



ТОМСКИЙ  
ПОЛИТЕХ

# ЭВРИСТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ ПРОФИЛИРОВАНИЯ НЕОДНОРОДНОСТИ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ РЕАКТОРА ИРТ-Т

---

Д.В.Пасько  
Магистрант НИ ТПУ  
г.Томск

28.06.2024

# ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ РЕАКТОРЫ

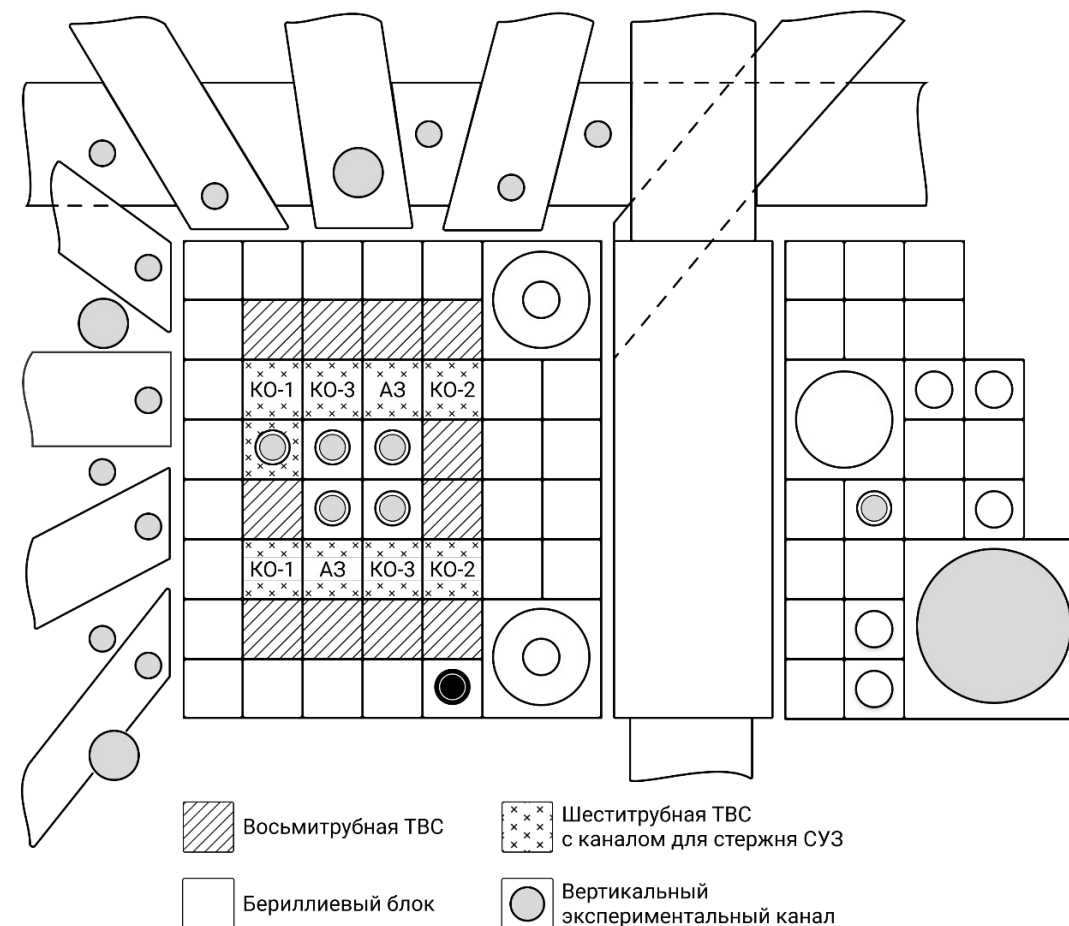
Источники ионизирующего излучения для проведения широкого спектра фундаментальных и прикладных исследований



# РЕАКТОР ИРТ-Т

- Тип реактора – бассейновый
- Мощность реактора – 6 МВт
- Отражатель: металлический бериллий
- Замедлитель и теплоноситель: вода
- Макс. плотность потока быстрых нейтронов:  $2.0 \cdot 10^{13} \text{ н} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$
- Макс. плотность потока тепловых нейтронов:  $2.1 \cdot 10^{14} \text{ н} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$
- Длительность топливной кампании 25-35 эфф.суток
- Загрузка активной зоны: ТВС ИРТ-3М
  - 11 восьмитрубных
  - 9 шеститрубных
- Максимальная объемная неравномерность энерговыделения  $K_v \approx 3.0$

Ведутся работы по повышению мощности реактора  
**до 10МВт**





# ПРОБЛЕМА ПРОФИЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ

## До перегрузки топлива

| Ячейка *                         | Глубина выгорания, % |       |       |       |
|----------------------------------|----------------------|-------|-------|-------|
|                                  | 6                    | 5     | 4     | 3     |
| 7                                | 13.23                | 9.58  | 41.41 | 49.68 |
| 6                                | 33.20                | 58.42 | 26.37 | 32.60 |
| 5                                | 59.14                | Be    | Be    | 41.00 |
| 4                                | 67.02                | Be    | Be    | 40.28 |
| 3                                | 32.47                | 23.94 | 57.97 | 31.17 |
| 2                                | 13.07                | 41.01 | 9.54  | 47.55 |
| Глубина выгорания по сторонам, % |                      |       |       |       |
| 35.11                            |                      | 37.76 |       |       |

| Ячейка                           | Энерговыведение, кВт |     |     |     |
|----------------------------------|----------------------|-----|-----|-----|
|                                  | 6                    | 5   | 4   | 3   |
| 7                                | 303                  | 348 | 282 | 264 |
| 6                                | 285                  | 240 | 378 | 348 |
| 5                                | 228                  | Be  | Be  | 369 |
| 4                                | 195                  | Be  | Be  | 360 |
| 3                                | 279                  | 348 | 246 | 345 |
| 2                                | 306                  | 261 | 351 | 258 |
| Энерговыведение по сторонам, кВт |                      |     |     |     |
| 279                              |                      | 320 |     |     |

- Разница между наименее и наиболее выгоревшими ТВС  $\approx 50\%$
- **«Правосторонний» перекося** по энерговыведению
- Средняя глубина выгорания 36.4%

## После перегрузки топлива

| Ячейка *                         | Глубина выгорания, % |       |       |       |
|----------------------------------|----------------------|-------|-------|-------|
|                                  | 6                    | 5     | 4     | 3     |
| 7                                | 13.23                | 9.58  | 41.41 | 49.68 |
| 6                                | 33.20                | 58.42 | 26.37 | 32.60 |
| 5                                | 0.00                 | Be    | Be    | 41.00 |
| 4                                | 0.00                 | Be    | Be    | 40.28 |
| 3                                | 32.47                | 23.94 | 57.97 | 31.17 |
| 2                                | 13.07                | 41.01 | 9.54  | 47.55 |
| Глубина выгорания по сторонам, % |                      |       |       |       |
| 22.49                            |                      | 37.76 |       |       |

| Ячейка                           | Энерговыведение, кВт |     |     |     |
|----------------------------------|----------------------|-----|-----|-----|
|                                  | 6                    | 5   | 4   | 3   |
| 7                                | 306                  | 327 | 252 | 228 |
| 6                                | 291                  | 237 | 348 | 303 |
| 5                                | 407                  | Be  | Be  | 321 |
| 4                                | 408                  | Be  | Be  | 315 |
| 3                                | 288                  | 351 | 228 | 300 |
| 2                                | 312                  | 249 | 318 | 222 |
| Энерговыведение по сторонам, кВт |                      |     |     |     |
| 317                              |                      | 283 |     |     |

- Разница между наименее и наиболее выгоревшими ТВС  $\approx 45\%$
- **«Левосторонний» перекося** по энерговыведению
- Средняя глубина выгорания 30.1%

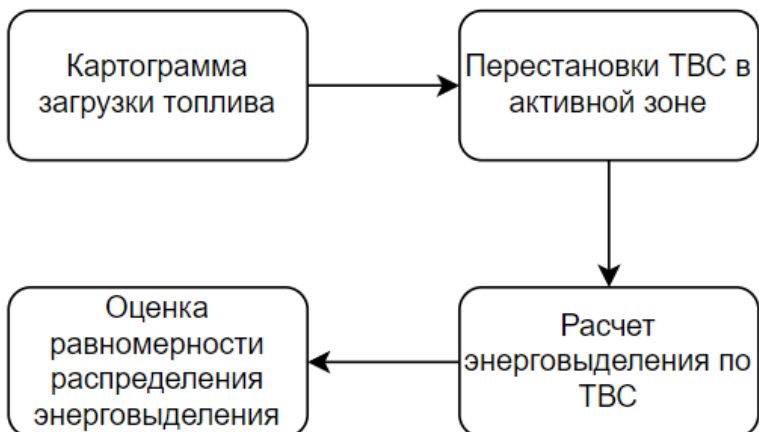
\*нумерация ячеек имеет вид: 7-6, где 7 – строка, 6 – столбец

**Среднее изменение энерговыведения по ячейкам составило  $\approx 15\%$**

# ПРОБЛЕМА ПРОФИЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ



## Моделирование в MCU-PTR\*



### До профилирования

Глубина выгорания, %

| Ячейка *                         | 6     | 5     | 4     | 3     |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| 7                                | 13.23 | 9.58  | 41.41 | 49.68 |
| 6                                | 33.20 | 58.42 | 26.37 | 32.60 |
| 5                                | 0.00  | Be    | Be    | 41.00 |
| 4                                | 0.00  | Be    | Be    | 40.28 |
| 3                                | 32.47 | 23.94 | 57.97 | 31.17 |
| 2                                | 13.07 | 41.01 | 9.54  | 47.55 |
| Глубина выгорания по сторонам, % |       |       |       |       |
|                                  |       | 22.49 |       | 37.76 |

Энерговыделение, кВт

| 6                                | 5   | 4   | 3   | Ячейка |
|----------------------------------|-----|-----|-----|--------|
| 306                              | 327 | 252 | 228 | 7      |
| 291                              | 237 | 348 | 303 | 6      |
| 407                              | Be  | Be  | 321 | 5      |
| 408                              | Be  | Be  | 315 | 4      |
| 288                              | 351 | 228 | 300 | 3      |
| 312                              | 249 | 318 | 222 | 2      |
| Энерговыделение по сторонам, кВт |     |     |     |        |
|                                  |     | 317 |     | 283    |

### После профилирования

Глубина выгорания, %

| Ячейка *                         | 6     | 5     | 4     | 3     |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| 7                                | 41.41 | 9.58  | 13.23 | 49.68 |
| 6                                | 33.20 | 58.42 | 26.37 | 32.60 |
| 5                                | 0.00  | Be    | Be    | 41.00 |
| 4                                | 0.00  | Be    | Be    | 40.28 |
| 3                                | 32.47 | 23.94 | 57.97 | 31.17 |
| 2                                | 41.01 | 13.07 | 9.54  | 47.55 |
| Глубина выгорания по сторонам, % |       |       |       |       |
|                                  |       | 28.52 |       | 32.58 |

Энерговыделение, кВт

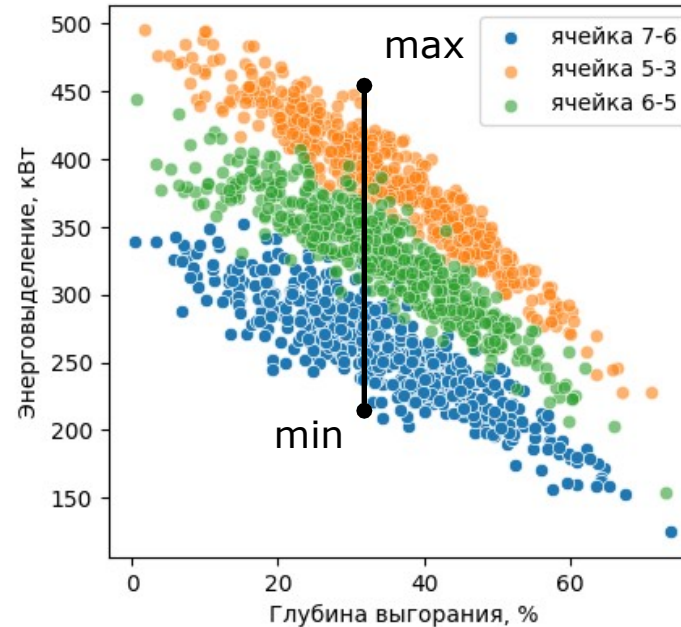
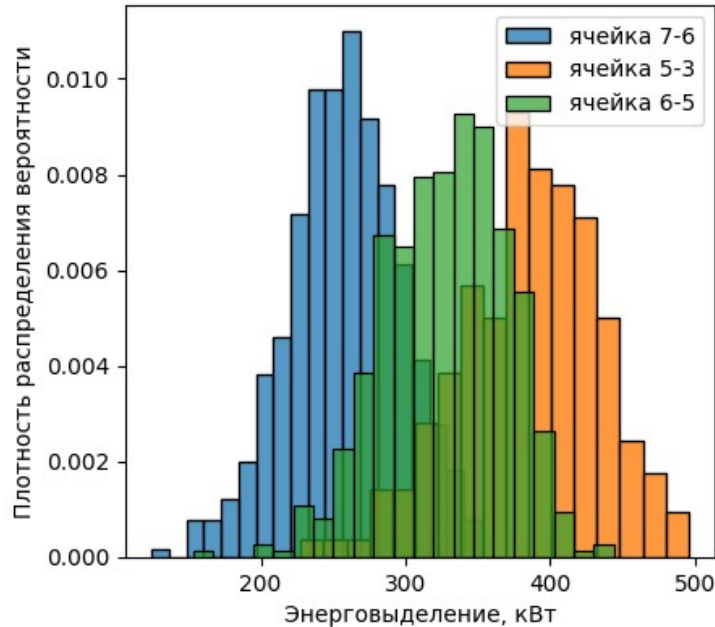
| 6                                | 5   | 4   | 3   | Ячейка |
|----------------------------------|-----|-----|-----|--------|
| 237                              | 321 | 312 | 231 | 7      |
| 285                              | 234 | 348 | 309 | 6      |
| 393                              | Be  | Be  | 330 | 5      |
| 396                              | Be  | Be  | 327 | 4      |
| 288                              | 345 | 231 | 306 | 3      |
| 249                              | 312 | 318 | 228 | 2      |
| Энерговыделение по сторонам, кВт |     |     |     |        |
|                                  |     | 305 |     | 295    |

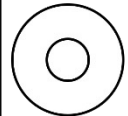




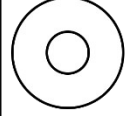
**Существует множество комбинаций ТВС с разным выгоранием**

\*Аттестована для расчетного сопровождения

# ПРОБЛЕМА ПРОФИЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ

Несимметричная форма бериллиевого отражателя и режим частичных перегрузок



|  |     |   |   |     |   |
|--|-----|---|---|-----|---|
|  |     |   |   |     |  |
|  | 7-6 | 7-5   | 7-4   | 7-3 |   |
|  | 6-6 | 6-5   | 6-4   | 6-3 |   |
|  | 5-6 |  |  | 5-3 |   |
|  | 4-6 |  |  | 4-3 |   |
|  | 3-6 | 3-5   | 3-4   | 3-3 |   |
|  | 2-6 | 2-5   | 2-4   | 2-3 |   |
|  |     |   |   | AP  |  |

Разница между периферийной (7-6) и наиболее напряженной (5-3) ячейками:

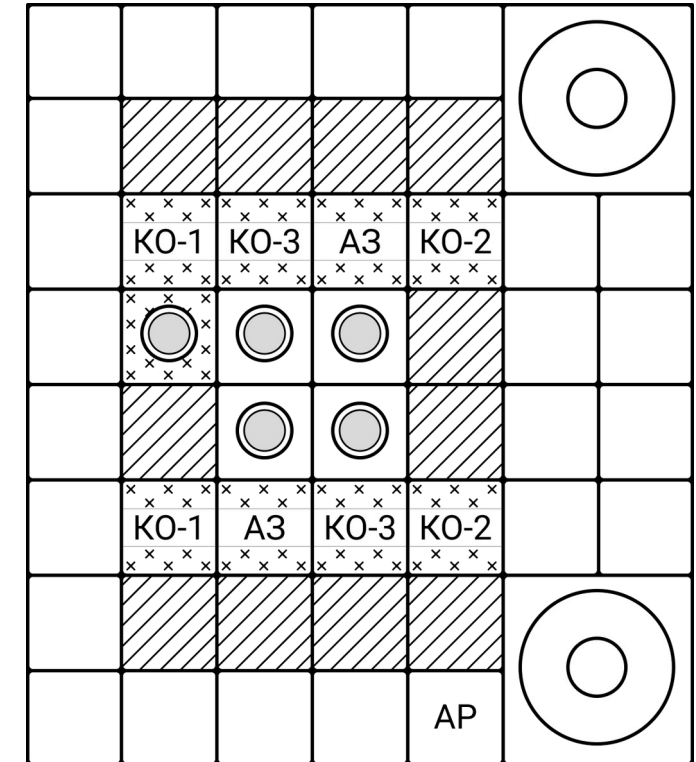
- Средняя  $\approx 40\%$
- **Максимальная  $\approx 55\%$**

Энерговыведение в наиболее напряженной ячейке **может превышать 500кВт,**  
при среднем энерговыведении **300кВт**



# ОСНОВНЫЕ ТРУДНОСТИ

- В рамках 1-й картограммы **только** для 8-ми трубных ТВС существует  **$\approx 40 \cdot 10^6$  вариаций**
- Каждая картограмма имеет свои оптимальные перестановки – типовой регламент профилирования неприменим
- Присутствует **высокая неоднородность** распределения излучения между ячейками
- Отсутствует симметрия
- Необходимо моделирование нейтронно-физических характеристик **для каждого решения**



Восьмитрубная ТВС



Шеститрубная ТВС  
с каналом для стержня СУЗ

**Поиск решений на основе практического - эвристического алгоритма поиска**

# ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ (ГА)

Представление объекта в виде **гетонипа**, характеризующего каждое компоновочное решение

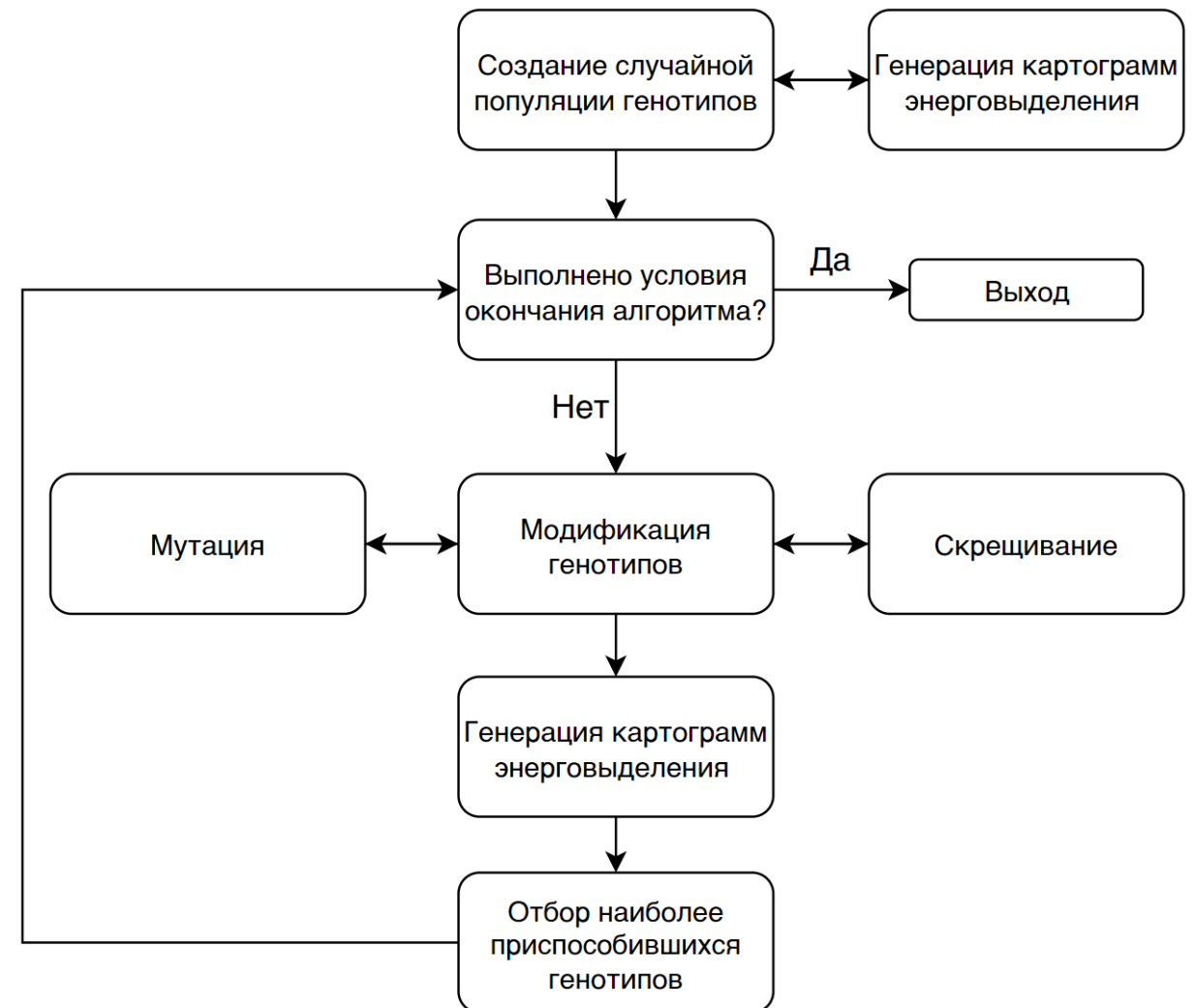
Методы естественной эволюции:

- мутация
- скрещивание
- отбор
- наследование

Функция «приспособленности» – **количественная оценка решения**

Генерация картограмм энерговыделения на основе **прогнозной модели:**

- вход - картограмма выгорания
- выход – картограмма энерговыделения





# АДАПТАЦИЯ ЗАДАЧИ ПОД ГА

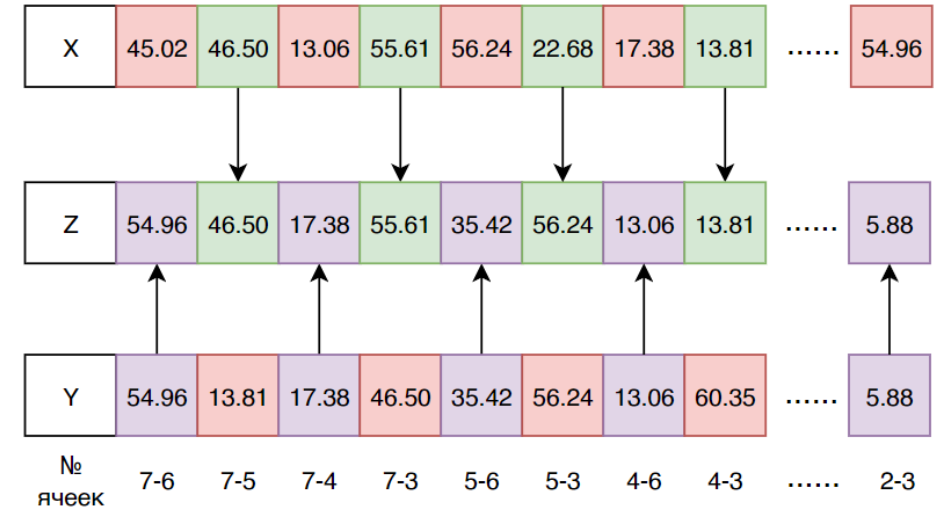
Генотип - одномерный массив:

- глубина выгорания топлива в каждой ячейке
- энерговыделение в каждой ячейке
- запас реактивности

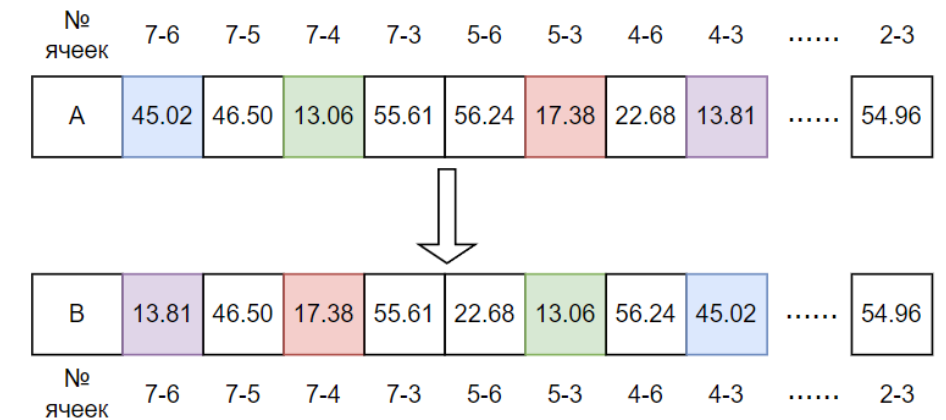
**41 ген** в каждом массиве

Мутация и скрещивание – **генераторы**  
**КОМПОНОВОК**

Генерируются решения, содержащие только исходный набор генов – **дубликаты и пропуски исключены**



Скрещивание



Мутация

# АДАПТАЦИЯ ЗАДАЧИ ПОД ГА

Основные целевые функции

- критерии парности – симметрии ячеек
- наиболее энергонапряженная ТВС
- запас реактивности

«Приспособленность» компоновочного решения

$$F(x) = \sum_i^N f_i(x) \rightarrow 1$$

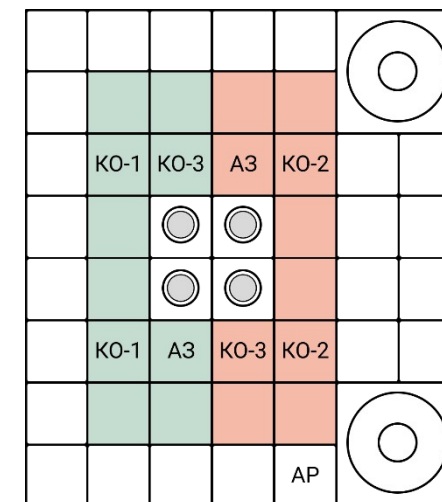
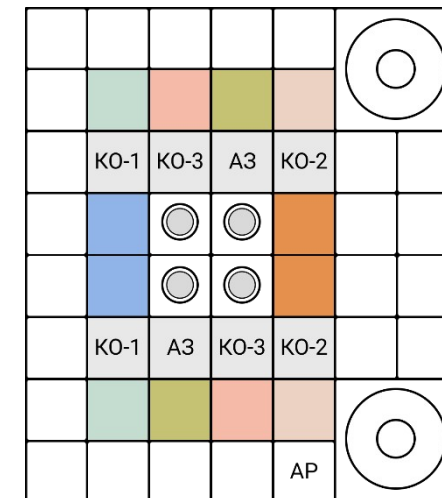
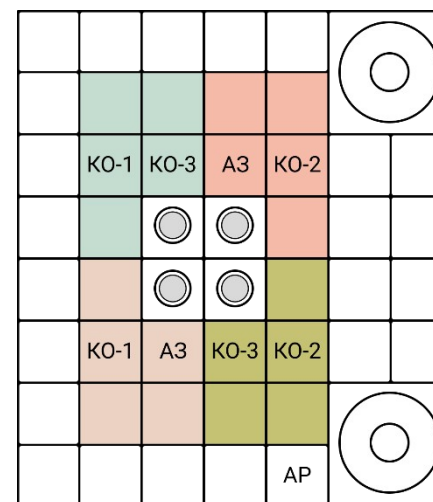
**N > 1 -> Многокритериальная задача**

Возможны конфликтные условия – один параметр ухудшает другой

**Оптимизация F может быть затруднена**

**F = 1 – идеальное решение**

3 способа  
представления  
симметрии ячеек



# ГА. РАБОТОСПОСОБНОСТЬ

Полностью случайная выборка

|   | 6    | 5    | 4    | 3    |
|---|------|------|------|------|
| 7 | 6.5  | 36.4 | 16.6 | 3.4  |
| 6 | 0.0  | 26.5 | 51.6 | 57.9 |
| 5 | 29.4 | nan  | nan  | 36.6 |
| 4 | 47.5 | nan  | nan  | 17.1 |
| 3 | 0.0  | 47.1 | 26.2 | 55.2 |
| 2 | 48.6 | 8.9  | 3.8  | 42.0 |

Выгорание

|   | 6   | 5   | 4   | 3   |
|---|-----|-----|-----|-----|
| 7 | 326 | 280 | 333 | 356 |
| 6 | 342 | 343 | 285 | 251 |
| 5 | 316 | nan | nan | 363 |
| 4 | 258 | nan | nan | 392 |
| 3 | 323 | 255 | 323 | 235 |
| 2 | 198 | 296 | 299 | 238 |

Энерговыведение

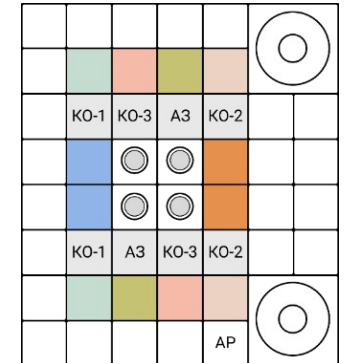
|   | 6    | 5    | 4    | 3    |
|---|------|------|------|------|
| 7 | 6.5  | 16.6 | 42.0 | 8.9  |
| 6 | 0.0  | 26.5 | 51.6 | 57.9 |
| 5 | 29.4 | nan  | nan  | 48.6 |
| 4 | 36.4 | nan  | nan  | 47.5 |
| 3 | 0.0  | 47.1 | 26.2 | 55.2 |
| 2 | 17.1 | 36.6 | 3.4  | 3.8  |

Выгорание

Найденное решение

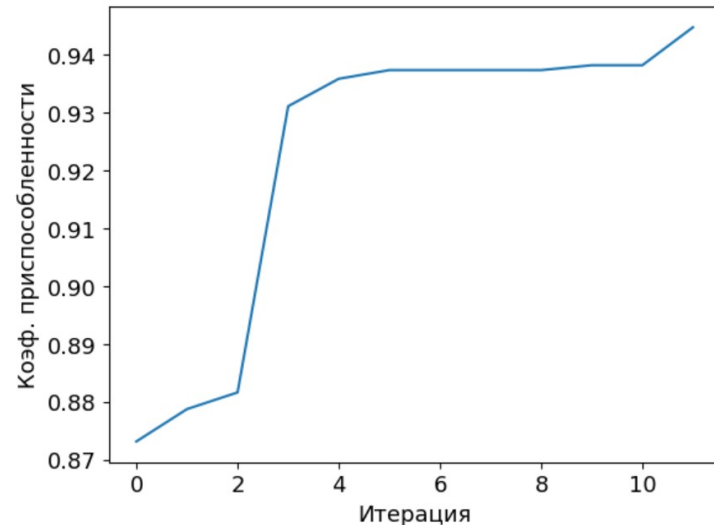
|   | 6   | 5   | 4   | 3   |
|---|-----|-----|-----|-----|
| 7 | 316 | 321 | 253 | 323 |
| 6 | 350 | 338 | 266 | 237 |
| 5 | 327 | nan | nan | 298 |
| 4 | 304 | nan | nan | 299 |
| 3 | 342 | 269 | 331 | 230 |
| 2 | 285 | 260 | 315 | 317 |

Энерговыведение



$F \approx 0.75$

$F \approx 0.95$



Формирование симметричных пар по  
энерговыведению  
**при случайной комбинации ТВС**

**Быстрая работа алгоритма**  
**Корректность под вопросом?**



## Методы многокритериальной оптимизации

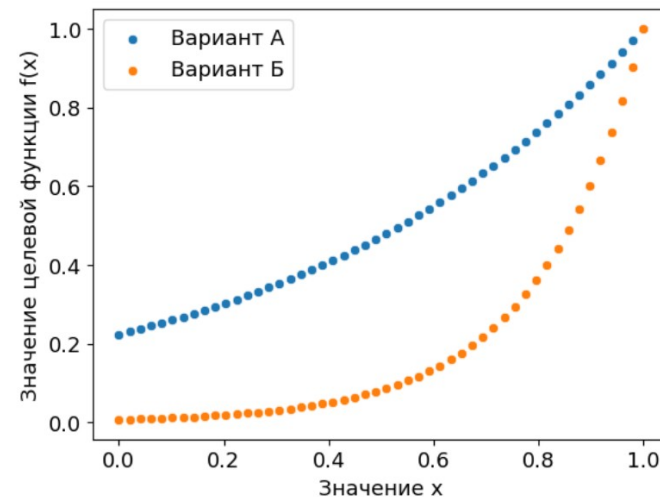
### Весовая функция

Перенормировка  
целевых функция

$$F(x) = \sum_i^N f_i(x) \cdot \omega_i \rightarrow 1$$

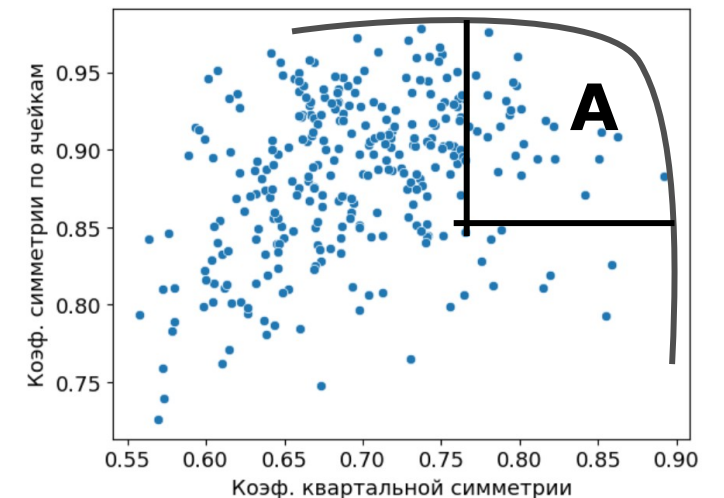
### Масштабирование и пределы целевых функций

Установление максимально  
допустимых значений, штрафных  
функция



### Парето фронт

Наиболее оптимальные  
варианты  
среди **5-ти функций**



# ГА. ПРИМЕНЕНИЕ

Полностью случайная выборка

|   | 6    | 5    | 4    | 3    |
|---|------|------|------|------|
| 7 | 6.5  | 36.4 | 16.6 | 3.4  |
| 6 | 0.0  | 26.5 | 51.6 | 57.9 |
| 5 | 29.4 | nan  | nan  | 36.6 |
| 4 | 47.5 | nan  | nan  | 17.1 |
| 3 | 0.0  | 47.1 | 26.2 | 55.2 |
| 2 | 48.6 | 8.9  | 3.8  | 42.0 |

Выгорание, %

|   | 6   | 5   | 4   | 3   |
|---|-----|-----|-----|-----|
| 7 | 326 | 280 | 333 | 356 |
| 6 | 342 | 343 | 285 | 251 |
| 5 | 316 | nan | nan | 363 |
| 4 | 258 | nan | nan | 392 |
| 3 | 323 | 255 | 323 | 235 |
| 2 | 198 | 296 | 299 | 238 |

Энерговыведение, кВт

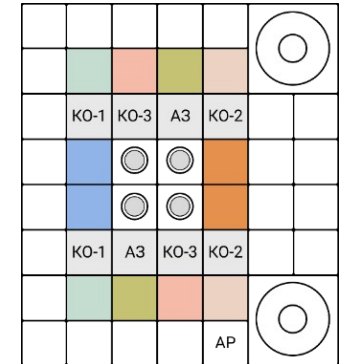
Найденное решение

|   | 6    | 5    | 4    | 3    |
|---|------|------|------|------|
| 7 | 6.5  | 47.5 | 3.4  | 42.0 |
| 6 | 0.0  | 26.5 | 51.6 | 57.9 |
| 5 | 29.4 | nan  | nan  | 17.1 |
| 4 | 36.6 | nan  | nan  | 16.6 |
| 3 | 0.0  | 47.1 | 26.2 | 55.2 |
| 2 | 8.9  | 3.8  | 48.6 | 36.4 |

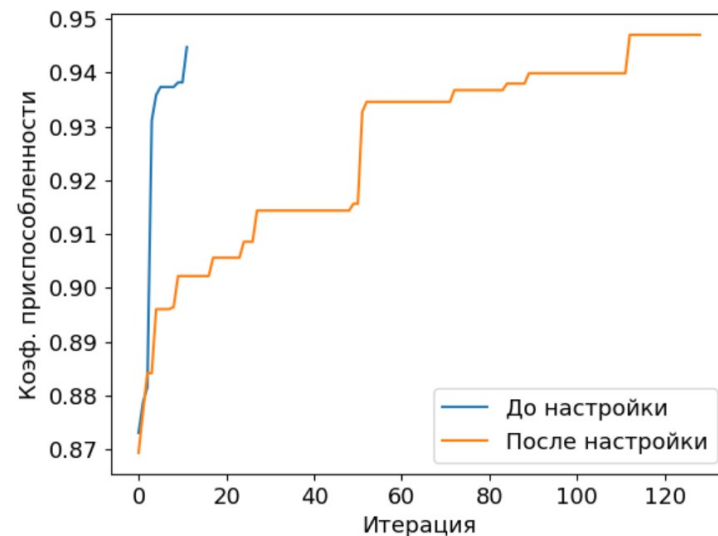
Выгорание, %

|   | 6   | 5   | 4   | 3   |
|---|-----|-----|-----|-----|
| 7 | 310 | 237 | 337 | 261 |
| 6 | 336 | 348 | 265 | 240 |
| 5 | 320 | nan | nan | 404 |
| 4 | 304 | nan | nan | 391 |
| 3 | 335 | 261 | 344 | 235 |
| 2 | 287 | 317 | 220 | 258 |

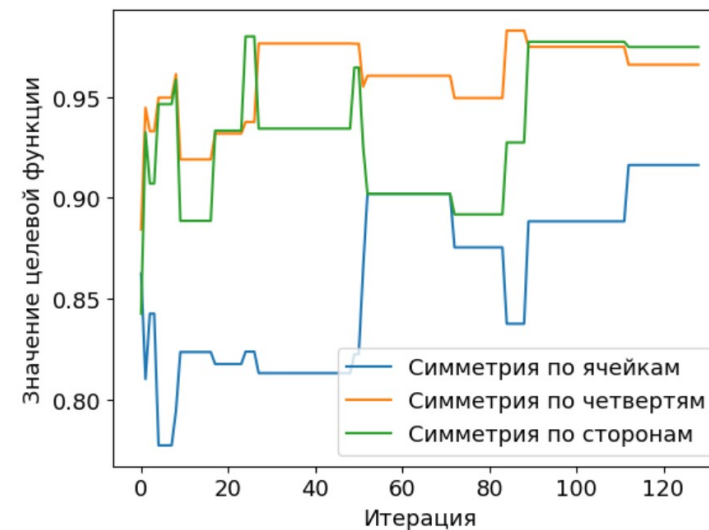
Энерговыведение, кВт



$F \approx 0.75$



$F \approx 0.95$



# ГА. ВИЗУАЛИЗАЦИЯ

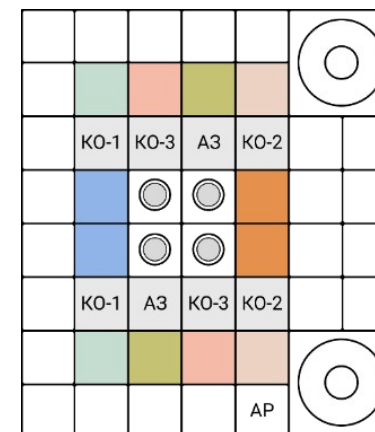
## Симуляция работы ГА

Выгорание, %

|   | 6    | 5    | 4    | 3    |
|---|------|------|------|------|
| 7 | 9.5  | 41.0 | 13.1 | 13.2 |
| 6 | 33.2 | 58.4 | 26.4 | 32.6 |
| 5 | 0.0  | nan  | nan  | 41.0 |
| 4 | 0.0  | nan  | nan  | 9.6  |
| 3 | 32.5 | 23.9 | 58.0 | 31.2 |
| 2 | 47.6 | 49.7 | 41.4 | 40.3 |

Энерговыведение, кВт

|   | 6   | 5   | 4   | 3   |
|---|-----|-----|-----|-----|
| 7 | 323 | 277 | 353 | 363 |
| 6 | 289 | 260 | 389 | 341 |
| 5 | 386 | nan | nan | 357 |
| 4 | 360 | nan | nan | 412 |
| 3 | 247 | 308 | 223 | 294 |
| 2 | 188 | 187 | 222 | 228 |



Длительность поиска и обработки **не превышает 2-4 минут**

Среднее количество анализируемых вариаций **≈20 000**

**F ≈0.95 для 95% анализируемых компоновок**

Внедрен метод для автоматического создания программы перестановок в активной зоне



# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Режим частичных перегрузок, несимметричные форма бериллиевого отражателя и ячейки групп стержней регулирования – причины образования участков с высокой неравномерностью энерговыделения в активной зоне реактора ИРТ-Т
- Энерговыделение в наиболее энергонапряженной ТВС превышает 500кВт, при среднем энерговыделении 300 кВт ( $K_{\max} / K_{\text{aver}} \approx 1.7$ )
- Большое количество возможных вариаций ТВС с различным выгоранием исключает применение классического перебора вариантов для поиска оптимального решения
- Предложен генетический алгоритм оптимизации, основанный на методах эволюции, и рассмотрены подходы к адаптации алгоритма под задачи профилирования энерговыделения
- Разработанный алгоритм способен находить оптимальные компоновочные решения в независимости от исходной загрузки (выборки)
- Количество анализируемых решений  $\approx 20\ 000$
- Длительность работы алгоритма 2-4 минуты для поиска решения с  $F \approx 0.95$

# Спасибо за внимание!

Д.В.Пасько  
dvp52@tpu.ru  
г.Томск