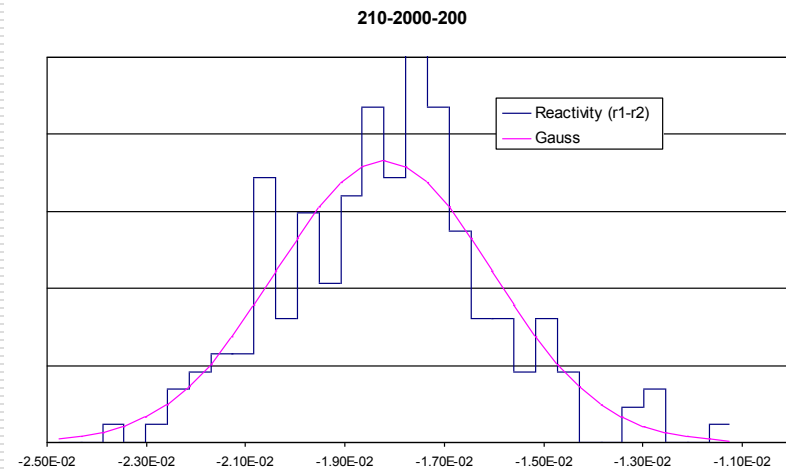
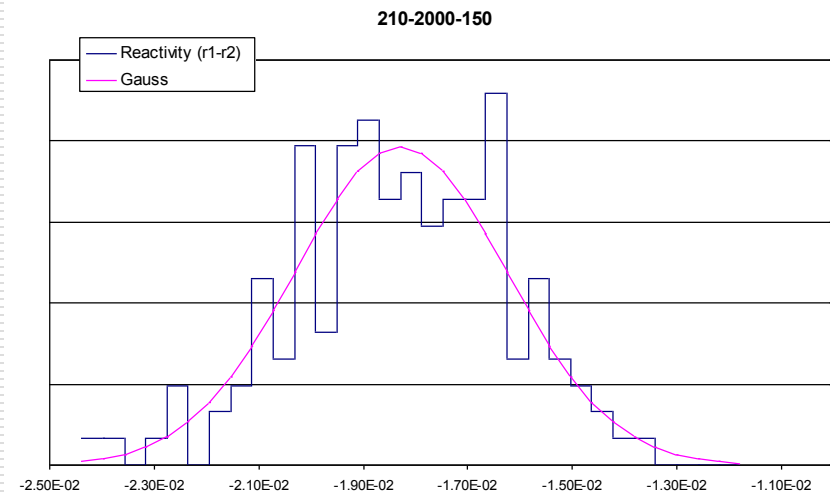
$$c_{12} = \frac{\sum_{i=1}^{npert} (k_i^1 - \bar{k}^1) \cdot (k_i^2 - \bar{k}^2)}{npert \cdot \sqrt{\Delta k^1 \cdot \Delta k^2}}$$

$$\Delta k^1 = \frac{\sum_{i=1}^{npert} (k_i^1 - \bar{k}^1)^2}{npert - 1}$$

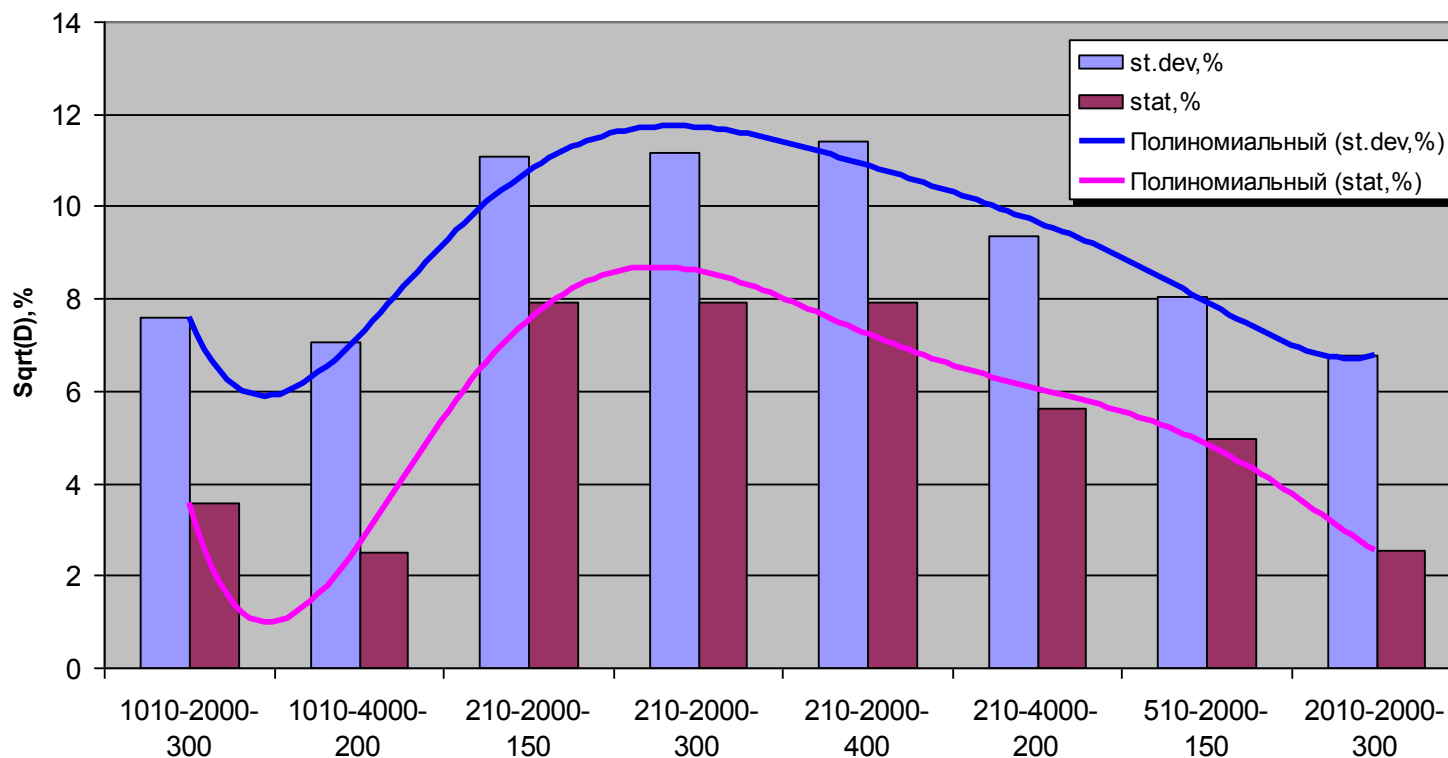
Рассчитывается среднестатистическое, по возмущениям констант, изменение реактивности и дисперсия

$$\bar{\rho}' = \frac{\sum_{p=1}^{npert} \frac{\rho'_p}{\Delta\rho'_p{}^2}}{\sum_{p=1}^{npert} \frac{1}{\Delta\rho'_p{}^2}} \quad D(\rho'^{tot}) = \frac{\sum_{p=1}^{npert} (\rho'_p - \bar{\rho}')^2}{npert - 1}$$

# НПЭР БН - Распределение эффекта



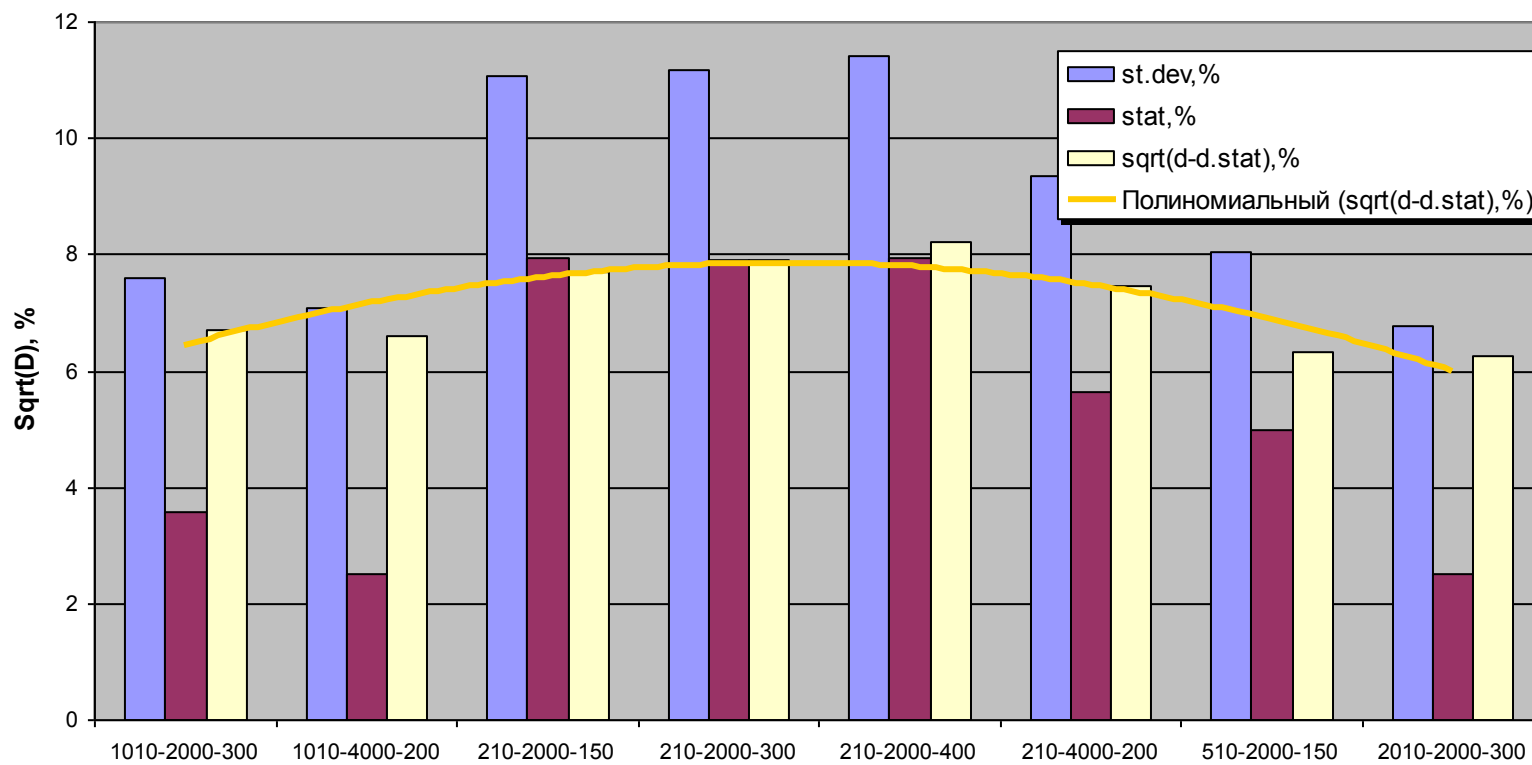
# НПЭР БН - Корреляция между полной дисперсией и статистической погрешностью



Расчёт	Статистика	Число возмущений
1010-2000-300	2 020 000	300
1010-4000-200	4 040 000	200
210-2000-150	420 000	150
210-2000-300	420 000	300
210-2000-400	420 000	400
210-4000-200	840 000	200
510-2000-150	1 020 000	150
2010-2000-300	4 040 000	300

Видно что полная дисперсия и стат. Погрешность коррелируют

# НПЭР БН - Расчёт константной погрешности

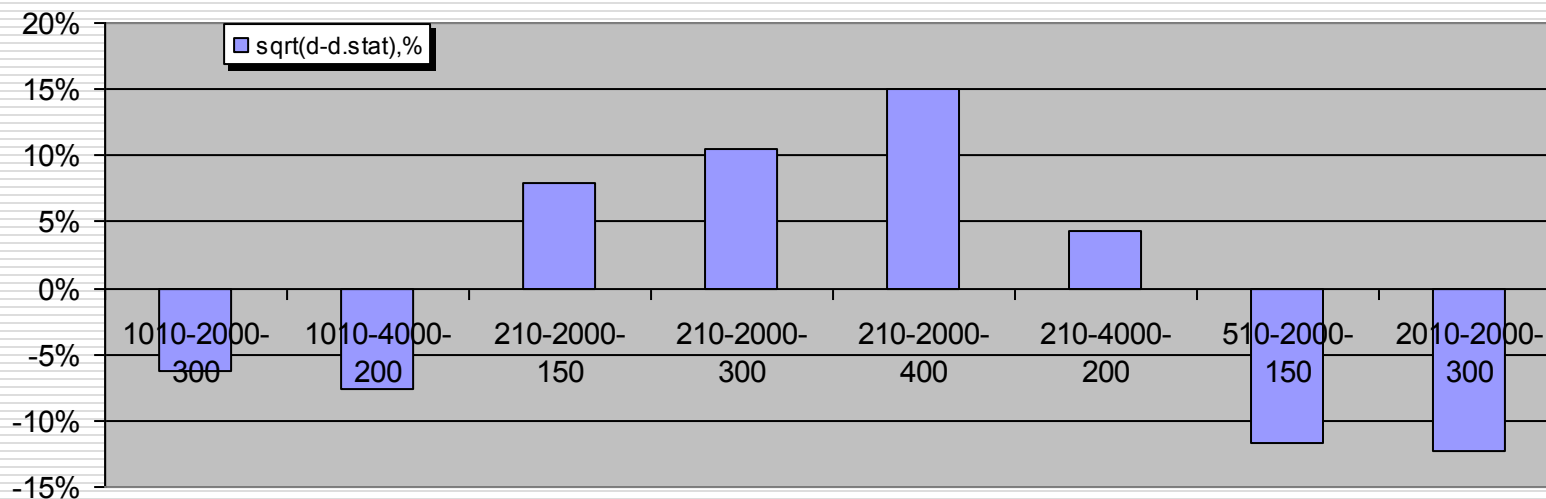


Где, корреляция между статистической и полной погрешностями

$$c = \frac{\sum_{i=1}^{npert} (k_i^{tot} - \bar{k}^{tot}) \cdot \Delta k^{stat}}{npert \cdot \sqrt{\Delta k^{tot} \cdot \Delta k^{stat}}}$$

# Погрешность определения константной составляющей погрешности НПЭР БН

Отклонение погрешностей от среднего, %



Расчёт	Статистика	Число возмущений	st.dev,%	stat,%	sqrt(d-d.stat),%	Отклонение, %
<b>1010-2000-300</b>	2 020 000	300	7.6	3.6	6.7	-6.2
<b>1010-4000-200</b>	4 040 000	200	7.1	2.5	6.6	-7.6
<b>210-2000-150</b>	420 000	150	11.1	7.9	7.7	8.0
<b>210-2000-300</b>	420 000	300	11.2	7.9	7.9	10.4
<b>210-2000-400</b>	420 000	400	11.4	7.9	8.2	15.0
<b>210-4000-200</b>	840 000	200	9.3	5.6	7.5	4.3
<b>510-2000-150</b>	1 020 000	150	8.0	5.0	6.3	-11.7
<b>2010-2000-300</b>	4 020 000	3000	6.8	2.5	6.3	-12.3
				Среднее	7.1	



# Расчёт погрешности эффекта реактивности от введения органов СУЗ

---

## 210-2000-500 (19:22:10.5)

Logo	average	st.dev.	x-sect.unc.	st.dev.,%	stat,%	sqrt(d-d.stat)
F0001 - Reactivity (r1-r2)	3.05311E-02	2.02946E-03	5.12656E-04	6.647	4.968	4.416
F0002 - Heating MODEL	2.52288E+09	2.02020E+08	3.47089E+07	8.008	6.632	4.488
F0003 - Heating 1	3.46982E+09	2.70328E+08	6.61403E+07	7.791	5.885	5.106

## 210-2000-400 (15:29:29.8)

Logo	average	st.dev.	x-sect.unc.	st.dev.,%	stat,%	sqrt(d-d.stat)
F0001 - Reactivity (r1-r2)	3.05631E-02	2.06316E-03	5.50570E-04	6.750	4.949	4.591
F0002 - Heating MODEL	2.53707E+09	2.04406E+08	3.81142E+07	8.057	6.554	4.685
F0003 - Heating 1	3.48336E+09	2.71798E+08	6.88758E+07	7.803	5.825	5.191

## 210-2000-300 (11:27:08.6)

Logo	average	st.dev.	x-sect.unc.	st.dev.,%	stat,%	sqrt(d-d.stat)
F0001 - Reactivity (r1-r2)	3.04439E-02	1.93887E-03	4.19590E-04	6.369	4.990	3.957
F0002 - Heating MODEL	2.52855E+09	1.84371E+08	1.69271E+07	7.292	6.622	3.052
F0003 - Heating 1	3.47642E+09	2.52713E+08	4.84269E+07	7.269	5.876	4.279

# Заключение

- ❑ Инструмент позволяет провести расчёты погрешностей без участия человека, за один запуск программы
- ❑ Методика может быть применена для детерминистских программ (TRIGEX TDODANT) Сейчас возмущение констант реализовано в CONSYST-e
- ❑ По представленной методике реализуется расчёт технологической погрешности
  - Неточности знания изотопного состава с учётом ков. матриц концентраций
  - Неточности знания температур материалов/зон

## ==== Инструкция пользователя ====

### Погрешность реактивности (при возмущении геометрии или материальных композиций)

```

NUMBER OF PERTURBATION: 150  NUMBER OF FUNCTIONALS: 2

--- Functional --- -- Value -- ----- St.dev.(unc.) ----- Average ----- St.dev. (
Reactivity (r1-r2) -1.79208E-02 +/- 4.16790E-04 ( 2.326 %) 1.01067E+00 +/- 1.42938E+00
Beta eff.          -3.18251E+00 +/- 2.02763E-01 ( 6.371 %) 3.50817E-03 +/- 4.96169E-03

Functional      F(mean-per)      1-sig  P(1-sig) P(2-sig) P(3-sig) P(>3-sig)  F(1-sig)  F(2-sig)  F(3-sig)
Reactivity (r1-r2) -1.82807E-02 1.14415E-03 0.69333 0.94000 1.00000 0.00000 -1.82029E-02 -1.82289E-02 -1.82842E-02
Beta eff.          -3.05734E+00 6.58654E-01 0.72667 0.92000 1.00000 0.00000 -3.06566E+00 -3.04131E+00 -3.06016E+00

Value and it's uncertainties via 150 perturbations
--- Functional --- -- Value -- ----- Total ----- Statistical ----- Cross-sections -----
Reactivity (r1-r2) -1.79208E-02 +/- 1.14415E-03 ( 6.259 %) +/- 4.08417E-04 ( 2.234 %) +/- 1.06878E-03 ( 5.846 %)
Beta eff.          -3.18251E+00 +/- 6.58654E-01 (21.543 %) +/- 2.55958E-01 ( 8.372 %) +/- 6.06886E-01 (19.850 %)
    
```

средняя по двум возмущениям величина функционала (для оценки в относит. единицах [Селезнёв стр.220])

величина функционала оценённая как среднее по возмущениям констант

F(>3-sig)

одно стандартное отклонение

абсолютная величина функционала на невозмущённых

статистическая погрешность функционала

погрешность функционала от сечений

---

Благодарю за  
внимание!