

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ РАЗРЕШЕНИЕ НЕОДИМСОДЕРЖАЩЕГО СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО ДЕТЕКТОРА ДЛЯ ПОИСКА БЕЗНЕЙТРИННОГО ДВОЙНОГО БЕТА-РАСПАДА ^{150}Nd

И. Р. Барабанов^{1,2}, А. В. Вересникова^{1,2}, Ю. М. Гаврилюк¹,
В. И. Гуренцов^{1,2}, А. М. Гангапшев^{1,2}, В. В. Казалов^{1,2}, Г. Я. Новикова^{1,2},
З. Х. Калажиков², Д. А. Текуева^{1,2}, М. Ш. Тхазаплижев², Е. А. Янович^{1,2}

Рассчитано энергетическое разрешение для неодимсодержащего жидкого органического сцинтилляционного детектора (Nd-OC) с объемом в нескольких литрах для поиска безнейтринного двойного бета-распада ^{150}Nd в зависимости от концентрации неодима вплоть до концентрации 50 г/л. Результаты приведены в подробных таблицах и графиках.

Ключевые слова: безнейтринный двойной бета-распад, жидкий сцинтиллятор, изотоп неодим-150, энергетическое разрешение, детектор нейтрино, низкофонные исследования.

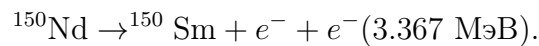
Введение. Поиск безнейтринного двойного бета-распада ($0\nu 2\beta$ -распада) ядер – одна из наиболее актуальных и интересных задач современной физики низких энергий [1]. Открытие и измерение скорости $0\nu 2\beta$ -распада позволит установить природу нейтрино (дираковская или майорановская) [2], а также вычислить абсолютную величину эффективной массы нейтрино. Таким образом, регистрация безнейтринного двойного бета-распада будет означать открытие “новой физики” [3]. Большое количество экспериментов с изотопами различных элементов нацелено на достижение более высокого предела времени периода полураспада $T_{1/2}(0\nu)$. Среди наиболее перспективных кандидатов по поиску $0\nu 2\beta$ -распада является ядро изотопа неодима – ^{150}Nd благодаря большой энергии перехода ($Q_{\beta\beta} = 3.367$ МэВ) и высокому атомному номеру. Высокая

¹ ИЯИ РАН, 117312 Россия, Москва, пр-т 60-летия Октября, 7а; e-mail: veresnikova@inr.ru.

² Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, 360004 Россия, Кабардино-Балкарская Республика, Нальчик, ул. Чернышевского, 173.

энергия $0\nu 2\beta$ -распада ^{150}Nd повышает вероятность его наблюдения при значительном улучшении фоновых условий эксперимента и повышении энергетического разрешения детектора. При этом, учитывая важность проблемы, особенно в случае положительного результата, желательно его подтверждения в различных типах экспериментов [4, 5].

В настоящей работе мы рассматриваем возможность создания детектора с неодим-содержащим жидким органическим сцинтиллятором (Nd-ОС) для регистрации $0\nu 2\beta$ -распада изотопа ^{150}Nd :



При $0\nu 2\beta$ -распада изотопа ^{150}Nd образуются два электрона с суммарной энергией 3.367 МэВ.

Органические сцинтилляторы по сравнению с другими типами детекторов (криогенными и ионизационными) имеют, как правило, худшее разрешение. Однако возможность создания крупномасштабных установок с более высокой чистотой по радиоактивным примесям позволяет рассматривать жидкие сцинтилляционные детекторы в качестве перспективных.

Рассматриваемая задача по созданию детектора на основе Nd-ОС ранее исследовалась в работах [5–7].

В качестве прототипа крупномасштабного детектора создается детектор в рамках проекта “Новые методы исследования безнейтринного двойного бета-распада” с цилиндрической сцинтилляционной ячейкой диаметром 10 см и длиной 30 см из оптического кварца или органического стекла.

Моделирование методом Монте-Карло. В моделировании методом Монте-Карло рассмотрены два типа сцинтилляционных ячеек: цилиндрическая и формы прямоугольного параллелепипеда с квадратным сечением $10 \times 10 \text{ см}^2$ и длиной 30 см, поскольку такая форма позволяет добиться большей равномерности светосбора. Предполагается, что поверхность модуля покрыта светоотражающей плёнкой с коэффициентом отражения 98% (ВМ-2000). При прохождении фотона от сцинтилляционной вспышки учитывается возможность полного внутреннего отражения в прозрачной оболочке детектора. Пробеги электронов, образующихся в результате распада ^{150}Nd , не превышают $\sim 1 \text{ см}$, и, в расчете энерговыделение принималось точечным.

Для обоих типов сцинтилляционных ячеек рассчитан основной параметр детектора – ожидаемое энергетическое разрешение (ширина на полувысоте), определяющее в конечном итоге эффективность регистрации $0\nu 2\beta$ -распада и фоновые характеристики.

В разыгрывании методом Монте-Карло сцинтилляционные ячейки заполнены сцинтиллятором, содержащим ^{150}Nd с концентрацией (0.7, 1.8, 3.3, 5.5) г/л со световым выходом, представленным в табл. 1 для двух типов сцинтиллятора [9].

Т а б л и ц а 1

Зависимость световых выхода от концентрации Nd в сцинтилляторе, [9]

| | Световых выход сцинтиллятора, фотон/МэВ | |
|-----|---|------------------|
| | LAB | Псевдокумол (РС) |
| 0.0 | 10350 | 13800 |
| 0.7 | 10039 | 13524 |
| 1.8 | 9418 | 13248 |
| 3.3 | 8590 | 12834 |
| 5.5 | 7452 | 12558 |

На двух торцевых поверхностях сцинтилляционной ячейки расположены фотоэлектронные умножители (ФЭУ) с квантовой эффективностью 30%, которые перекрывают 100% торцевых поверхностей сцинтилляционной ячейки. Между торцевыми поверхностями и ФЭУ на оптической смазке установлены световоды из прозрачного оргстекла для улучшения равномерности сбора фотонов на фотокатод ФЭУ.

Расчет проводился методом статистических испытаний с учётом розыгрыша сцинтилляционной вспышки по всему объёму детектора, прохождения каждого фотона от места вспышки до ФЭУ, образование фотоэлектрона и его регистрации. Энерговыделение двух образовавшихся электронов принималось точечным. Распределение событий распада по объёму детектора принималось равномерным. Длина поглощения фотона (ослабление интенсивности в 2.7 раз) в зависимости от длины волны была измерена на спектрофотометре и представлена на рис. 1.

Моделирование эмиссионного спектра означает создание генератора случайных чисел ξ , распределённых по закону $F(L)$. Переход от генератора случайных чисел α , равномерно распределённых в интервале (0, 1), к генератору случайных чисел ξ , распределённых по закону $F(L)$, осуществляется решением уравнения (теорема Н. В. Смирнова):

$$\alpha = \int_0^{\xi} F(L)dL / \int_{L_{\min}}^{L_{\max}} F(L)dL = F(\xi), \quad \xi = F^{-1}(\alpha).$$

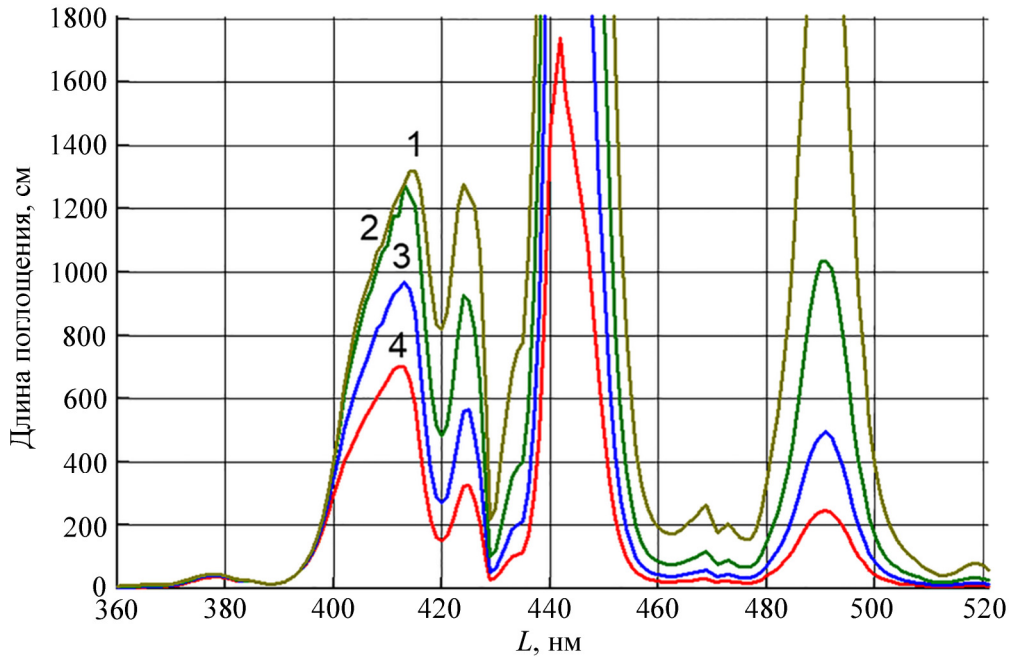


Рис. 1: Длина поглощения фотона в зависимости от длины волны. Концентрация Nd: 1 – 0.7 г/л, 2 – 1.8 г/л, 3 – 3.3 г/л, 4 – 5.5 г/л.

По полученному значению длины волны L определяем длину поглощения R_0 и аналогичным образом проводим розыгрыш длины поглощения фотона R :

$$\alpha = \int_0^{\xi} e^{-R/R_0} dR / \int_0^{\infty} e^{-R/R_0} dR = e^{-\xi/R_0}, \quad \xi = -R_0 \ln \alpha.$$

Предполагаем, что распределение фотоэлектронов ФЭУ определяется законом нормального распределения. Для моделирования этого распределения мы используем достаточно хорошее приближение к нормальному закону в области до $\pm 5\sigma$:

$$\xi \sum_{i=1}^{12} \alpha_i - 6 \text{ для среднего значения } 0 \text{ и дисперсии } 1.$$

Полученные результаты. Результаты расчета ожидаемого энергетического разрешения для детекторов различной конфигурации и состава Nd-ОС для энергии 3368 кэВ представлены в табл. 2 и на рис. 2, 3, 4 и 5.

Т а б л и ц а 2

Энергетическое разрешение цилиндрического модуля и модуля с квадратным сечением для двух вариантов сцинтиллятора в зависимости от концентрации ^{150}Nd при энергии электронов 3.368 МэВ

| Детектор | Концентрация, г/л | | | | |
|--------------------|-------------------|------|------|------|------|
| | Сцинтиллятор | 0.7 | 1.8 | 3.3 | 5.5 |
| Цилиндр | LAB | 7.33 | 7.66 | 8.09 | 9.18 |
| | PC | 7.18 | 7.39 | 7.78 | 8.53 |
| Квадратное сечение | LAB | 6.20 | 7.00 | 7.99 | 9.65 |
| | PC | 5.94 | 6.71 | 7.66 | 9.35 |

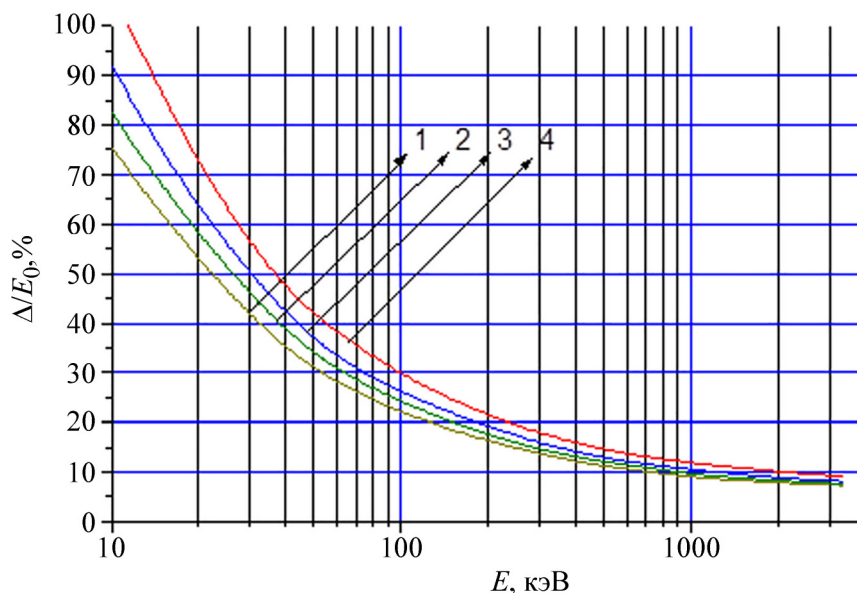


Рис. 2: Энергетическое разрешение цилиндрического модуля диаметром 10 см и длиной 30 см для четырёх вариантов концентрации Nd в сцинтилляторе LAB: 1 – 0.7 г/л, 2 – 1.8 г/л, 3 – 3.3 г/л, 4 – 5.5 г/л.

Рассмотрено влияние длины световода на энергетическое разрешение.

В качестве примера на рис. 6 представлено энергетическое распределение сигнала от электрона с энергией 600 кэВ в цилиндрической сцинтилляционной ячейке с длиной световода 10 см, в сравнении с нормальным распределением.

На рис. 7 представлено распределение при тех же параметрах, но при отсутствии световода.

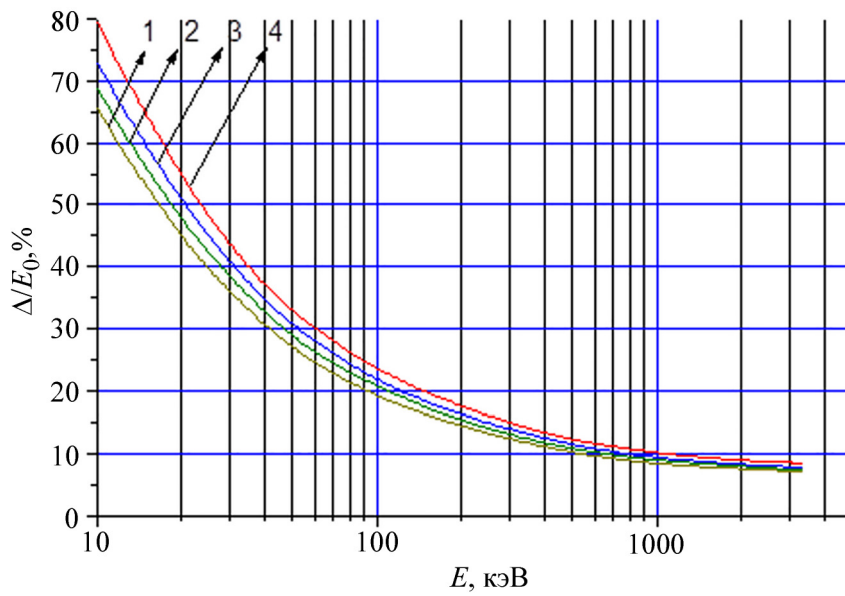


Рис. 3: Энергетическое разрешение цилиндрического модуля диаметром 10 см и длиной 30 см для четырёх вариантов концентрации Nd в сцинтилляторе PC : 1 – 0.7 г/л, 2 – 1.8 г/л, 3 – 3.3 г/л, 4 – 5.5 г/л.

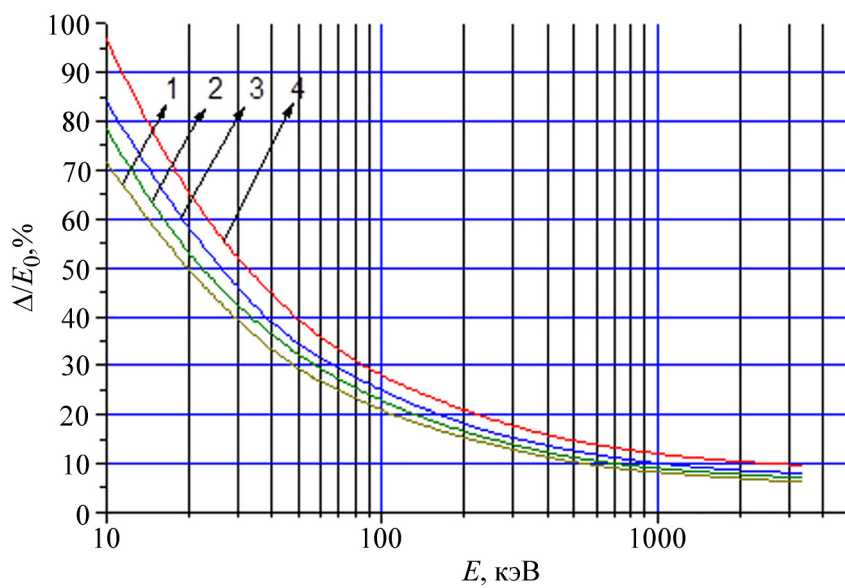


Рис. 4: Энергетическое разрешение модуля с квадратным сечением 10×10 см² и длиной 30 см в % для четырёх вариантов концентрации Nd в сцинтилляторе LAB : 1 – 0.7 г/л, 2 – 1.8 г/л, 3 – 3.3 г/л, 4 – 5.5 г/л.

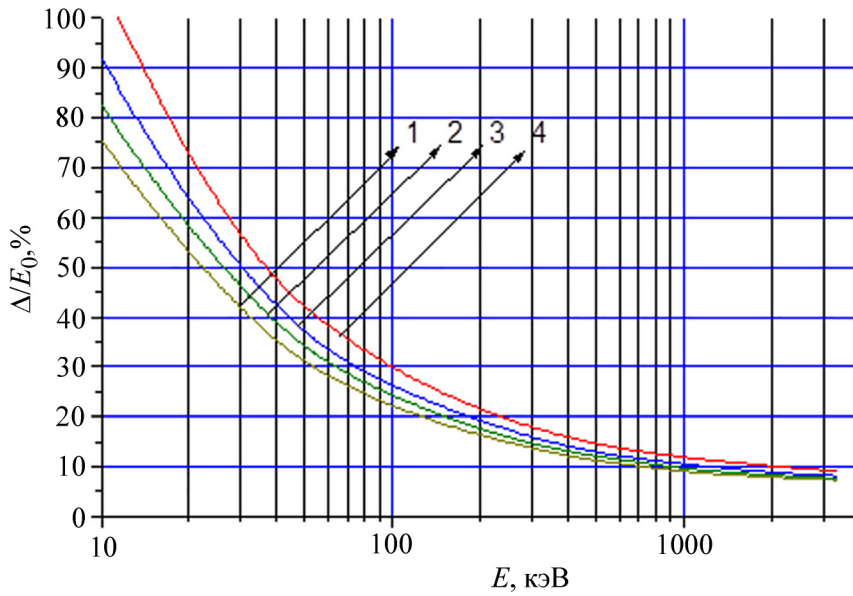


Рис. 5: Энергетическое разрешение модуля с квадратным сечением $10 \times 10 \text{ см}^2$ и длиной 30 см в % для четырёх вариантов концентрации Nd в сцинтиляторе РС: 1 – 0.7 г/л, 2 – 1.8 г/л, 3 – 3.3 г/л, 4 – 5.5 г/л.

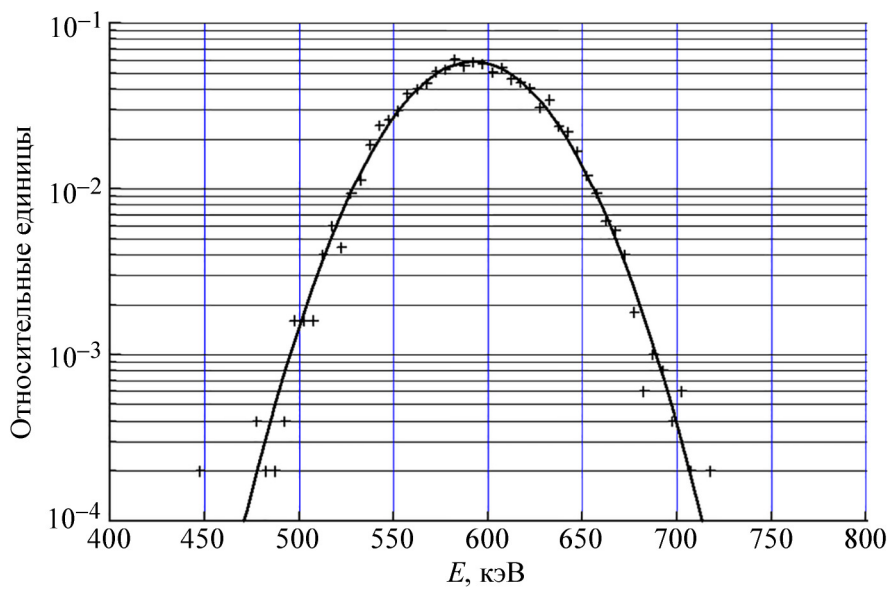


Рис. 6: Форма энергетического распределения сигнала от электрона с энергией 600 кэВ в цилиндрической сцинтиляционной ячейке с длиной световода 10 см. Сплошная линия – теоретическое нормальное распределение.

Из этого рисунка видно, что в сцинтиляционной ячейке присутствуют не случайные события, которые локализуются вблизи фотодетекторов и в углах модуля и существенно отличаются от событий из центральной области. Отклонение от нормального распределения приводит к неверной калибровке и увеличению фоновых условий модуля. Для устранения влияния таких краевых эффектов использованы два прозрачных световода на торцах модуля, не дающих сцинтиляционной вспышки.

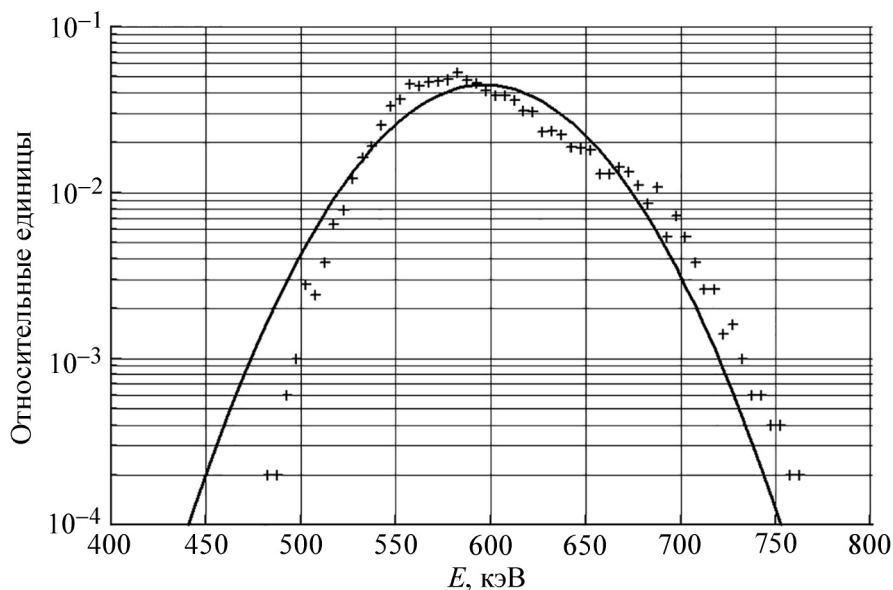


Рис. 7: Форма энергетического распределения сигнала от электрона с энергией 600 кэВ в цилиндрической сцинтиляционной ячейке без световода. Сплошная линия – теоретическое нормальное распределение.

Полученные результаты будут использованы для расчета скорости счета фона от радиоактивных примесей вне и внутри детектора, а также принципиально неустраняемого фона от двойного двухнейтринного распада ($2\nu\beta\beta$) и, самое важное, для эффективности регистрации ^{150}Nd . Что в свою очередь позволит оценить и свести к минимуму фон от двойного двухнейтринного бета-распада.

Заключение. Рассмотрена возможность создания детектора на основе неодимсодержащего жидкого органического сцинтиллятора (Nd-OC) для регистрации $0\nu2\beta$ -распада изотопа ^{150}Nd . Для детектора объемом несколько литров рассчитано ожидаемое энергетическое разрешение в зависимости от концентрации Nd. Результаты приведены в подробных таблицах и графиках. Показано, что вплоть до концентрации Nd ~ 5 г/л энергетическое разрешение остается достаточно высоким, $\sim 9\%$.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ, проект FZZR-2022-0004.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] А. С. Барабаш, УФН **184**(5), 524 (2014). DOI: 10.3367/UFNe.0184.201405f.0524.
- [2] M. Dolinski, A. Poon, W. Rodejohann, Annual Review of Nuclear and Particle Science **69**, 219 (2019).
- [3] A. Giuliani et al. [APEC Committee], “Double Beta Decay APPEC Committee Report”, arXiv:1910.04688 (2019).
- [4] В. Д. Ашитков, А. С. Барабаш, В. Я. Браднова и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **38**(10), 22 (2011). <https://doi.org/10.3103/S1068335611100046>.
- [5] В. Д. Ашитков, А. С. Барабаш, В. Я. Браднова и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **40**(12), 49 (2013). <https://doi.org/10.3103/S1068335613120063>.
- [6] И. Р. Барабанов, Л. Б. Безруков, Г. Я. Новикова, Е. А. Янович, Приборы и техника эксперимента **60**(4), 82 (2017). <https://doi.org/10.1134/S0020441217030162>.
- [7] И. Р. Барабанов, Л. Б. Безруков, Г. Я. Новикова, Е. А. Янович, Письма в ЭЧАЯ **15**(6), 502 (2018). <https://doi.org/10.1134/S1547477118060043>.
- [8] И. Р. Барабанов, Л. Б. Безруков, А. В. Вересникова и др., Ядерная физика **82**(2), 100 (2019). <https://doi.org/10.1134/S1063778819020029>.
- [9] И. Р. Барабанов, А. В. Вересникова, Э. Ю. Исупова и др., Ядерная физика **86**(6), 1 (2023). DOI: 10.31857/S0044002723060132.

Поступила в редакцию 31 августа 2023 г.

После доработки 5 октября 2023 г.

Принята к публикации 6 октября 2023 г.