

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 539.1.074.82

ИССЛЕДОВАНИЕ АМПЛИТУДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ДЕТЕКТОРА
БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ СО СЛОЯМИ ^{10}B
И С МНОГОПРОВОЛОЧНОЙ КАМЕРОЙ

© 2026 г. К. Ю. Бурмистров, Ю. М. Бурмистров, А. И. Драчев,
С. Х. Караевский, А. А. Каспаров*, С. И. Поташев, В. Н. Пономарев,
В. М. Скоркин

Институт ядерных исследований Российской академии наук

Россия, 117312, Москва, просп. 60-летия Октября, 7а

**kasparov200191@gmail.com*

Поступила в редакцию 29.07.2026

После доработки 31.08.2026

Принята к публикации 23.09.2026

Исследуются амплитудные характеристики позиционно-чувствительного нейтронного детектора с чувствительной областью размером 50×50 мм², состоящего из двух слоев твердого ^{10}B и многопроволочной газонаполненной камеры. Детектор входит в состав установки для исследования легких ядер на нейтронном канале быстрых нейтронов РАДЭКС на базе линейного ускорителя протонов ИЯИ РАН. Детектор применяется для регистрации ядра ^3H из реакции взаимодействия нейтронов с энергией свыше 3 МэВ с ядром ^{10}B для исследования возбужденных состояний ядра $^8\text{Be}^*$ и для регистрации ядра ^4He для изучения соотношения вкладов остаточных ядер. Измерен диапазон рабочих напряжений данного детектора.

Ключевые слова: нейтрон, быстрый, бор-10, тритон, альфа-частица, детектор, позиционно-чувствительный

1. ВВЕДЕНИЕ

Изучение реакций на легких ядрах, инициированных нейтронами высокой энергии, является актуальной задачей для понимания процессов, происходящих в ядерной астрофизике и при термоядерном синтезе.

Для детектирования нейтронов обычно используются детекторы с конвертерами нейтронов в ядра на основе изотопов ^3He [1], ^6Li [2, 3] или ^{10}B [4, 5]. Для определения энергии нейтрона применялся метод времени пролета [6], однако все эти детекторы предназначены только для регистрации медленных, в частности тепловых нейтронов, в установках дифракции нейтронов для исследований в физике конденсированного состояния.

В Лаборатории атомного ядра Института ядерных исследований Российской академии наук был разработан и испытан позиционно-чувствительный детектор нейтронов с твердым слоем ^{10}B , обладающий двумя последовательными чувствительными зазорами с рабочей областью размером $100 \times 100 \text{ мм}^2$ [7]. В экспериментах на фотонейтронном источнике на базе линейного ускорителя электронов ИЯИ РАН было показано, что он обладает чувствительностью к направлению потока нейтронов [8], а амплитуда сигналов имеет однозначную зависимость от энергии налетающего нейтрона в области энергий выше 1 МэВ [9]. В результате появилась возможность для изучения ядерных реакций взаимодействия быстрых нейтронов с энергией выше 1 МэВ с ядром ^{10}B с идентификацией вылетающего из реакции легкого заряженного ядерного фрагмента с использованием корреляции амплитуд сигналов в двух последовательных чувствительных газовых зазорах [10].

Используя данный детектор с рабочей областью $100 \times 100 \text{ мм}^2$ в качестве прототипа, мы разработали новый детектор с чувствительной областью $50 \times 50 \text{ мм}^2$, состоящий из двух слоев твердого ^{10}B и четырехзазорной многопроволочной газонаполненной камеры [11]. Расчетная эффективность регистрации составляет примерно от 0.0001% для быстрых нейтронов (с энергией свыше 1 МэВ) до 5% для тепловых нейтронов. Для работы в условиях сильных электромагнитных помех была разработана многоканальная электроника детектора с дифференциальными выходными сигналами. Новый детектор с рабочей областью размером $50 \times 50 \text{ мм}^2$ позволяет определить энергию налетающего нейтрона E_n для двухчастичной реакции при энергии, превышающей энергию порога данной реакции $E_{\text{порог}}$ на величину от 3 до 7 МэВ по величинам ионизационных потерь в чувствительных зазорах детектора [12, 13].

Для изучения взаимодействия нейтронов и легких ядер в ядерной физике при энергиях от 1 до 30 МэВ была построена установка [14], ключевым элементом которой является новый детектор с рабочей областью размером $50 \times 50 \text{ мм}^2$. В первую очередь установка предназначена для исследования возбужденных состояний ядра $^8\text{Be}^*$, образующегося в реакции $n + ^{10}\text{B} \rightarrow ^3\text{H} + ^8\text{Be}^*$, с регистрацией ядра ^3H , а для изучения соотношения вкладов остаточных ядер – с регистрацией ядра ^4He . Реакция $n + ^{10}\text{B} \rightarrow ^3\text{H} + ^8\text{Be}^*$ представляет особый интерес для исследования дипольных переходов высоковозбужденных состояний ядра $^8\text{Be}^*$ [15], а также для изучения кластерной структуры ядра ^{11}B [16, 17]. Целью данной работы являлись исследование амплитудных характеристик нового позиционно-чувствительного детектора нейтронов и измерение диапазона рабочего напряжения. Планируется также использование этого детектора в нейтронной радиографии в диапазоне энергий E_n от 1 эВ до 200 эВ для обнаружения ценных элементов в геологических

породах, метеоритах, внеземных породах или археологических артефактах [18] с использованием времени пролета.

2. ДЕТЕКТОР И ЭЛЕКТРОНИКА

Представленный позиционно-чувствительный детектор нейтронов с рабочей областью размером $50 \times 50 \text{ мм}^2$ состоит из двух слоев твердотельного $^{10}\text{В}$ и пропорциональной камеры, состоящей из четырех чувствительных проволочных электродов и проволочного анода. Каждые три проволочки каждого электрода объединены, сигналы от них поступают на индивидуальный канал электроники считывания, которая имеет 32 независимых канала регистрации. Сигналы от детектора усиливаются и преобразуются в пары дифференциальных сигналов с помощью 8-канальных быстрых усилителей с коэффициентом усиления примерно 30 и собственным фронтом длиной около 30 нс, разработанных в ИЯИ РАН. Сигналы от четырех модулей по бронированным кабелям “витая пара” длиной 12 м поступают на 32-канальный процессор формы сигналов частотой 80 МГц DT5550 фирмы CAEN. Применение такого метода преобразования и передачи дифференциальных сигналов эффективно подавляет влияние электромагнитных помех от ускорителя. Структура нового детектора и его электронная схема представлены на рис. 1.

Рис. 1. а – Структура детектора... б – система считывания:

Из данных можно определить амплитуду и время прихода сигнала относительно стартового сигнала ускорителя. Используя время прихода сигнала, можно определить энергию нейтрона при $E_n < 200 \text{ эВ}$, а из полученных амплитуд определяются координаты точки взаимодействия с точностью до 2 мм. Из амплитуд сигналов определяются величины ионизационных потерь. Сумма ионизационных потерь во всех зазорах определяет энергию вылетающего из реакции ядра, если оно останавливается в детекторе.

Расчетная эффективность регистрации составляет примерно 0.0001% для быстрых нейтронов с энергией свыше 1 МэВ, около 1% для диапазона энергий от 1 до 200 эВ и до 5% для тепловых нейтронов.

3. ИЗМЕРЕНИЕ АМПЛИТУД СИГНАЛОВ

Распределение ионизационных потерь в последовательных чувствительных газовых зазорах позволяет идентифицировать вторичное ядро. Локализация событий в определенной выделенной области на плоскости, построенной из пар амплитуд сигналов от двух чувствительных зазоров, свидетельствует о том, что данная реакция является двухчастичной. Поэтому важно получить как можно более высокую эффективность регистрации и точное измерение амплитуд сигналов.

Для анализа амплитуд используются экспериментальные данные, полученные с помощью детектора на нейтронном канале РАДЭКС на базе линейного ускорителя протонов ИЯИ РАН при энергии 267 МэВ на расстоянии 50 м от вольфрамовой нейтронобразующей мишени.

На рис. 2 представлены спектры суммы амплитуд сигналов от первого, второго, третьего и четвертого зазоров детектора, а также корреляция этих сумм при напряжении на аноде детектора 1550 В. Проявляется локальный островок событий, который идентифицируется как корреляция ионизационных потерь ядра ${}^3\text{H}$ из реакции $n + {}^{10}\text{B} \rightarrow {}^3\text{H} + {}^8\text{Be}^*$, но в этот пик фоновая подложка вносит существенный вклад.

Рис. 2. Спектры суммы амплитуд сигналов: **а** – от первого и второго зазоров детектора; **б** – от третьего и четвертого зазоров детектора; **в** – корреляция этих сумм сигналов при напряжении на аноде детектора 1550 В.

На рис. 3 представлены спектры суммы амплитуд сигналов от первого, второго, третьего и четвертого зазоров детектора, а также корреляция этих сумм при напряжении на аноде детектора 1700 В.

Рис. 3. Спектры суммы амплитуд сигналов: **а** – от первого и второго зазоров детектора; **б** – от третьего и четвертого зазоров детектора; **в** – корреляция этих сумм сигналов при напряжении на аноде детектора 1700 В.

Амплитудное разрешение максимума на рис. 2а, 3а составляет около 15%. На рис. 3в вклад фоновой подложки в островок событий исследуемой реакции уменьшается. Максимумы в спектрах суммы амплитуд сигналов от первого и второго зазоров детектора, а также суммы амплитуд сигналов от третьего и четвертого зазоров детектора, указанные стрелками на рис. 2в, 3в, идентифицируются [14] как проявление ионизационных потерь ядра ${}^3\text{H}$ из реакции $n + {}^{10}\text{B} \rightarrow {}^3\text{H} + {}^8\text{Be}^*$, в которой возбужденное ядро ${}^8\text{Be}^*$ находится в состояниях с энергиями 17.64 МэВ ($J^\pi = 1^+$; $T = 1$) и 18.15 МэВ ($J^\pi = 1^+$; $T = 0$).

На рис. 4 представлен график эффективности представленного детектора с рабочей областью размером $50 \times 50 \text{ мм}^2$ в зависимости от напряжения на аноде в относительных единицах, которая при напряжении около 1500 В выходит на плато при регистрации ядра ${}^3\text{H}$. Амплитудные спектры с ростом напряжения на аноде детектора расширяются в сторону больших значений.

Рис. 4. Зависимость эффективности представленного детектора от напряжения на аноде

4. ВЫВОДЫ

Получены амплитудные характеристики позиционно-чувствительного нейтронного детектора с чувствительной областью размером $50 \times 50 \text{ мм}^2$, состоящего из двух слоев

твёрдого ^{10}B и многопроволочной газонаполненной камеры. Используя данные эксперимента по исследованию взаимодействия быстрых нейтронов с ядром ^{10}B , мы показали возможность выделения событий, которые соответствуют реакции с испусканием ядер ^3H и $^8\text{Be}^*$. Эффективность детектора при регистрации ядра ^3H из этой реакции выходит на плато при напряжении анода около 1500 В.

В эксперименте на нейтронном канале РАДЭКС на базе линейного ускорителя протонов ИЯИ РАН энергия нейтронов для исследуемых двухчастичных реакций составляла от 1 до 30 МэВ. При этом энергия регистрируемых ядер ^3H из двухчастичных реакций с испусканием возбужденного ядра $^8\text{Be}^*$ составляла от 0.5 до 12 МэВ.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена с использованием оборудования центра коллективного пользования “Ускорительный центр нейтронных исследований структуры вещества и ядерной медицины ИЯИ РАН”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Marmotti M., Haese-Seiller M., Kampmann R.* Phys. B: Condens. Matter. 2020. V. 276-278. P. 210. [https://doi.org/10.1016/S0921-4526\(99\)01292-2](https://doi.org/10.1016/S0921-4526(99)01292-2)
2. *Favalli A., Wiggins B.W., Iliev M., et al.* Commun. Phys. 2025. V. 8. P. 1. <https://doi.org/10.1038/s42005-024-01903-3>
3. *Трунов Д.Н., Марин В.Н., Глушкова Т., Садыков Р.А., Алтынбаев Е.В.* Междунар. науч.-исслед. журн. 2023. № 12(138). С. 1. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.138.23>
4. *Messi F., Mauri G., Piscitelli F.* Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2019. V. 936. P. 499. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.10.058>
5. *Петрова М.О., Богдзель А.А., Боднарчук В.И., и др.* ПТЭ. 2024. № 6. С. 22. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=80521900>
6. *Аксенов В.Л., Балагуров А.М.* УФН. 1996. Т. 166. № 9. С. 955. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0166.199609e.0955>
7. *Potashev S.I., Afonin A.A., Burmistrov Yu.M., et al.* J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron Neutron Tech. 2024. V. 18. № 4. P. 908. <https://doi.org/10.1134/S1027451024700630>
8. *Поташев С.И., Каспаров А.А., Мешков И.В. и др.* Известия РАН. Серия физическая. 2022. Т. 86. № 8. С. 1087 <https://elibrary.ru/item.asp?id=48868058>
[*Potashev S.I., Kasparov A.A., Meshkov I.V., et al.* Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 2022. V. 86. № 8. P. 898. <https://doi.org/10.3103/S1062873822080147>]

9. *Поташев С.И., Афонин А.А., Бурмистров Ю.М. и др.* Известия РАН. Серия физическая. 2022. Т. 85. № 10. С. 1385. <https://www.elibrary.ru/contents.asp?id=46532680>
[Potashev S.I., Afonin A.A., Burmistrov Yu.M., et al. Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 2021. V. 85. №10. P. 1068. <https://doi.org/10.3103/S1062873821100221>]
10. *Поташев С.И., Меишков И.В., Бурмистров Ю.М. и др.* Ядерная физика. 2025. Т. 88. № 2. С. 237. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=82315882>
[Potashev S.I., Meshkov I.V., Burmistrov Yu.M., et al. Phys. Atom. Nucl. 2025. V. 88. № 2. P. 383. <https://doi.org/10.1134/S1063778825700401>]
11. *Поташев С.И., Драчев А.И., Каспаров А.А., Бурмистров Ю.М.* РФ Патент 2788834, 2022.
12. *Поташев С.И., Каспаров А.А., Пономарев В.Н.* Известия РАН. Серия физическая. 2022. Т. 86. № 9. С. 1304 <https://doi.org/10.31857/S0367676522090241>
[Potashev S.I., Kasparov A.A., Ponomarev V.N. Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 2022. V. 86. № 9. P. 1079. <https://doi.org/10.3103/S1062873822090246>]
13. *Поташев С.И.* Ядерная физика. 2023. Т. 86. № 5. С. 634. <https://doi.org/10.31857/S0044002723050355>
[Potashev S.I. Phys. Atom. Nucl. 2023. V. 86. № 5. P. 850. <https://doi.org/10.1134/s1063778823050344>]
14. *Караевский С.Х., Поташев С.И., Бурмистров К.Ю. и др.* ЭЧАЯ. 2026. Т. 57. № 3. С. 332. <https://pepan.jinr.ru/index.php/Pepan/article/view/2380/1224>
[Karaevsky S.Kh., Potashev S.I., Burmistrov K.Yu., et al. Phys. Part. Nucl. 2026. V. 57. № 3. P. 384. <https://doi.org/10.1134/S1063779625701436>]
15. *Gulyas J., Ketel T.J., Krasznahorkay A.J. et al.* Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2016. V. 808. P. 21. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.11.009>
16. *Lombardo I., Dell'Aquila D.* Riv. Nuovo Cim. 2023. V. 46. P. 521. <https://doi.org/10.1007/s40766-023-00047-4>
17. *Zarubin P.I.* “Tomography” of the Cluster Structure of Light Nuclei via Relativistic Dissociation. Clusters in Nuclei. V. 3. ed. by C. Beck. Lecture Notes in Physics. V. 875. Cham: Springer, 2014. P. 51. https://doi.org/10.1007/978-3-319-01077-9_3
18. *Поташев С.И., Марин В.Н., Литвин В.С.* РФ Патент 2858023, 2026.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. **а** – Структура детектора: 1 – основание корпуса, 2 – крышка корпуса, 3 и 4 – рама, 5 – анод, 6 и 9 – катоды X_2 и Y_1 , 7 и 8 – сетка Y_2 и X_1 , 10 – прокладочные шайбы. **б** – Система считывания: 1 – позиционно-чувствительный детектор нейтронов, 2 – фильтр медленных нейтронов из кадмия толщиной 1 мм, 3–6 – четыре 8-канальных усилителя, 7 – 32-канальный процессор формы сигналов, 8 – компьютер

Рис. 2. Спектры суммы амплитуд сигналов: **а** – от первого и второго зазоров детектора, **б** – от третьего и четвертого зазоров детектора, **в** – корреляция сумм этих сигналов при напряжении на аноде детектора 1550 В. Стрелкой указана локализация событий, которые идентифицируются как проявление ионизационных потерь ядра ^3H из реакции $n+^{10}\text{B} \rightarrow ^3\text{H}+^8\text{Be}^*$, в которой возбужденное ядро $^8\text{Be}^*$ находится в состояниях с энергиями 17.64 МэВ ($J^\pi = 1+; T = 1$) и 18.15 МэВ ($J^\pi = 1+; T = 0$)

Рис. 3. Спектры суммы амплитуд сигналов: **а** – от первого и второго зазоров детектора, **б** – от третьего и четвертого зазоров детектора, **в** – корреляция этих сумм сигналов при напряжении на аноде детектора 1700 В. Стрелкой указана локализация событий, которые идентифицируются как проявление ионизационных потерь ядра ^3H из реакции $n+^{10}\text{B} \rightarrow ^3\text{H}+^8\text{Be}^*$, в которой возбужденное ядро $^8\text{Be}^*$ находится в состояниях с энергиями 17.64 МэВ ($J^\pi = 1+; T = 1$) и 18.15 МэВ ($J^\pi = 1+; T = 0$)

Рис. 4. Зависимость эффективности представленного детектора от напряжения на аноде

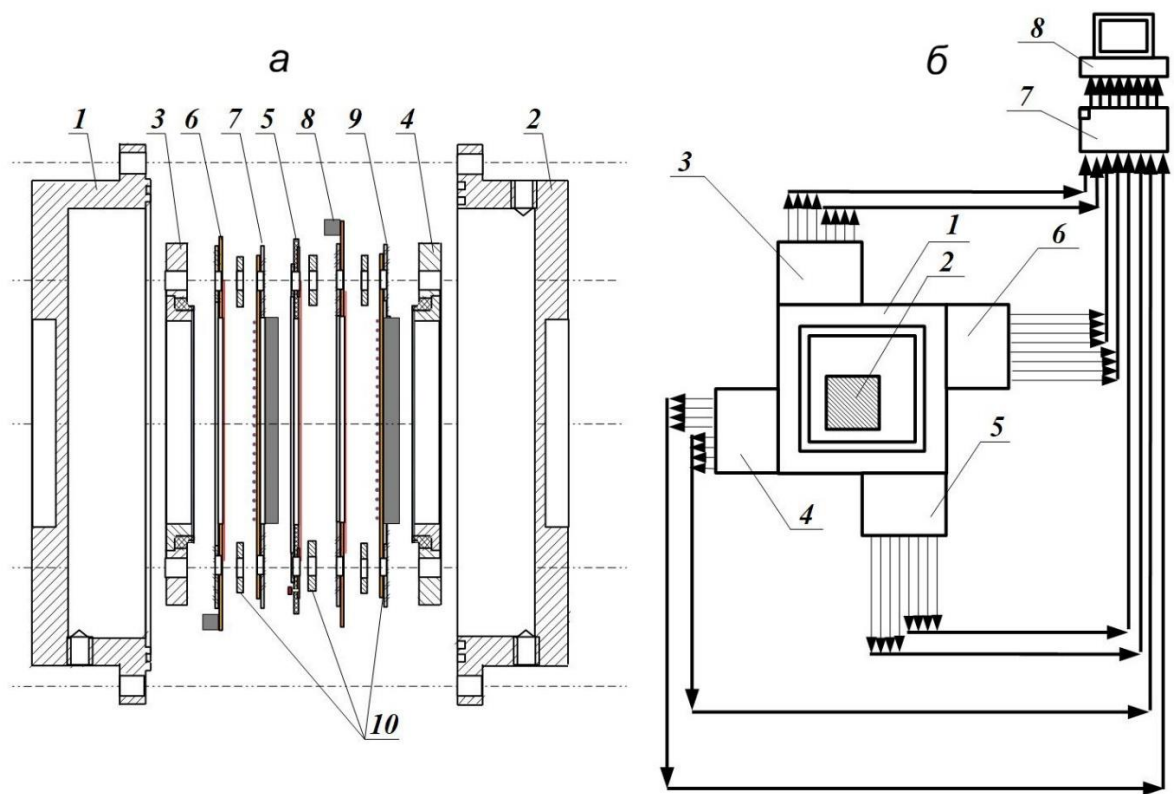


Рис. 1

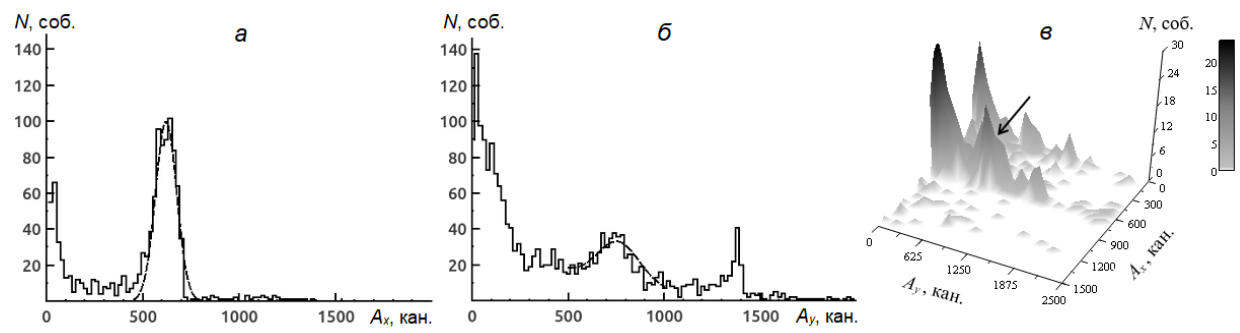


Рис. 2

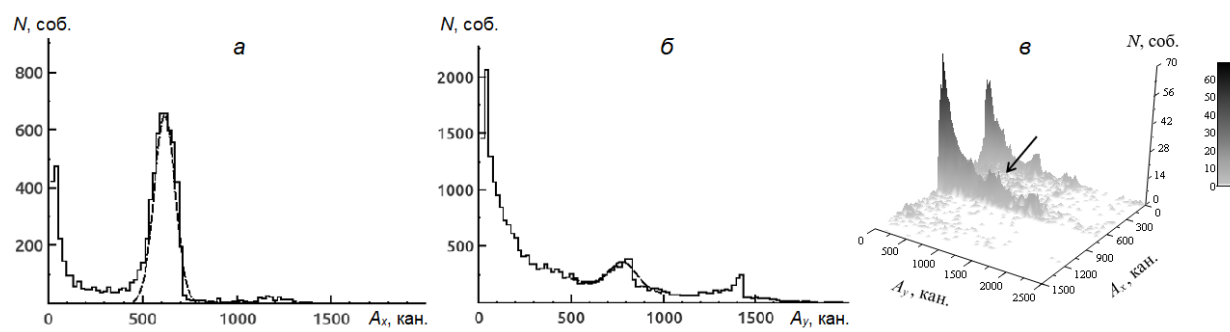


Рис. 3

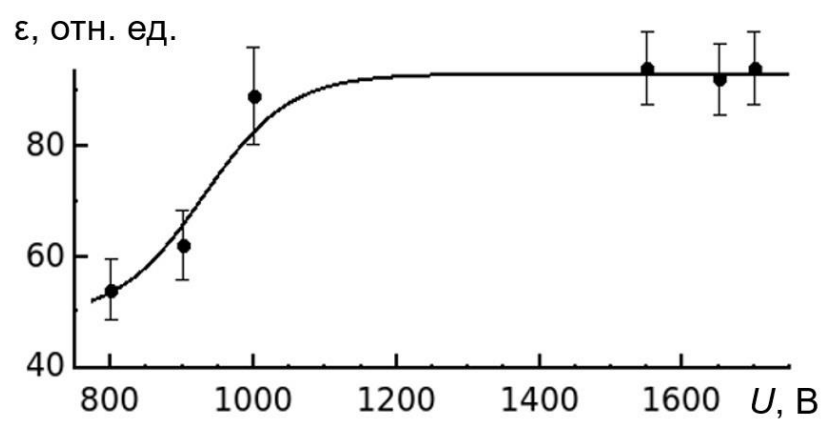


Рис. 4