

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КАРТОГРАММЫ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ РЕАКТОРА С БОЛЬШОЙ ГЕТЕРОГЕННОСТЬЮ

Смольников Н.В., Аникин М.Н., Лебедев И.И., Наймушин А.Г.

Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30

e-mail: nvs38@tpu.ru

Введение

Для ядерных реакторов, имеющих небольшие размеры активной зоны характерны большие неравномерности распределения нейтронного излучения и, как следствие, наличие высоконапряженных участков, ограничивающих условия эксплуатации ТВЭЛов.

Наличие высоконапряженных участков в объеме активных зон исследовательских ядерных установок обусловлено, в первую очередь, использованием режима частичных перегрузок топлива, при котором происходит локальное увеличение неравномерности энерговыделения в ячейке со «свежим» топливом, а также наличием ловушки и отражателя нейтронов, повышающих долю нейтронов, возвращаемых в активную зону.

Одним из реакторов, обладающих большой гетерогенностью и неравномерностью энерговыделения является реактор ИРТ-Т (г. Томск). Исследовательский ядерный реактор ИРТ-Т – реактор бассейнового типа тепловой мощностью 6 МВт. Штатная загрузка активной зоны реактора (рис. 1) состоит из 12-ти восьмитрубных и 8-ми шеститрубных тепловыделяющих сборок (ТВС) типа ИРТ-3М, обогащенных до 90 % по изотопу U-235. В качестве отражателя нейтронов используется металлический бериллий, расположенный по периметру активной зоны реактора.

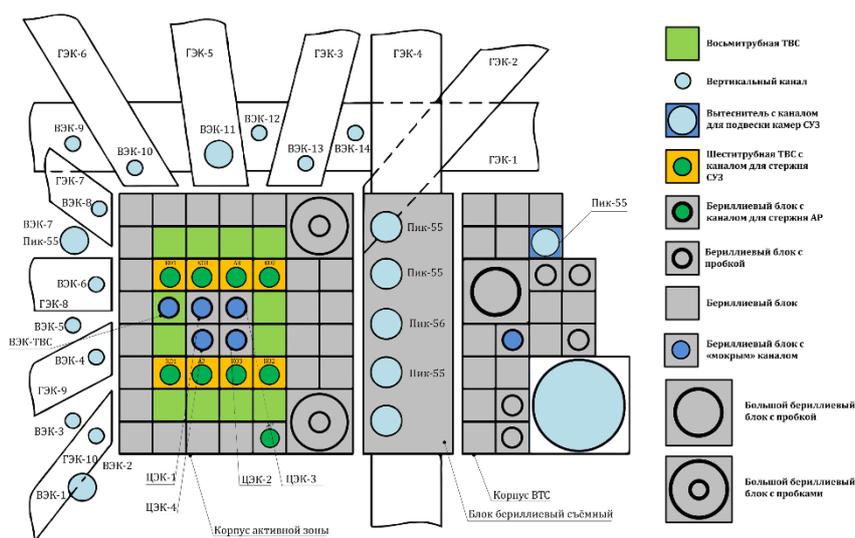


Рис. 1. Картограмма загрузки активной зоны реактора ИРТ-Т

Как правило, снижение неравномерности распределения энерговыделения в активной зоне достигается за счет профилирования. Однако, для активных зон исследовательских ядерных установок, имеющих небольшие габаритные размеры, профилирование с использованием ТВС с разным обогащением, поглощающих поглотителей не может быть реализовано. Одним из альтернативных методов профилирования активной зоны является профилирование по выгоранию, которое может быть достигнуто благодаря несимметричному расположению бериллиевого отражателя в активной зоне. В этом случае, «свежие» топливные сборки располагаются в левой части активной зоны, а более выгоревшие в правой части.

Как было отмечено ранее, использование режима частичных перегрузок топлива, вызывает локальное увеличение неравномерности энерговыделения и перераспределение энерговыделения по объему активной зоны, и, как следствие, будет приводить к необходимости перепрофилирования активной зоны от одной топливной кампании к другой.

Расчетное профилирование

В настоящее время для расчетного сопровождения эксплуатации реактора ИРТ-Т используется аттестованная модель прецизионного программного средства (ПС) MCU-PTR, предназначенного для моделирования процессов переноса нейтронов и фотонов аналоговыми и весовыми (не аналоговыми) методами Монте-Карло на основе оценённых ядерных данных. Для задач профилирования энерговыделения в активной зоне общий принцип работы ПС быть описан упрощенной блок-схемой:



Рис. 2. Упрощенная блок-схема работы ПС MCU-PTR

Исходная расчетная модель для каждого расчета учитывает нуклидный состав всех ТВС от момента установки в активную зону реактора до момента извлечения. При этом разный темп выгорания ТВС по ячейкам, а также их комбинации, обуславливают большое разнообразие различных распределений энерговыделения для каждой кампании. Следовательно, задача профилирования по выгоранию представляет собой итеративный процесс с перестановками ТВС в активной зоне, где номера целевых ячеек и количество перестановок зависят от комбинаций ТВС. Пример профилирования энерговыделения для одной из кампаний реактора представлен в таблице 1. На основе стационарного расчета исходной модели определялось распределение энерговыделения и наиболее напряженные ТВС, расположенные в ячейках 4-5, 4-6 активной зоны.

Таблица 1

Пример профилирования активной зоны

До профилирования										
№	Выгорание топлива, %					Коэф. неравномерности энерговыделения				№
	6	5	4	3		6	5	4	3	
7	35.55	8.41	41.69	61.43		0.85	1.08	0.89	0.69	7
6	58.11	16.86	43.84	51.11		0.68	1.24	1.03	0.92	6
5	20.52	Be	Be	26.37		1.17	Be	Be	1.37	5
4	55.71	Be	Be	26.37		0.82	Be	Be	1.36	4
3	55.52	39.45	16.48	48.34		0.74	1.05	1.28	0.95	3
2	0.00	40.76	7.83	60.5		1.13	0.89	1.16	0.71	2
После профилирования										
№	Выгорание топлива, %					Коэф. неравномерности энерговыделения				№
	6	5	4	3		6	5	4	3	
7	35.55	8.41	26.37	61.43		0.87	1.10	1.01	0.68	7
6	58.11	16.86	43.84	51.11		0.69	1.24	1.02	0.90	6
5	20.52	Be	Be	41.69		1.19	Be	Be	1.16	5
4	55.71	Be	Be	40.76		0.84	Be	Be	1.17	4
3	55.52	39.45	16.48	48.34		0.77	1.06	1.28	0.93	3
2	0.00	26.37	7.83	60.5		1.17	1.04	1.18	0.71	2

Выбор ячеек для перестановки делался исключительно на основе того, что ТВС с большим выгоранием позволит снизить изначальные значения коэффициентов неравномерности. После перестановки и проведения стационарных расчетов, производится оценка полученных результатов. В случае,

если из результатов следует, что неравномерность энерговыделения высока, подбор ячеек для перестановок и расчетные мероприятия, повторяются.

Прогнозирование распределения энерговыделения по активной зоне

Систематизация процесса профилирования активной зоны с целью минимизация вычислительных и трудовых ресурсов является ключевой задачей и может быть достигнута с использованием технологий искусственного интеллекта, способных анализировать, классифицировать исходные данные и прогнозировать результат.

В рамках работы рассматривается модель машинного обучения, способная предсказывать числовую характеристику объекта (регрессионная модель). В качестве входной характеристики объекта используется картограмма выгорания топлива в активной зоне, а выходным (прогнозируемым) параметром выступает картограмма распределения неравномерности энерговыделения в активной зоне. Учитывая, что количество прогнозируемых параметров соответствует количеству ячеек, содержащих топливо, задача сводится к рассмотрению многомерной модели [1]. Для решения задачи выбран традиционный способ обучения – обучение с учителем, объединяющий алгоритмы и методы построения моделей на основе множества примеров, содержащих пары «известный вход — известный выход». Выбранный массив данных для обучения состоит из картограмм различных топливных кампаний реактора за последние 10 лет эксплуатации.

Изучение данных – начальный и основообразующий этап построения любой модели машинного обучения, позволяющий оценить взаимосвязи между численными величинами. В таблице 2 представлена таблица с коэффициентами корреляции между выгоранием и неравномерностью энерговыделения для некоторых ячеек активной зоны.

Таблица 2

Корреляция между выгоранием топлива и неравномерностью распределения энерговыделения

№	7-6_s	7-5_s	6-6_s	6-5_s	7-6_b	7-5_b	6-6_b	6-5_b
7-6_s	1.00							
7-5_s	0.17	1.00						
6-6_s	0.20	0.00	1.00					
6-5_s	0.07	0.07	-0.16	1.00				
7-6_b	-0.76	0.03	-0.08	0.00	1.00			
7-5_b	0.00	-0.68	0.15	0.00	0.03	1.00		
6-6_b	-0.08	0.10	-0.85	0.17	0.10	-0.12	1.00	
6-5_b	0.02	0.00	0.23	-0.87	0.00	0.07	-0.13	1.00

* индекс _s – неравномерность распределения энерговыделения для ячейки

* индекс _b – выгорания топлива в ячейке

Согласно таблице 2, между выгоранием топлива и неравномерностью распределения энерговыделения для одинаковых ячеек наблюдается высокая негативная корреляция. Более того, наблюдается средняя корреляция между близко расположенными ячейками (например, ячейки 7-6 и 7-5). Наличие корреляции между близко расположенными ячейками свидетельствует о наличии мультиколлинеарности переменных [2], что может приводить к неопределенности параметров в процессе обучения.

С целью минимизации негативного эффекта мультиколлинеарности, в качестве модели для обучения была выбрана модель гребневой регрессии с L2 регуляризацией [3]. Предварительно, перед обучением массив данных проходил предварительную обработку, направленную на стандартизация исходных переменных, после чего, был разделен на тренировочный и тестовые массивы. Процесс обучения модели в рамках многомерного прогнозирования может быть описан следующей схемой:

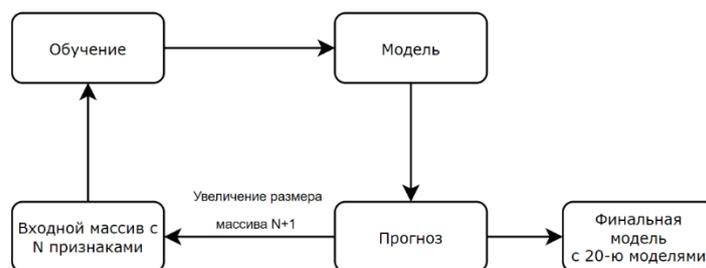


Рис. 4. Блок-схема прогнозирования коэффициентов неравномерности активной зоны

Блок-схема описывает алгоритм обучения цепочки регрессионных моделей, где каждая модель предсказывает один признак, который на этапе обучения следующей модели входит в массив данных, как переменная-предиктор. Таким образом, использование гребневой регрессии позволяет исключить негативную мультиколлинеарность данных на этапе обучения за счет регуляризации, а использование предсказанной переменной в качестве переменной-предиктора для следующего шага повышает точность работы модели. На рис. 5 представлено распределение средней абсолютной ошибки прогнозирования по ячейкам активной зоны.

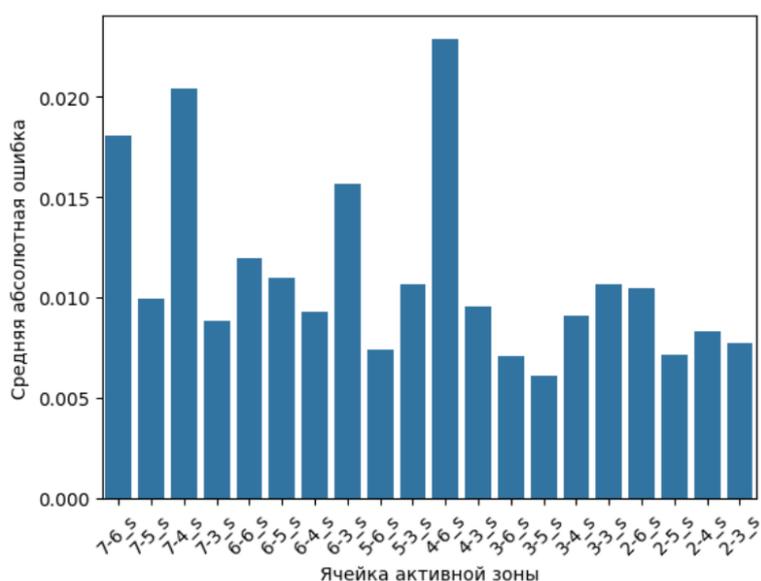


Рис. 5. Распределение средней абсолютной ошибки по ячейкам активной зоны

Наибольшее значение средней абсолютной ошибки составляет 0,023. При этом средняя абсолютная ошибка прогнозирования относительно всех ячеек не превышает 0,013.

Заключение

Предложенный подход позволяет прогнозировать неравномерности распределения энерговыделения в активной зоне основываясь только на данных о выгорании топливных сборках. Алгоритм работы гребневой регрессионной модели машинного обучения позволил выявить связи между данными и установить закономерности формирования распределения энерговыделения для комбинаций топливных сборок с разным выгоранием, что позволяет систематизировать процесс профилирования активной зоны без необходимости проведения ряда расчетных мероприятий.

Список использованных источников

1. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М. : Высш.шк.; 1999. – 479 с.
2. Паклин Н.Б., Орешков В.И. Бизнес-аналитика: от данных к знаниям. Учебное пособие. СПб. : Питер. – 2013. – 704 с.
3. Барсегян А.А., Куприянов М.С. и др. Технологии анализа данных: Data Mining, Visual Mining, Text Mining. – БХВ-Петербург, 2007. – 384 с.