

ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХ

**МОДЕЛЬ МАШИННОГО
ОБУЧЕНИЯ НА ГАУССОВСКИХ
ПРОЦЕССАХ ДЛЯ ПРЕДСКАЗАНИЯ
ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В
ТОПЛИВНЫХ ЯЧЕЙКАХ
АКТИВНОЙ ЗОНЫ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО
ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА**

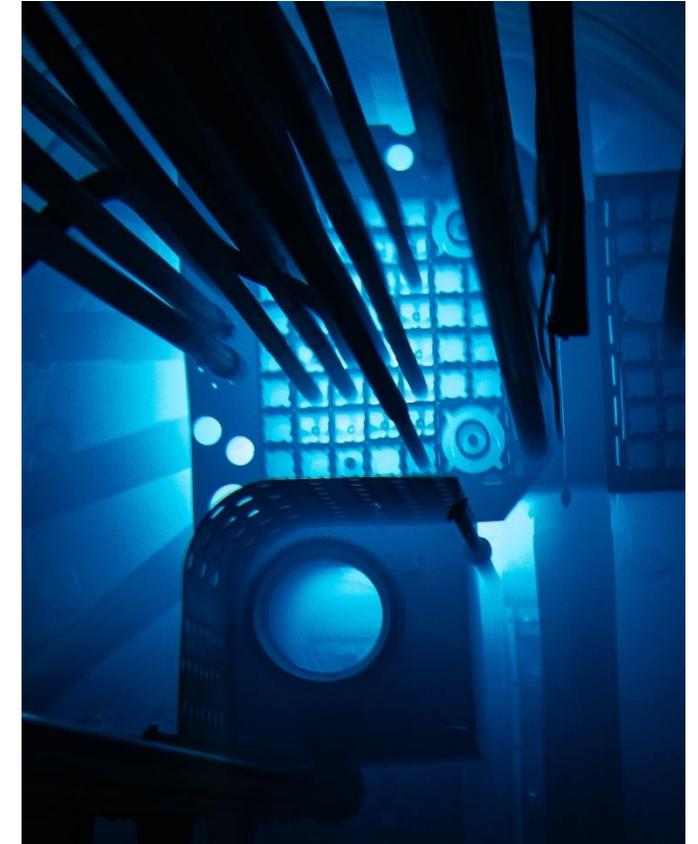
Н.В.Смольников
Аспирант НИ ТПУ
г.Томск

21.06.2024

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ РЕАКТОРЫ

Применение исследовательских ядерных установок в научных и производственных направлениях:

- Ядерная медицина
- Окрашивание полудрагоценных камней
- Ядерное легирование кремния
- Нарботка изотопов медицинского и технического назначений
- Разработка и тестирование перспективных конструкционных и функциональных материалов
- Изучение кристаллических и магнитных структур порошков



Излучение Вавилова –
Черенкова на реакторе
ИРТ-Т

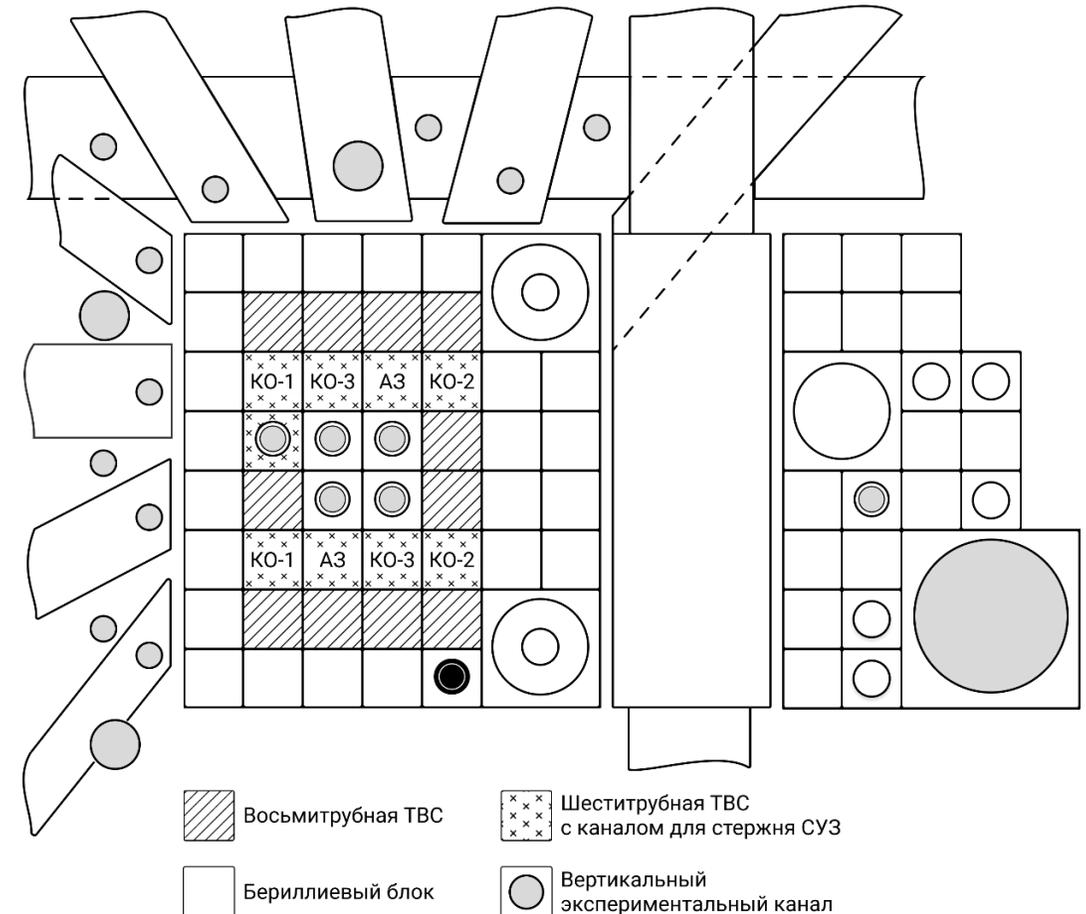
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ РЕАКТОРЫ



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		

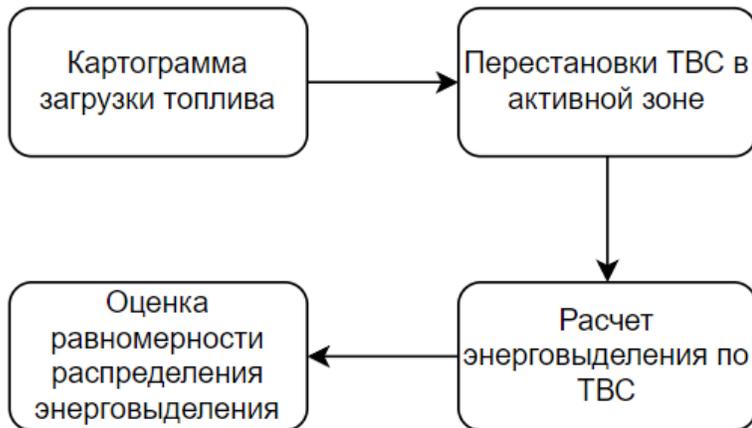
- Разница между наименее и наиболее выгоревшими ТВС $\approx 45\%$
- **«Левосторонний» перекося** по энерговыведению
- Средняя глубина выгорания 30.1%

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

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

ПРОБЛЕМА ПРОФИЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ

Моделирование процесса переноса излучения и определение нейтронно-физических характеристик реактора на основе трехмерной полномасштабной модели в ПС MCU-PTR*



- Итерационный процесс
- Выбор ячеек для перестановок на основе **предположений**
- Эффективность перестановок определяется **по результатам моделирования**
- Существует множество возможных комбинаций – наиболее оптимальная конфигурация **может быть не достигнута**
- Временные затраты на оценку схем перестановок и подготовку индивидуальной программы **4-12 часов**

ПРОБЛЕМА ПРОФИЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ

Концепция оптимизации процесса профилирования энерговыделения



ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Обучение с учителем

Глубина выгорания, %					Энерговыведение, кВт				
Ячейка*	6	5	4	3	6	5	4	3	Ячейка
7	13.23	9.58	41.41	49.68	306	327	252	228	7
6	33.20	58.42	26.37	32.60	291	237	348	303	6
5	0.00	Be	Be	41.00	407	Be	Be	321	5
4	0.00	Be	Be	40.28	408	Be	Be	315	4
3	32.47	23.94	57.97	31.17	288	351	228	300	3
2	13.07	41.01	9.54	47.55	312	249	318	222	2

Значения глубины выгорания – множество входных признаков $\mathbf{X}_{m,n}$

Значения энерговыведения – множество допустимых ответов $\mathbf{Y}_{m,n}$

$$\mathbf{X}_{mn} = \begin{pmatrix} X_{11} & \dots & X_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{m1} & \dots & X_{mn} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{Y}_{mn} = \begin{pmatrix} Y_{11} & \dots & Y_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{m1} & \dots & Y_{mn} \end{pmatrix}$$

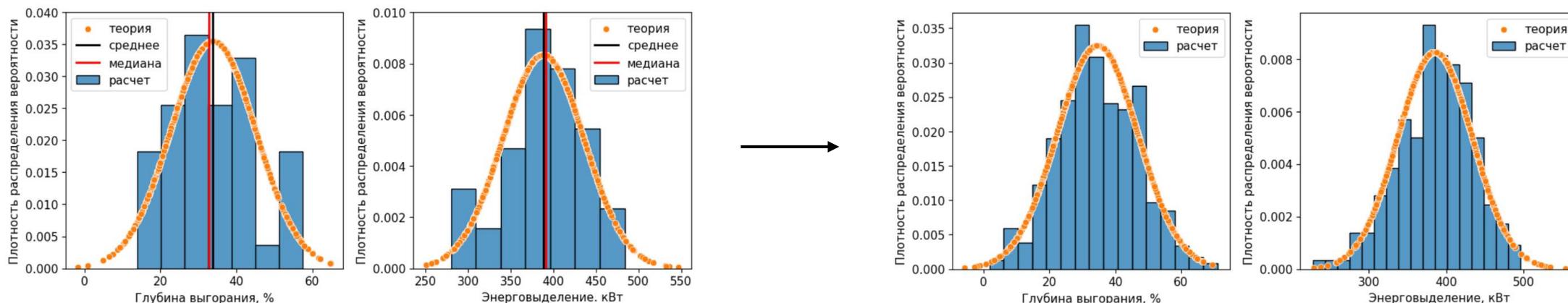
$$g_{m1} : \mathbf{X}_{mn} \rightarrow Y_{m1}$$

$$R(g_{m1}) = \frac{1}{m} \sum_i^m L(y_{i1}, g_{i1})$$

$$\mathbf{R}(\mathbf{g}_{mn}) = [R(g_{m1}), \dots, R(g_{mn})]$$

РАБОТА С ДАННЫМИ

«The 10 Times Rule» - не менее 10 примеров на каждый признак



До аугментации

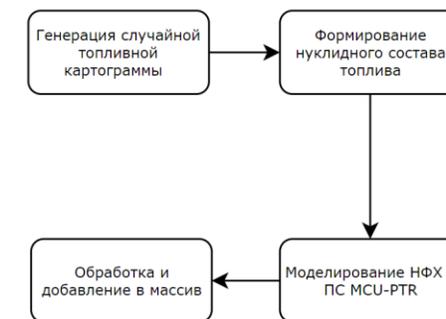
Размер исходной выборки – 80 топливных загрузок

Недостаток примеров - искаженные формы распределений

После аугментации

Размер исходной выборки – 600 топливных загрузок

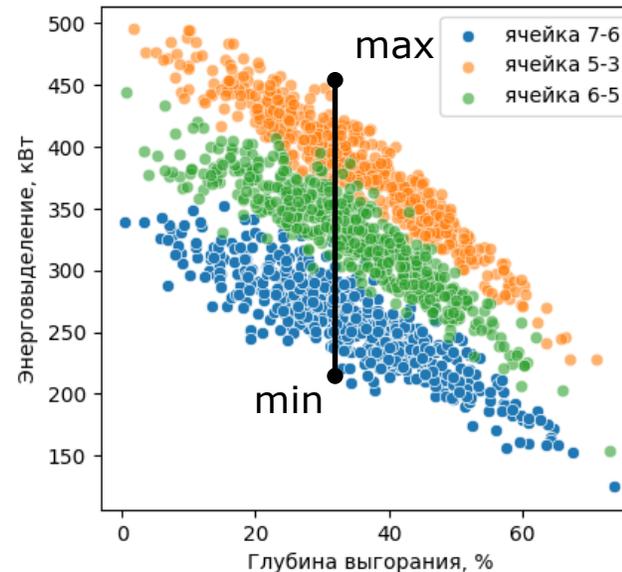
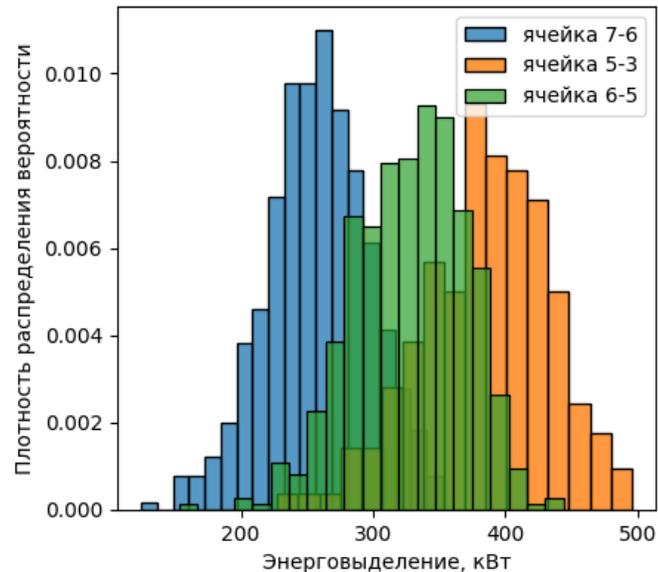
Отсутствие пропусков

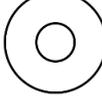


Процесс аугментации

РАБОТА С ДАННЫМИ

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	

Для **«идеальной»** активной зоны энерговыведение в каждой ячейке **300кВт**

Средняя разница между периферийной (7-6) и напряженной (5-3) ячейками **составляет $\approx 40\%$**

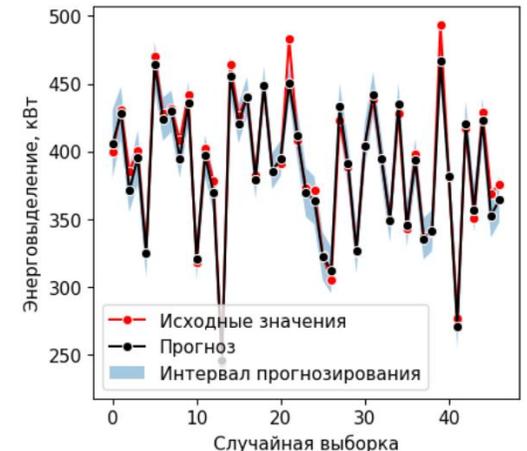
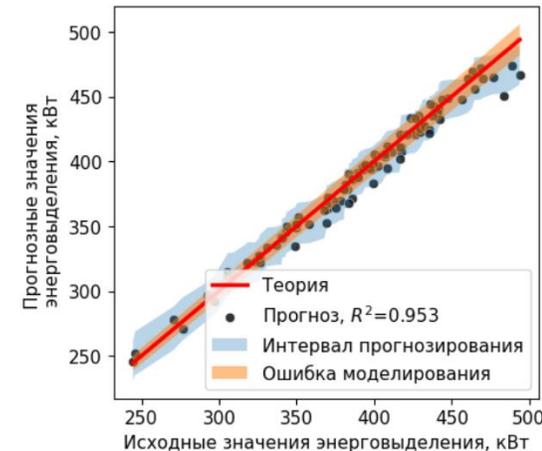
Нулевая гипотеза H_0 о нормальности распределений **отвергается** по критерию асимметрии и эксцесса для некоторых центральных ячеек

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ

Оценка производительности на основе кросс-валидации

Алгоритм	R^2 по ячейкам	CAO* по ячейкам, %
Гребневая регрессия (Ridge)	0.91	2.3
Лассо регрессия (Lasso)	0.01	97.1
Метод опорных векторов (SVM)	0.71	5.5
Метод ближайших соседей (KNN)	0.55	7.0
Гауссовский процесс (GPR)	0.95	1.9
Градиентный бустинг (GBR)	0.88	2.8

*CAO – среднее абсолютное отклонение



Интервал прогнозирования (PI) при $2\sigma \pm 14.7$ кВт

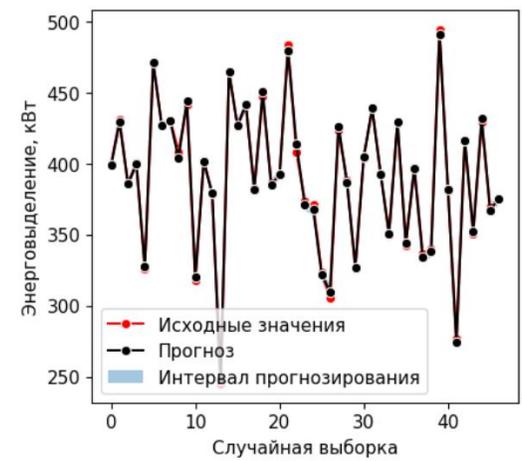
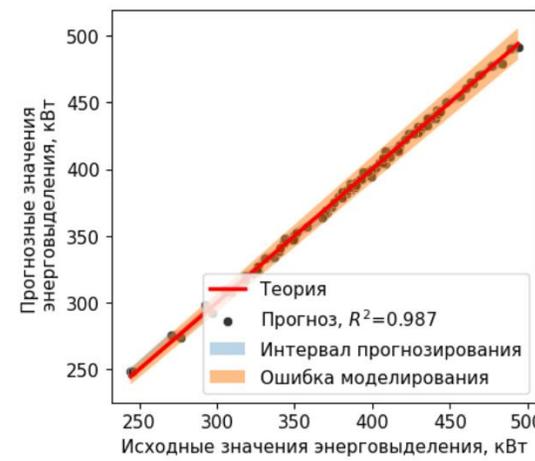
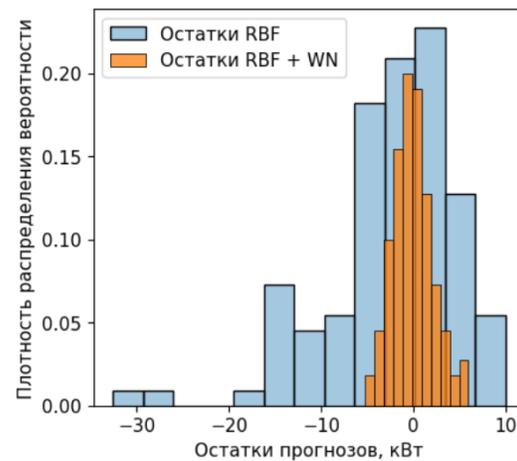
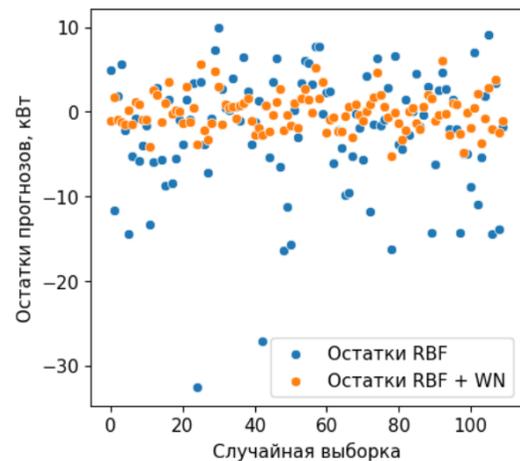
Выбор в пользу **GPR** для подбора оптимальной ковариационной функции (кернел)

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ

Среднее значение Ковариационная функция Радиальная базисная функция (RBF) Белый шум (WN)

$$\mathbf{y} \sim N(\mu(\mathbf{X}), k(\mathbf{X}, \mathbf{X}'))$$

$$k(\mathbf{X}, \mathbf{X}') = \sigma_{RBF}^2 \exp\left(-\frac{(\mathbf{X} - \mathbf{X}')^T (\mathbf{X} - \mathbf{X}')}{2l^2}\right) + \sigma_n^2 I_n$$



Точность работы модели GPR с ковариационными функциями **RBF и WN**:

- R^2 составил ≈ 0.99
- CAO составило 0.5%
- PI при $2\sigma \pm 4.5$ кВт

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ

Моделирование в MCU-PTR

Прогноз GPR (RBF + WN)

Пример №1

Ячейка	6	5	4	3
7	256	272	345	309
6	240	367	375	339
5	300	Be	Be	423
4	313	Be	Be	292
3	256	293	295	338
2	201	265	262	259

6	5	4	3	Ячейка
254	273	347	312	7
242	368	377	340	6
299	Be	Be	428	5
310	Be	Be	293	4
254	291	295	339	3
199	263	260	256	2

Пример №2

Ячейка	6	5	4	3
7	239	299	298	250
6	269	344	357	328
5	310	Be	Be	370
4	303	Be	Be	383
3	263	337	344	263
2	276	260	208	299

6	5	4	3	Ячейка
238	298	294	248	7
269	345	356	326	6
311	Be	Be	369	5
305	Be	Be	382	4
263	339	346	263	3
277	264	209	300	2

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Высокая степень неравномерности излучения в активной зоне реактора ИРТ-Т является причиной значительного перераспределения энерговыделения при изменении компоновки топлива
- Выравнивание неравномерности энерговыделения требует предварительного ресурсозатратного моделирования и последующей разработки индивидуального плана перестановки топлива
- Предложено использовать машинное обучение с учителем для прогнозирования энерговыделения в ячейках на основе глубины выгорания топлива
- Подготовлен датасет, состоящий из 600 уникальных картограмм загрузок активной зоны реактора
- Проведены тесты нормальности в рамках H_0 – существуют ячейки, для которых H_0 отвергается
- Проведенный корреляционный анализ показал наличие связи между входными и выходными признаками
- Проведен сравнительный анализ применимости моделей машинного обучения (Ridge, Lasso, SVM, GPR и др.) для рассматриваемой задачи
- Наивысшую точность показала модель GPR: $R^2=0.95$, CAO = 1.9%, PI = ± 14.7 кВт
- Настойка модели за счет использования составной ковариационной функции позволила повысить точность до: $R^2 \approx 0.99$, CAO = 0.5%, PI = ± 4.5 кВт

Спасибо за внимание!

Н.В.Смольников
nvs38@tpu.ru
г.Томск