

РАЗРАБОТКА ВЕБ ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ВОССТАНОВЛЕНИЮ СПЕКТРОВ НЕЙТРОНОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ АЛГОРИТМА НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

А.А. Белый

*Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна,
Государственный университет «Дубна», г. Дубна
(ИСАУ, кафедра системного анализа и управления)*

Радиационный контроль на ускорителях частиц не может быть произведен с помощью стандартных дозиметров и радиометров нейтронов, так как их рабочий диапазон ограничен максимальной энергией нейтронов около 20 МэВ. На современных высокоэнергетических ускорителях в объединенном институте ядерных исследований (ОИЯИ) энергии нейтронов могут достигать нескольких сотен МэВ и более [1].

Известно, что нейтроны с энергиями более 0,1 МэВ дают основной вклад в эффективную дозу персонала, поэтому, в первую очередь, необходимо обеспечить дозиметрию нейтронного излучения. В связи с вышеупомянутыми ограничениями, для высокоэнергетических установок становится необходимым применение специализированных инструментов, таких как многошаровой спектрометр Боннера. Получение спектров и доз — это довольно сложный процесс вычислений, который требует специализированного математического аппарата и программного обеспечения [1].

Показания спектрометра Боннера связаны со спектром нейтронов через уравнение Фредгольма 1-го рода (1):

$$Q_j = \int_{E_{min}}^{E_{max}} K_j(E)\varphi(E)dE = \ln \ln (10) \int_0^{l_u} K_j(u) \square(u)E(u)du, \quad j = 1, \dots, M, \quad (1)$$

где Q_j — показание спектрометра Боннера для j -й сферы; $K_j(E)$ — ядро j -го уравнения, являющееся функцией чувствительности детектора (непрерывные неотрицательные функции на $[E_{min}, E_{max}]$); $\varphi(E)$ — энергетический спектр нейтронов, E — энергия нейтрона; пределы интегрирования E_{min} и E_{max} определяются областью определения спектра и используемого для измерений набора детекторов (для наших данных $E_{min} = 10^{-3}$ эВ и $E_{max} = 3,98 \cdot 10^8$ эВ), $l_u = \lg \lg (E_{max}) / \lg \lg (E_{min})$. Поскольку восстановление спектра нейтронов предполагается в довольно широком диапазоне энергий, превышающем несколько порядков, для уменьшения погрешности численного интегрирования удобно перейти к новой безразмерной переменной, называемой летаргией $u(E) = \lg(\frac{E}{E_{min}})$.

Однако с математической точки зрения задача восстановления спектра нейтронов по результатам нескольких измерений является некорректно поставленной, поскольку допускает множество решений из-за ограниченного количества шаров-замедлителей и погрешности в исходных данных. Такую задачу в основном решают численно переходом к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) с разбиением $\varphi(E)$ по дискретной сетке с шагом ΔE , применяя методы регуляризации, разложения спектра по базису пробных функций, нейронными сетями и другими методами [1].

В работе представлен метод восстановления спектров нейтронов с применением модели нейронной сети и разработка веб-приложения для хранения, обработки и предоставления результатов расчетов.

Методы и материалы

Генерация данных

Модель нейронной сети была обучена на сгенерированной аугментированной выборке, состоящей из 10^4 нормированных спектров и основанной на статистических моделях *Frascati Unfolding Interactive Tool (FRUIT)* — деления, испарения, распределения Гаусса и высокоэнергетических нейтронов. На их основе был написан программный модуль для генерации искусственных спектров, нормирования и вычисления значений, получаемых со спектрометра (см. рис. 1, 2) [2].

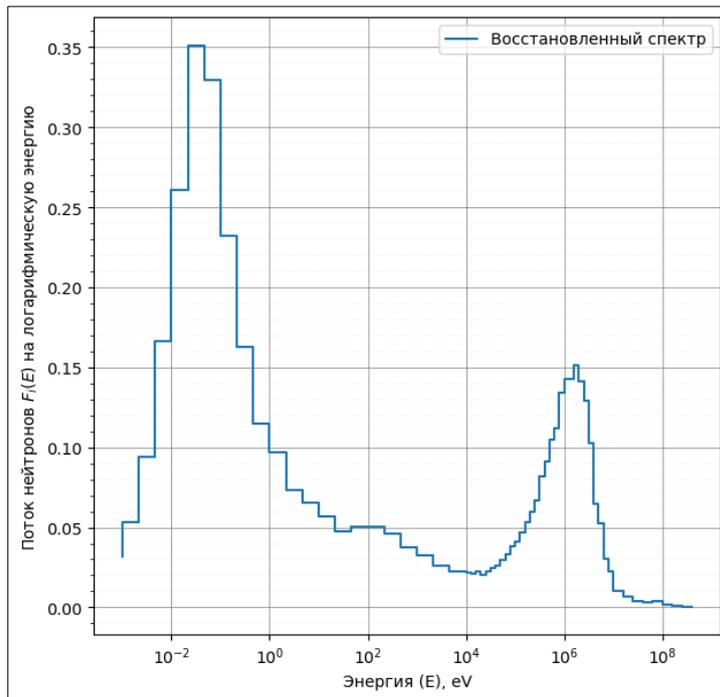


Рис. 1. Сгенерированный спектра № 32

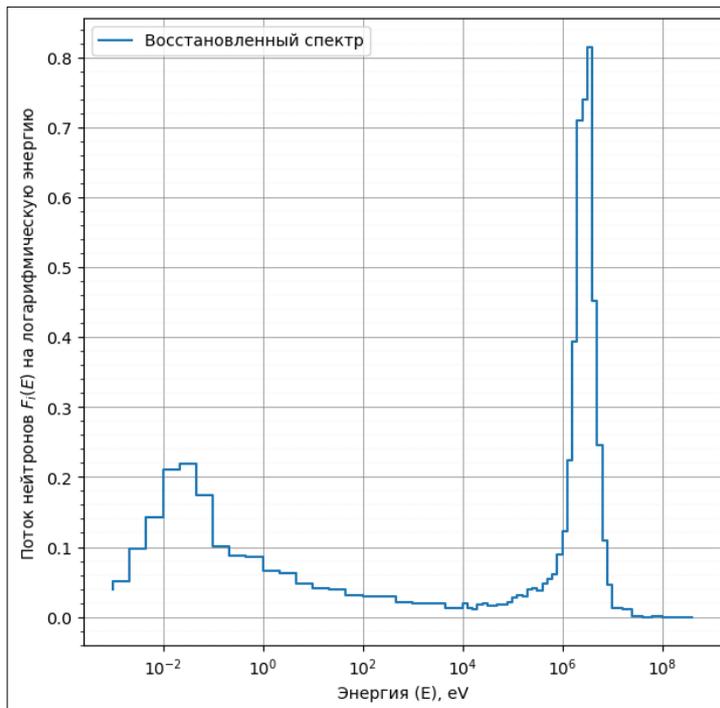


Рис. 2. Сгенерированный спектр № 40

Тестирование проводилось на базе данных из 375 спектров. 251 спектр был взят из сборника МАГАТЭ (см. рис. 3). Выборка была расширена путём ручного добавления реальных спектров из других работ [3].

Каждое значение спектра соответствует одному энергетическому уровню. Каждый уровень соответствует значению функции чувствительности, приведённых в сборнике МАГАТЭ [3]. Интервал их расположения от $E_{min} = 10^{-3}$ эВ до $E_{max} = 10^8$ эВ, разделённый на 60 значений.

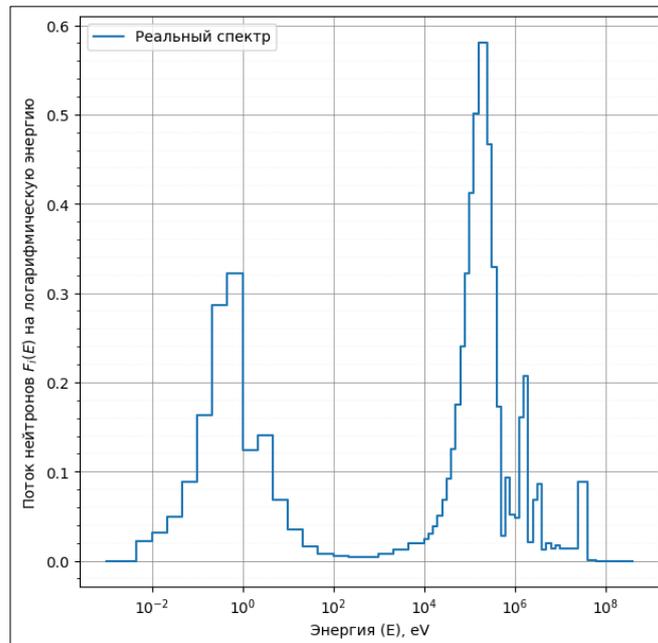


Рис. 3. Пример реального спектра из сборника МАГАТЭ

Модель машинного обучения

Разработанная модель машинного обучения представляет собой нейронную сеть с архитектурой, состоящей из 10 полносвязных и 2 *Dropout* слоями. Каждый полносвязный слой использует функцию активации *ReLU*, что делает сеть эффективной для решения задач регрессии (см. рис. 4).

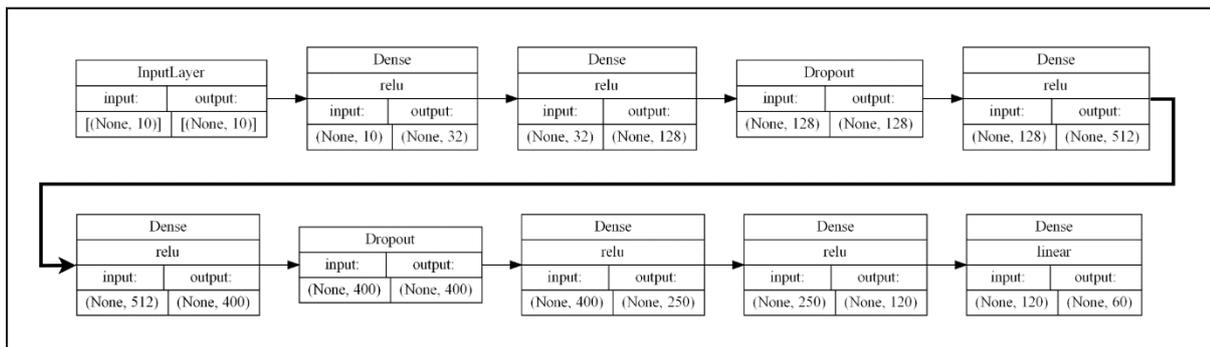


Рис. 4. Архитектура нейронной сети

На входе в модель подаётся 10 значений Q , полученных на многошаровом спектрометре Боннера. На выходе модель решает задачу регрессии и восстанавливает спектр нейтронов для 60 значений энергетических уровней.

Веб-приложение

Для работы с моделью машинного обучения было разработано веб-приложение на основе фреймворка *Streamlit*. Для хранения данных используется база данных *Postgres*. Приложение предусматривает сопровождение процесса дозиметрического контроля и позволяет хранить значения, полученные со спектрометра Боннера, а также спектры, восстановленные при помощи модели нейронной сети. Для расчёта доз загружаются данные расчётов со спектрометра и подаются в модель для восстановления спектра, на его основе рассчитывается эффективная доза [4].

Результаты

Для реализации алгоритма нейронной сети и веб-приложения был выбран язык программирования *Python*. Для разработки алгоритма модели нейронной сети применялись библиотеки: *Scikit-learn* для получения информации метрик, *Keras* и *Tensorflow* — для сборки, подготовки и настройки параметров модели. Для написания веб-приложения, разработки интерфейса и интеграции модели для проведения расчётов спектров использовалась библиотека *Streamlit* (см. рис. 5) [4 – 7]. Результат расчёта продемонстрирован на рисунке (см. рис. 6). Мощность дозы по реальному спектру составила

104,33 пЗв · см², по восстановленному — 102,09 пЗв · см². Разница между рассчитанными значениями — 2,19%.

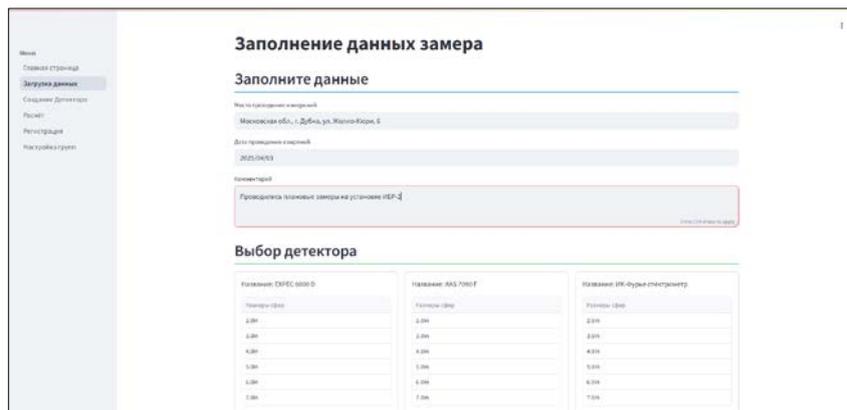


Рис. 5. Внешний вид веб-приложения

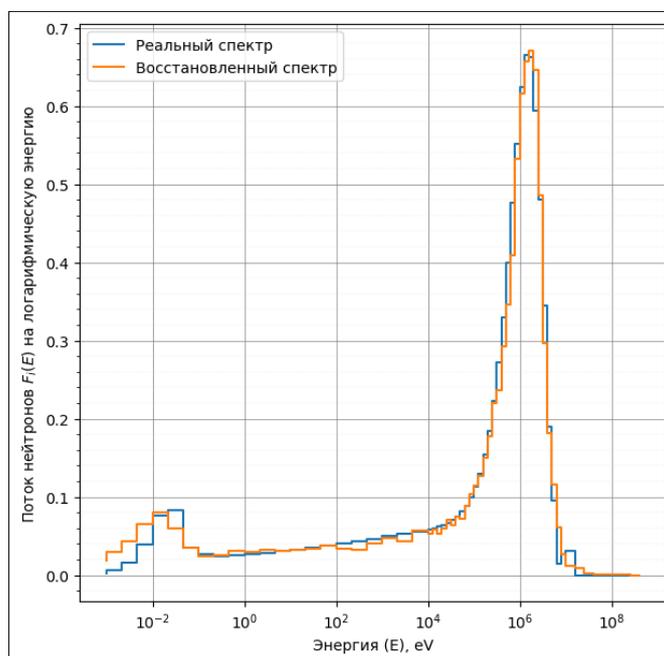


Рис. 6. Восстановленный и реальный спектр № 19

Дискуссия

Алгоритм нейронной сети на тестовой выборке показал такие значения метрик: $R2\ score = 0,71$, $MSE = 3 \cdot 10^{-2}$. Предполагается, что с более корректно сгенерированными аугментированными и расширенным объемом данных получится повысить точность результатов и позволит сделать шаг в сторону автоматизации обучения модели, так как сейчас модель обучается отдельно.

Веб-приложение позволило упростить работу с моделью, исходными данными и восстановленными спектрами. Планируется расширить функционал для обработки данных другими алгоритмами и статистическими методами, которые позволят проводить комплексный анализ.

Заключение

Был разработан алгоритм восстановления спектров нейтронов при помощи нейронной сети и веб-приложение для взаимодействия с моделью. На тестовых данных алгоритм позволил восстановить спектр с точностью $MSE = 3 \cdot 10^{-2}$. Веб-приложение дополнило функцию модели возможностями для обработки, хранения и предоставления информации в наглядном виде.

Литература

1. Chizhov, K., Beskrovnaya, L. & Chizhov, A. Neutron Spectra Unfolding from Bonner Spectrometer Readings by the Regularization Method Using the Legendre Polynomials. Phys. Part. Nuclei 55, 532–534 (2024).
2. McGreivy J., Data Augmentation for Neutron Spectrum Unfolding with Neural Networks / McGreivy J., Manfredi J. J., Siefman D. // Journal of Nuclear Engineering. – 2023. – Т. 4. – №. 1. – С. 77-95.

3. International Atomic Energy Agency. Compendium of neutron spectra and detector response for radiation protection purposes: Technical report series. Vienna: IAEA, 403, 2001.
4. Khorasani M., Abdou M., Fernández J. H. Web application development with streamlit //Software Development. – 2022. – С. 498-507.
5. Франсуа Ш. Глубокое обучение на Python. 2-е межд. издание. – Питер, 2023.
6. Huang, S. C. Principles and Labs for Deep Learning / S. C. Huang, T. H. Le // Principles and Labs for Deep Learning, 2021. – P. 1-337. – DOI 10.1016/B978-0-323-90198-7.09993-6. – EDN SBQRCV.
7. Kramer O., Kramer O. Scikit-learn //Machine learning for evolution strategies. – 2016. – С. 45-53.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 124112200072-2).