

Электророжение нейтрального пиона на протоне в реакции

$$e + p \rightarrow e' + p' + \pi^0 \rightarrow e' + p' + \gamma + \gamma$$

А. Н. Павлова^{1,*}, В. Б. Рыжков¹, А. А. Русова^{1,2}, Е. Л. Исупов²

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра общей ядерной физики
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

²Научно-исследовательский институт им. Д. В. Скобелева
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Поступила в редакцию 25.03.2026; подписана в печать 28.03.2026)

В настоящей работе представлены результаты анализа событий реакции $e + p \rightarrow e' + p' + \pi^0 \rightarrow e' + p' + \gamma + \gamma$ из экспериментальных данных детектора CLAS12 в резонансной области при энергии пучка электронов $E_e = 6.535$ ГэВ. Рассмотрена топология с регистрацией двух гамма-квантов от распада нейтрального пиона в конечном состоянии; разработаны специальные отборы, уменьшающие количество фоновых событий; сделано сравнение двух Монте-Карло генераторов событий реакции: genKYandOnePion и MCEGENpiN gdcorg V9b; проведена аппроксимация распределений инвариантной массы пары фотонов в кинематических ячейках по суммарной энергии конечных адронов в системе центра масс виртуальный фотон — протон W и виртуальности фотона Q^2 , на основе которой вычислены выходы реакции как функции двух переменных; сделана оценка областей кинематических переменных, доступных для извлечения дифференциальных сечений.

PACS: 13.60.Le.

УДК: 539.126.34.

Ключевые слова: электророжение мезонов.

ВВЕДЕНИЕ

Ключом к пониманию механизмов формирования доминирующей части массы адронов и природы кварк-глюонного конфайнмента является информация о структуре возбужденных состояний нуклона и динамике сильного непертурбативного взаимодействия, которая может быть получена из анализа амплитуд электровозбуждения нуклонных резонансов [1–5].

Амплитуды электровозбуждения N^* могут быть извлечены из доминирующих в резонансной области каналов двухпионного $\pi^+\pi^-p$ и однопионного $N\pi$ электророжения на протонах, в частности из канала $\pi^0 p$ [1, 2, 6, 7].

Основным направлением исследований на детекторе CLAS12 [9] в области виртуальности фотонов $Q^2 < 2$ ГэВ² является поиск гибридных барионов — новых состояний адронной материи, состоящих не только из трех одетых кварков, но и из одетого глюона. Такие состояния предсказываются в вычислениях спектра нуклонных резонансов из лагранжиана КХД [8].

Таким образом, данные исследования являются актуальными в современной физике частиц и направлены на решение открытых вопросов Стандартной модели о формировании большей части видимой массы во Вселенной и природе конфайнмента.

В настоящей работе представлены результаты анализа событий реакции $e + p \rightarrow e' + p' + \pi^0 \rightarrow e' + p' + \gamma + \gamma$ из экспериментальных данных детектора CLAS12 в резонансной области, в рамках коллаборации между Ла-

бораторией им. Т. Джефферсона и Московским государственным университетом им. М. В. Ломоносова.

1. ОТБОР СОБЫТИЙ РЕАКЦИИ ЭЛЕКТРОРОЖДЕНИЯ НЕЙТРАЛЬНОГО ПИОНА НА ПРОТОНЕ

Для анализа реакции электророжения нейтрального пиона на протоне использовались экспериментальные данные, полученные на детекторе CLAS12 при энергии пучка электронов $E_e = 6.535$ ГэВ. Рассматриваемый диапазон кинематических переменных: $1.1 < W < 2.5$ ГэВ и $0.4 < Q^2 < 3.5$ ГэВ².

Наиболее достоверно события реакции выделяются при рассмотрении топологии с двумя зарегистрированными фотонами от распада нейтрального пиона π^0 в конечном состоянии. Для отделения фоновых событий, которые включают в себя в том числе и события других реакций, были разработаны специальные отборы, применяемые ко всем событиям:

- требуется наличие только одного электрона в событии,
- требуется наличие только одного протона в событии,
- требуется наличие только двух фотонов, оставляющих энергию в электромагнитном калориметре $E_\gamma^{\text{Cal}} > 20$ МэВ,
- допускается наличие любого числа фотонов, имеющих углы с начальным и конечным электронами меньше, чем 8 и 7° соответственно (в событии

* pavlovaan@my.msu.ru

кроме фотонов реакции возможна регистрация фотонов от сопутствующих процессов, например, Бете-Гайтлеровских фотонов, обладающих малыми углами разлета. Конкретные значения углов были получены в результате сравнения с симуляцией),

- допускается наличие любого числа фотонов и нейтронов, оставляющих энергию в калориметре $E_{\gamma}^{\text{ECal}} < 20$ и $E_n^{\text{ECal}} < 75$ МэВ соответственно (малость энергий таких частиц не позволяет судить о достоверности их регистрации, что подтверждается симуляцией. При наличии данных фотонов и нейтронов в событиях симуляции изменение распределений практически не происходит),
- допускается наличие любого числа нейтронов, чьи импульсы равны нулю (подобные нейтроны возникают из-за ошибки идентификации частиц детектором, в симуляции эта проблема также воспроизводится),
- отсутствие каких-либо других частиц в событии,
- отборы, разработанные RunGroup-K, обусловленные геометрией и характеристиками детектора [10],
- угол между фотонами, имеющими $E_{\gamma}^{\text{ECal}} > 20$ МэВ, больше 4° и меньше 40° ,
- недостающий импульс $\Delta P_z(ep \rightarrow e'p'\gamma_1\gamma_2X) \leq 0.5$ ГэВ, где $\Delta P_z(ep \rightarrow e'p'\gamma_1\gamma_2X) = p_z^e + p_z^p - p_z^{e'} - p_z^{p'} - p_z^{\gamma_1} - p_z^{\gamma_2}$,
- квадрат недостающей массы нейтрального пиона $-0.08 \leq \text{MM}_{(ep \rightarrow e'p'X)}^2 \leq 0.11$ ГэВ², где

$$\text{MM}_{(ep \rightarrow e'p'X)}^2 = (W - P_{p'})^2,$$

- квадрат недостающей массы $-0.3 \leq \text{MM}_{(ep \rightarrow e'p'\gamma_1\gamma_2X)}^2 \leq 0.1$ ГэВ², где $\text{MM}_{(ep \rightarrow e'p'X)}^2 = (W - P_{p'} - P_{\gamma_1} - P_{\gamma_2})^2$,
- квадрат недостающей массы конечного протона $-1 \leq \text{MM}_{(ep \rightarrow e'\gamma_1\gamma_2X)}^2 \leq 6$ ГэВ², где $\text{MM}_{(ep \rightarrow e'\gamma_1\gamma_2X)}^2 = (W - P_{\gamma_1} - P_{\gamma_2})^2$.

Конкретный вид отборов определялся путем сравнения экспериментальных данных и Монте-Карло моделирования событий реакции. Было рассмотрено два Монте-Карло генератора событий реакции: genKYandOnePion на основе экспериментально извлеченных дифференциальных сечений реакции [11] и MCEGENpiN radcorr V9b на основе унитарной изобарной модели MAID2007 [12]. На рис. 1 представлены графики сравнения W распределений в результате применения всех разработанных отборов в экспериментальных данных и генерированных событиях, пропущенных через модель детектора для обоих генераторов. Генератор MCEGENpiN radcorr V9b учитывает радиационные эффекты, а также лучше описывает экспериментальные данные, поэтому в дальнейшей работе предполагается использование именно этого генератора.

Были получены распределения инвариантной массы пары фотонов $M_{inv}^{\gamma\gamma} = \sqrt{(P_{\gamma_1} + P_{\gamma_2})^2}$ в различных кинематических ячейках по W и Q^2 . Информация о количестве ячеек по каждой переменной и их ширине содержится в таблице.

Максимумы в распределениях находятся в ожидаемых значениях, соответствующих массе нейтрального пиона. Для аппроксимации использовалась сумма функции Гаусса с радиационным «хвостом», описывающей сигнал, и логнормальной функции, описывающей фон (формулы (1)–(3)).

$$f_{\text{signal}}(x) = \begin{cases} A \cdot \exp\left(-\frac{(x - \mu_{\text{signal}})^2}{2\sigma_{\text{signal}}^2}\right) \cdot \exp(-\lambda(x - \mu_{\text{signal}})), & x \geq \mu_{\text{signal}}, \\ A \cdot \exp\left(-\frac{(x - \mu_{\text{signal}})^2}{2\sigma_{\text{signal}}^2}\right), & x < \mu_{\text{signal}}, \end{cases} \quad (1)$$

$$f_{\text{background}}(x) = \frac{B}{(x + 0.2) \cdot \sigma_{\text{background}} \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{(\ln(x + 0.2) - \mu_{\text{background}})^2}{2\sigma_{\text{background}}^2}\right), \quad (2)$$

$$f_{\text{total}}(x) = f_{\text{signal}}(x) + f_{\text{background}}(x), \quad (3)$$

где x — координата по оси абсцисс; A , μ_{signal} , σ_{signal} — амплитуда, среднее значение и дисперсия функции Гаусса с радиационным «хвостом», λ — параметр радиационного «хвоста»; B , $\mu_{\text{background}}$, $\sigma_{\text{background}}$ — амплитуда, среднее значение и дисперсия логнормальной

функции. На рис. 2 представлена аппроксимация распределений инвариантной массы пары фотонов $M_{inv}^{\gamma\gamma}$ на примере $Q^2 \in [1.0, 1.5]$ ГэВ² ячейки для первой, второй, третьей резонансных областей, а также для $W \in [1.900, 1.925]$ ГэВ.

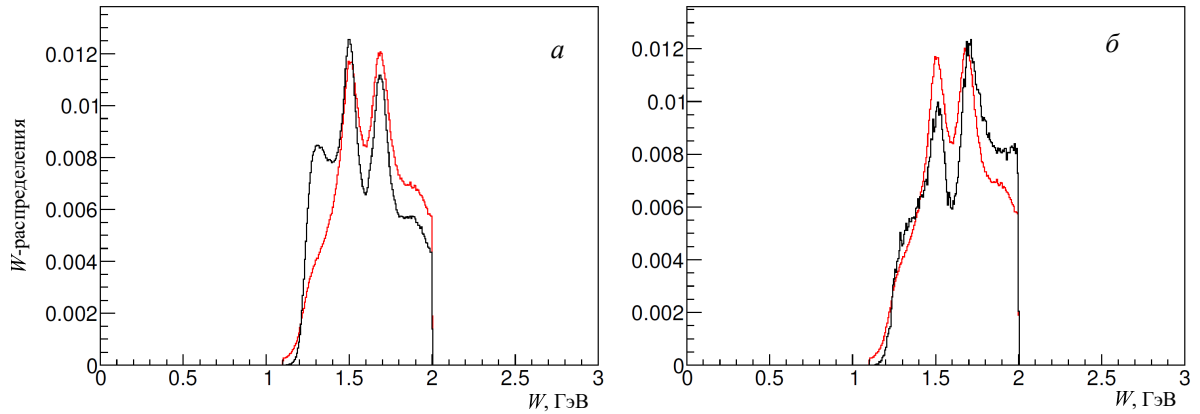


Рис. 1. W -распределения (нормированы на единицу) после применения всех разработанных отборов в экспериментальных данных (красная кривая) и в генерированных событиях, пропущенных через модель детектора (черная кривая): a — генератор genKYandOnePion, b — генератор MCEGENpiN radcorr V9b

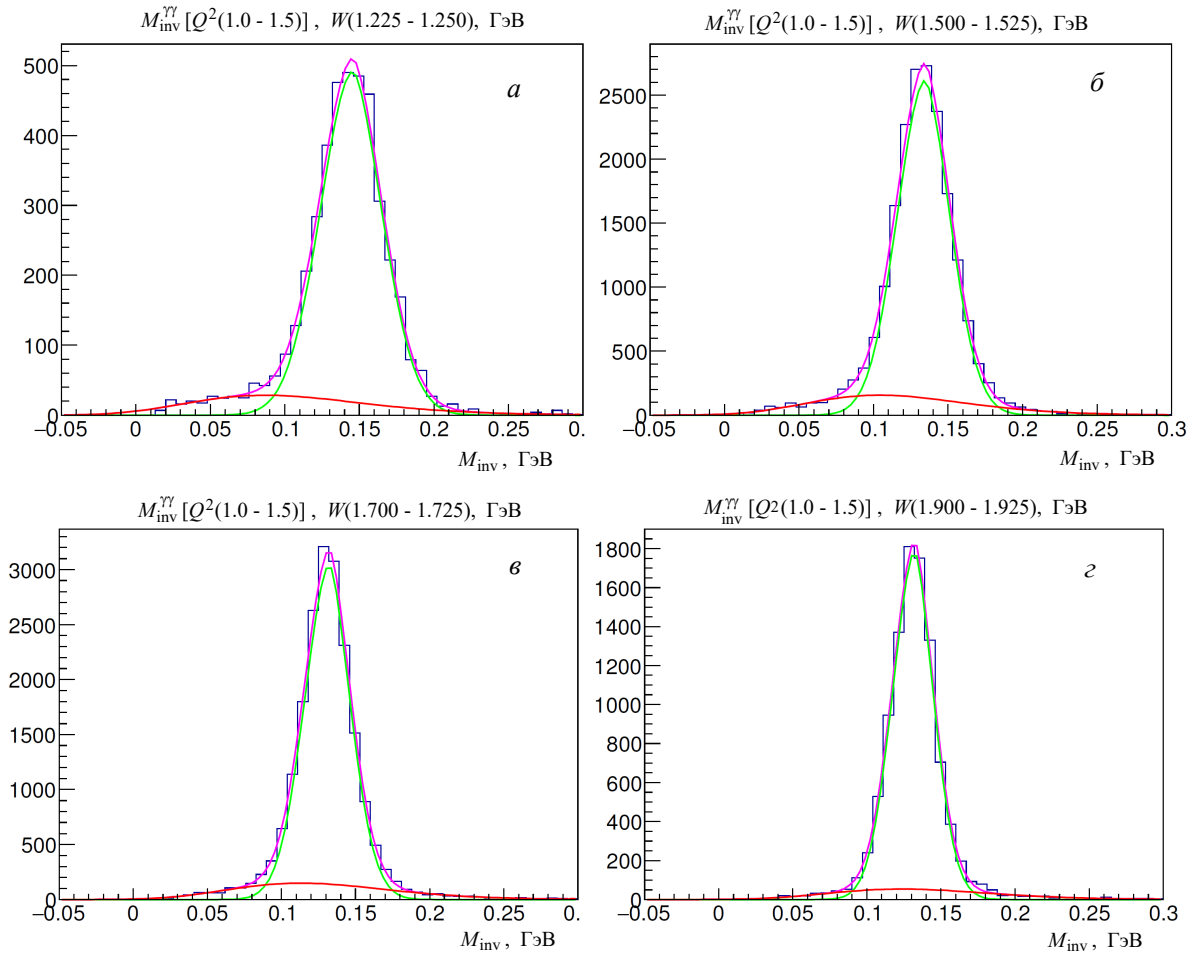


Рис. 2. $M_{inv}^{\gamma\gamma}$ -распределения при $Q^2 \in [1.0, 1.5]$ ГэВ² для первой (a), второй (b), третьей (c) резонансных областей, а также для $W \in [1.900, 1.925]$ ГэВ (d), аппроксимированные суммой (пурпурная кривая, формула (3)) функции Гаусса с радиационным «хвостом», описывающей сигнал (зелёная кривая, формула (1)), и логнормальной функции фона (красная кривая, формула (2))

Таблица. W - и Q^2 -разбиение на кинематические ячейки

Переменная	Размер ячейки	Кол-во ячеек	Нижний предел	Верхний предел
W , ГэВ	0.025	56	1.1	2.5
Q^2 , ГэВ ²	0.2, 0.4, 0.5, 1.0, 1.0	5	0.4	3.5

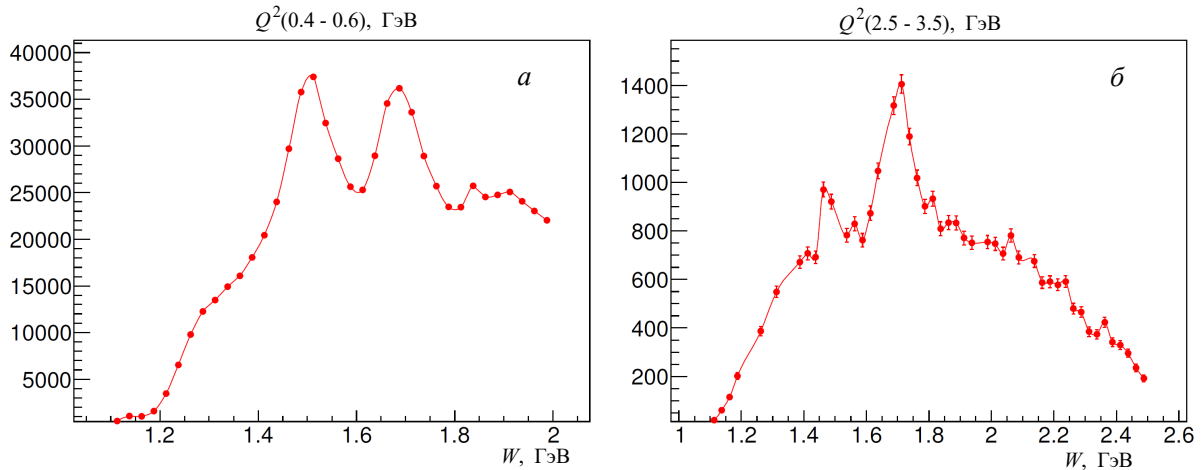


Рис. 3. Выходы реакции как функции W : a — при $Q^2 \in [0.4, 0.6]$ ГэВ², b — при $Q^2 \in [2.5, 3.5]$ ГэВ²

Выходы реакции, то есть количество событий, соответствующих распаду нейтрального пиона на пару фотонов, определялись как число событий под сигнальной кривой. Кривые выходов реакции как функции W в кинематических ячейках по Q^2 представлены на рис. 3. Учтены только статистические погрешности. В первой ячейке по Q^2 (рис. 3, a) видны выраженные максимумы во второй и третьей резонансных областях. Высота пика в области дельта-резонанса $\Delta(1232)$ гораздо ниже ожидаемой. Это связано с ограничениями детектора CLAS12 на регистрацию обоих фотонов, имеющих большие углы разлета. С ростом Q^2 наблюдается значительная потеря статистики.

В дальнейшем для извлечения дифференциальных сечений реакции, на основе которых могут быть получены амплитуды электровозбуждения N^* , необходимо будет рассматривать разделение событий на кинематические ячейки по четырем кинематическим переменным: W , Q^2 , $\cos\theta_{\pi^0}^*$, $\phi_{\pi^0}^*$, где $\theta_{\pi^0}^*$ и $\phi_{\pi^0}^*$ соответственно полярный и азимутальный углы нейтрального пиона в системе центра масс виртуальный фотон-протон. По предварительным оценкам, процедура аппроксимации начинает удовлетворительно работать примерно при 250 событиях в одной кинематической ячейке. Таким образом, в случае 8 ячеек по $\cos\theta_{\pi^0}^*$ и 5 ячеек по $\phi_{\pi^0}^*$, потребуется не менее $250 \times 8 \times 5 = 10000$ событий в одной ячейке по W и Q^2 для удовлетворительной работы аппроксимации. Граница в 10000 событий определяет доступный для исследования диапазон кинематических переменных. Кроме того, из-за ограничений, связанных со статистикой, может быть

доступно исследование реакции при разбиении на кинематические ячейки только по трем переменным: W , Q^2 , $\cos\theta_{\pi^0}^*$. В данном случае требуемый минимум — 2000 событий, и возможно измерение только неполяризованных дифференциальных сечений. При малых значениях Q^2 эти ограничения еще позволяют захватить большую часть кинематической области, но с ростом Q^2 эта область уменьшается, и при $Q^2 \in [2.5, 3.5]$ ГэВ² (рис. 3, b) невозможно выделение выходов в четырехмерном фазовом пространстве.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе были проанализированы данные детектора CLAS12 при энергии пучка электронов $E_e = 6.535$ ГэВ с целью выделения событий реакции $e + p \rightarrow e' + p' + \pi^0 \rightarrow e' + p' + \gamma + \gamma$. В топологии, в которой регистрируются оба фотона от распада нейтрального пиона, были разработаны критерии отбора событий, построены кривые выходов реакции как функции двух переменных W и Q^2 . Рассмотрены Монте-Карло генераторы событий genKYandOnePion и MCEGENpiN radcorr V9b, и для дальнейшей работы выбран генератор MCEGENpiN radcorr V9b, воспроизводящий распределения экспериментальных данных наилучшим образом. Проведена оценка кинематических областей, в которых доступно извлечение дифференциальных сечений.

- [1] *Aznauryan I.G., Burkert V.D.* // Prog. Part. Nucl. Phys. **1**. 671 (2012).
- [2] *Burkert V.D., Roberts C.D.* // Rev. Mod. Phys. **91**. 011003 (2019).
- [3] *Roberts C.D.* // Few Body Syst. **59**. 72 (2018).
- [4] *Segovia J.* et al. // Few Body Syst. **55**. 1185 (2015).
- [5] *Segovia J.* et al. // Phys. Rev. Lett. **115**. 171801 (2015).
- [6] *Moiseev V.I.* // Few Body Syst. **59**. 46 (2018).
- [7] *Markov N.* et al. // Phys. Rev. **101**. 015208 (2020).
- [8] *D'Angelo A., Burkert V.D., Carman D.S.* et al. // A Search for Hybrid Baryons in Hall B with CLAS12. JLab Experiment E12-09-003.
- [9] *Burkert V.D.* // Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. **68**. 405 (2018).
- [10] *Carman D.S., D'Angelo A., Lanza L.* // CLAS12 RG-K Analysis Note Overview and Procedures. https://clasweb.jlab.org/wiki/images/3/34/Rgk_analysis_document_April_22_2022.pdf
- [11] *Klimenko V.A., Moiseev V.I.* // <https://github.com/ValeriiKlimenko/genKYandOnePion>
- [12] *Davydov M.M., Isupov E.L.* // https://github.com/naya2507/MCEGENpiN_radcorr_naya

Neutral pion electroproduction off proton in reaction

$$e + p \rightarrow e' + p' + \pi^0 \rightarrow e' + p' + \gamma + \gamma$$

A. N. Pavlova^{1,a}, V. B. Ryzhkov¹, A. A. Rusova^{1,2}, E. L. Isupov²

¹*Department of nuclear Physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia*

²*Skobeltsyn Research Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University
Moscow 119991, Russia*

E-mail: ^apavlovaan@my.msu.ru

In this paper, the results of an analysis of events for the reaction $e + p \rightarrow e' + p' + \pi^0 \rightarrow e' + p' + \gamma + \gamma$ from the experimental data of the CLAS12 detector in the resonance region at an electron beam energy of $E_e = 6.535$ GeV are presented. A topology with the registration of two gamma quanta from the decay of a neutral pion in the final state is considered; special selections that reduce the number of background events are developed; a comparison is made between two Monte-Carlo generators of reaction events: genKYandOnePion and MCEGENpiN radcorr V9b; an approximation of the distributions of the invariant mass of a photon pair in kinematic cells by the total energy of the final hadrons in the virtual photon - proton center of mass system W and the photon virtuality Q² is carried out, based on which the reaction yields are calculated as functions of two variables; An assessment was made of the regions of kinematic variables available for extracting differential cross-sections.

PACS: 13.60.Le.

Keywords: meson electroproduction.

Received 25 March 2026.

Сведения об авторах

1. Павлова Анастасия Николаевна — студент; e-mail: pavlovaan@my.msu.ru
2. Рыжков Виталий Борисович — студент; e-mail: vitalikryjkov@gmail.com
3. Русова Анна Александровна — канд. физ.-мат. наук, ассистент; тел.: (495) 939-16-97, e-mail: anya@jlab.org
4. Исупов Евгений Леонидович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-25-58, e-mail: e.l.isupov@gmail.com.