**Моделирование выгорания ядерного топлива с применением машинного обучения на основе физики**

***Болотникова А.А., Шлапак Н.П.***

*студент  
Обнинский институт атомной энергетики, филиал “Национального исследовательского ядерного университета “МИФИ”, отделение ядерной физики и технологий, г. Обнинск, Россия  
E–mail: arina.bolotnickova@yandex.ru*

В ядерных энергетических реакторах на тепловых нейтронах в качестве топлива используется диоксид урана UO2, обогащенный по изотопу 235U. Тепловыделяющие элементы (твэлы) с таблетками из UO2 собираются в тепловыделяющие сборки (ТВС). В реакторах ВВЭР-1000 для продления кампании, увеличения глубины выгорания в часть твэлов в ТВС заменена на тепловыделяющие элементы с гадолинием (твэги), в которых в диоксид урана примешивают до 5% весовых частей оксида гадолиния Gd2O3 [1]. В процессе эксплуатации топлива делящийся 235U и выгорающий поглотитель 155Gd и 157Gd выгорают, вследствие чего меняется изотопный состав. Данный процесс оказывает влияние на эффективный коэффициент размножения нейтронов, изменение свойств топливных и конструкционных материалов [5].

Моделирование изменения во времени ядерных концентраций – задача комплексная, имеющая большую вычислительную сложность. В основном, для ее решения используют специализированные расчетные коды, реализующие метод Монте-Карло [3]. Однако исследование авторов [2] показало, что с достаточной для предварительных расчетов точностью прогнозирование изменений концентраций изотопов в ядерном топливе можно осуществить посредством нейронной сети, схема которой приведена на рис. 1.

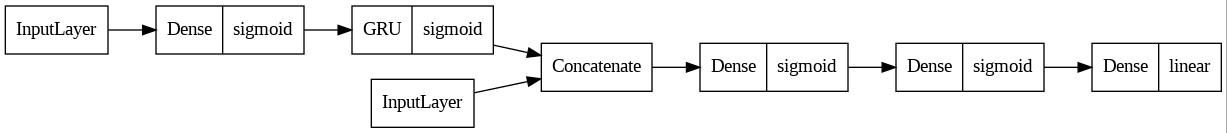


Рис. 1. Схема нейросетевой модели из исследования [2]

В том же исследовании отмечается, что данная модель некачественно прогнозирует концентрацию нуклидов при ее низких значениях, что потенциально может привести к неудовлетворительной оценке концентраций в топливе высокоактивных актинидов к моменту выгрузки ТВС из реактора.

Исследование [4] показало, что учет в построении и обучении нейросетевой модели горения водородно-воздушной смеси физических параметров и характеристик системы позволяет добиться большей компактности и точности модели. Также преимущества применения машинного обучения на основе физики на примере моделей для прогнозирования погоды рассматриваются в статье [6].

В данном исследовании авторы рассматривают возможность моделирования выгорания ядерного топлива с применением машинного обучения на основе физики. Данная задача сводится к прогнозированию приращения концентрации нуклида в топливном элементе через определенный интервал времени в зависимости от обогащения топлива, массового содержания Gd2O3 в твэгах, положения твэла в ТВС и типа топливного элемента (твэл или твэг).

Такая постановка задачи дает основание для применения блока рекуррентной нейронной сети, как в модели, представленной на рис. 1. В данном исследовании рассматривается возможность использования архитектуры без рекуррентных слоев. Предполагается, что архитектура, учитывающая физические особенности процессов изотопной кинетики, покажет более точные результаты.

**Литература**

1. Андрушечко С.А. и др. АЭС с реактором типа ВВЭР-1000. От физических основ эксплуатации до эволюции проекта. – М.: Логос, 2010. – 604 с. – ISBN 978-5-98704-496-4.

2. Болотникова А.А., Шлапак Н.П. Применение нейронных сетей в прогнозировании изменения изотопного состава ТВС реактора ВВЭР-1000 // XXV МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «НЕЙРОИНФОРМАТИКА-2023». Сборник научных трудов. 2023.

3. Давиденко В.Д., Цибульский В.Ф. Моделирование изотопной кинетики методом Монте-Карло // Атомная энергия. – 2010. – Т. 109, № 4.

4. Мальсагов М.Ю., Михальченко Е.В., Карандашев Я.М., Никитин В.Ф. Моделирование процесса горения водорода при различных давлениях с помощью нейронной сети // Физика горения и взрыва. – 2023. – Т. 59, № 2.

5. Тошинский Г.И. Беседы о ядерной энергетике. Физика реакторов и технологии модульных быстрых реакторов с теплоносителем свинец-висмут: для начинающих и не только. — М. : РГ-Пресс, 2023. – 480 с. – ISBN 978-5-9988-1526-3.

6. Kashinath K., et al. Physics-informed machine learning: Case studies for weather and climate modelling // Philosophical Transactions of The Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences. – 2021. – A. 379.