

ПРИМЕНЕНИЕ СЕТЕЙ КОЛМОГорова-АРНОЛЬДА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СПЕКТРОВ НЕЙТРОНОВ

М. Д. Стариковская^{1,*}, К. А. Чижов²

¹ Государственный университет «Дубна», г. Дубна, Россия

² Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, Россия
e-mail: smd.22@uni-dubna.ru

Базовым инструментом для измерения энергии нейтронов в целях обеспечения радиационного контроля является многошаровой спектрометр Боннера. Его принцип работы заключается в замедлении нейтронов в полиэтиленовых шарах, после чего уже замедленные нейтроны регистрируются детектором. Результаты измерений спектрометром Боннера связаны со спектром нейтронов через систему интегральных уравнений Фредгольма 1-го рода (1), однако, задача восстановления спектров по показаниям спектрометра Боннера является некорректно поставленной по Адамару. ^[1,2]

$$Q_j = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} K_j(E) \cdot \varphi(E) dE, \quad j = 1, \dots, M \quad (1)$$

где Q_j – показание спектрометра Боннера для j -й сферы; $K_j(E)$ – ядро j -го уравнения, являющееся функцией чувствительности (отклика) детектора на нейтроны различных энергий;

$\varphi(E)$ – полный энергетический спектр нейтронов; M – количество используемых для измерения спектра сфер. Пределы интегрирования $E_{\min}$ и $E_{\max}$ определяются областью определения спектра (E) и используемого для измерений набора детекторов.

В данной работе приведено решение с сетей Колмогорова-Арнольда^[3].

В качестве входных данных модели выступают результаты измерений спектрометра Боннера. Выходные данные модели – искомый спектр, разложенный по шестидесяти энергетическим диапазонам в логарифмическом в диапазоне от $E_{\min}=10^{-9}$ до $E_{\max} = 6.6 \cdot 10^3$ МэВ. В работе были использованы два варианта архитектуры сети. Первая применялась на малых и средних объёмах обучающей выборки, в ней 4 скрытых слоя по 24-28 нейронов на каждом. Вторая применялась на крупной выборке, в ней 1 скрытый слой из 34 нейронов.

Для получения более физически достоверных данных в функцию потерь модели был введён штраф на отрицательные значения.

В работе используется несколько методов сбора обучающей выборки. Первый из них – на основе параметрического метода Frascati Unfolding Interactive Tool (FRUIT)^[4]. С его помощью сгенерирована обучающая выборка из $5 \cdot 10^5$ спектров, полученных как взвешенная сумма четырёх компонентных спектров, описываемых моделями деления, испарения, распределения Гаусса и высокоэнергетических нейтронов ^[4]. Каждый из этих компонентных спектров содержит настраиваемые параметры, которые разыгрывались случайным образом при генерации спектров. Также в общую выборку были добавлены реальные спектры ^[5], после чего выборка разделена на обучающую и тестовую.

Второй подход к формированию обучающей выборки – вносить случайные шумы в реальные спектры. В данной выборке к реальным спектрам добавлены случайные колебания значений в пределах 10%. Обучающая выборка состояла из 3000 созданных таким образом спектров, а тестовой выборкой стали 375 реальных спектров.

Последний использованный в работе подход – сложение реальных спектров для создания синтетических. В данном методе из выборки выбирались от 2 до 6 случайных спектров, значения плотности потоков складывались и делились на количество спектров, таким образом получался “средний спектр”. Для обучающей выборки было создано 3700 спектров, а тестовая составила 375 реальных спектров.

При проверке на тестовой выборке лучший результат $R^2=0.91$ был достигнут на выборке, сгенерированной методом FRUIT. Однако, результат на реальных спектрах из тестовой выборки был значительно хуже, поэтому обучены и другие модели. Модели, обученные на выборке, созданной путем внесения отклонений, и на выборке, созданной путём сложения реальных спектров, близки по метрикам $R^2=0.62$, но модель, обученная на спектрах, полученных путём сложения, меньше склонна к переобучению. Пример восстановления спектра из тестовой выборки представлен на рисунке 1.

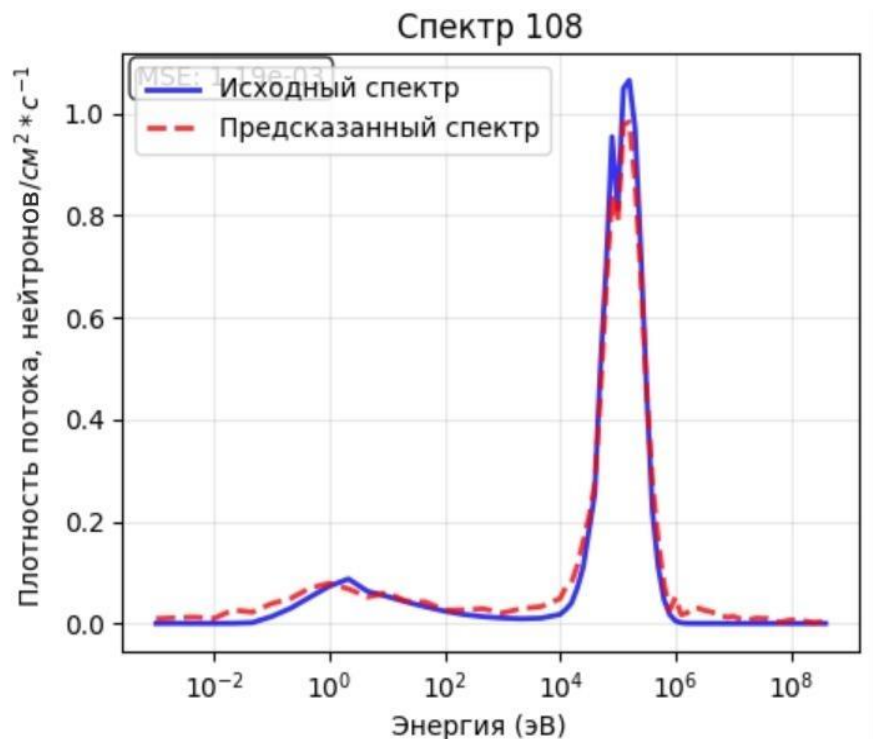


Рис. 1. Пример восстановленного спектра моделью, обученной на сложных спектрах: синяя линия – исходный спектр, красный пунктир – восстановленный

Модель, основанная на KAN, достаточно точно восстановила узкий пик около 10^5 эВ и широкий пик около 1 эВ. Однако, в отличие от исходного спектра, модель показывает наличие нейтронов в области выше 1 МэВ, что может привести к переоценки дозы. В этом случае целесообразно использовать результаты модели как начальное приближение для итерационных методов, т.к. начальный спектр даст возможность итерационному методу лучше приблизиться к искомой форме спектра, а итерации сгладят нефизические флуктуации, полученные на 1-м шаге.

Литература

1. Chizhov K., Beskrovnaya L., Chizhov A. Neutron Spectra Unfolding from Bonner Spectrometer Readings by the Regularization Method Using the Legendre Polynomials // *Physics of Particles and Nuclei*. 2024. Т. 55. № 3. С. 532–534.
2. Chizhov K., Beskrovnaya L., Chizhov A. Neutron spectrum unfolding method based on shifted legendre polynomials, its application to the IREN facility // *Physics of Particles and Nuclei Letters*. 2025. Т. 22. № 2. С. 190.
3. Liu Z. и др. KAN: Kolmogorov-Arnold Networks // 2025.
4. Bedogni R. et al. FRUIT: an operational tool for multisphere neutron spectrometry in workplaces // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. – 2007. – Т. 580. – №. 3. – С. 1301-1309.
5. International Atomic Energy Agency (IAEA), Compendium of Neutron Spectra and Detector Responses for Radiation Protection Purposes: IAEA Technical report series No. 403. 2001. P. 337.
6. Starikovskaya M, Chizhov K. Neutron spectrum unfolding based on random forest algorithm and generated training sample. In *Российский университет дружбы народов им. П. Лумумбы*; 2025 [cited 2025 Dec 25]. p. 389–94. Available from: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=83014906>