

## Разработка и исследование магнитных экранов для фотоэлектронных умножителей нейтринных детекторов эксперимента Нейтрино-4М на реакторах ПИК и СМ-3

© А.А. Можайко,<sup>1</sup> С.А. Маннинен,<sup>1</sup> Л.В. Мухамедзянова,<sup>1</sup> П.А. Кузнецов,<sup>1</sup> Т.В. Князюк,<sup>1</sup>  
А.П. Серебров,<sup>2</sup> Р.М. Самойлов,<sup>2</sup> В.В. Федоров<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский центр „Курчатовский институт“ – ЦНИИ КМ „Прометей“,  
191015 Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Научно-исследовательский центр „Курчатовский институт“ – ПИЯФ,  
188300 Гатчина, Ленинградская обл., Россия  
e-mail: prk3@crism.ru, annaanna-1996@mail.ru, serebrov\_ap@npni.nrcki.ru

Поступило в Редакцию 24 апреля 2023 г.

В окончательной редакции 4 августа 2023 г.

Принято к публикации 27 августа 2023 г.

Смоделирована и создана система экранов на основе рулонного магнитного материала MAP-1K, разработанная для защиты фотоэлектронных умножителей, входящих в состав новых нейтринных детекторов эксперимента НЕЙТРИНО-4М, от магнитного поля Земли. Произведен расчет коэффициента экранирования отдельного цилиндрического экрана и сборки из 25 экранов при направлении оси экранирующей конструкции вдоль или поперек горизонтальной составляющей магнитного поля Земли. Выполнено сравнение полученных экспериментальных данных с результатами компьютерного моделирования. Проанализированы особенности взаимного влияния экранов в установке. Продемонстрировано практическое отсутствие влияния магнитного поля Земли на характеристики детектора при его перемещениях и поворотах в эксперименте с новым нейтринным детектором, оснащенным магнитными экранами.

**Ключевые слова:** максимальная магнитная проницаемость, аморфные магнитомягкие сплавы, распределение намагниченности, магнитный экран, коэффициент экранирования, кривая намагничивания, нейтринный детектор, фотоэлектронный умножитель.

DOI: 10.61011/JTF.2023.11.56502.104-23

### Введение

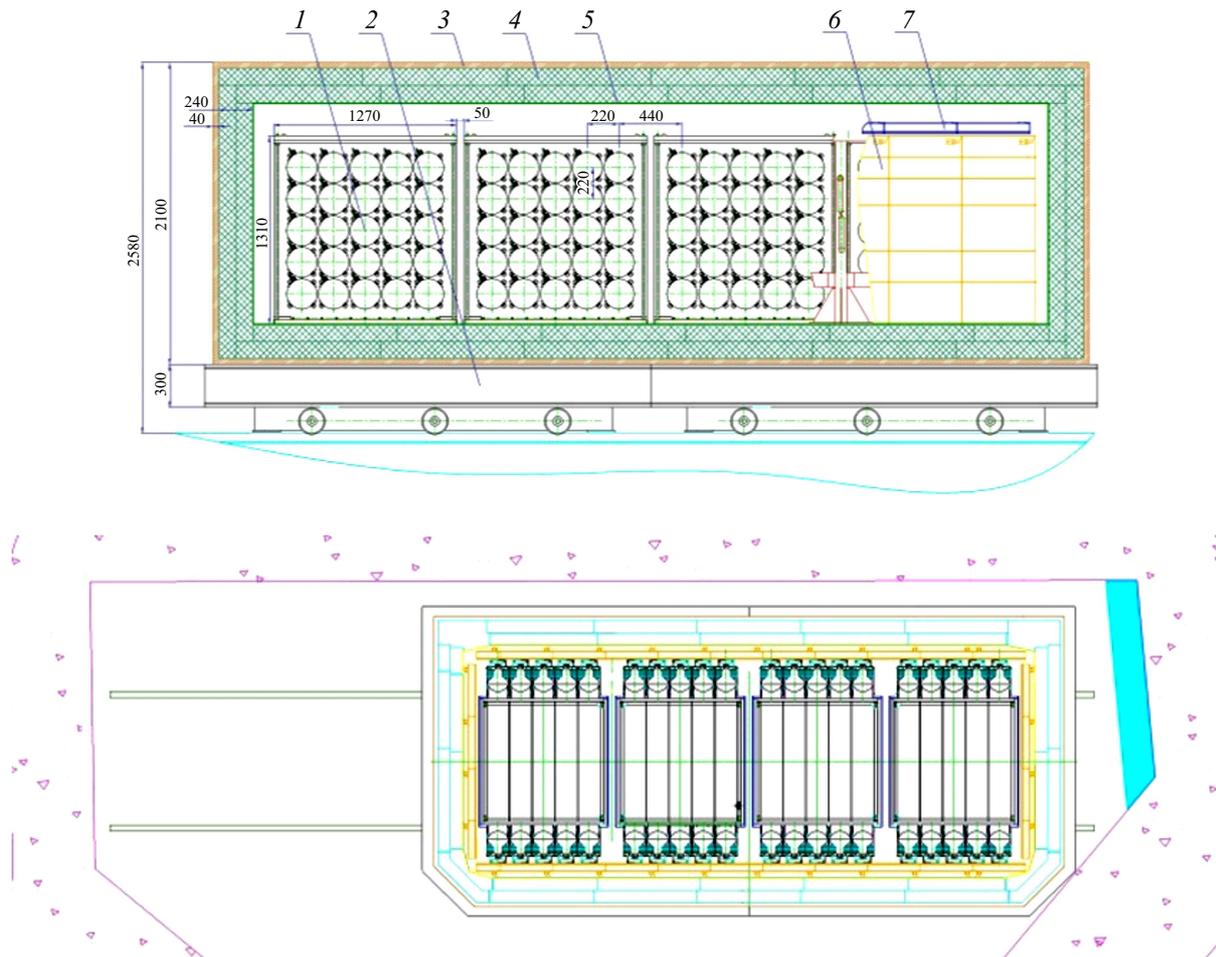
jgadj'ga

lgk;lk ;ak

В НИЦ „Курчатовский институт“ — ПИЯФ проводятся работы по созданию нового нейтринного детектора для эксперимента НЕЙТРИНО-4М по изучению нейтринных осцилляций. Эксперимент НЕЙТРИНО-4М проводится на реакторах СМ-3 (Росатом) и проектируется для реактора ПИК (НИЦ „Курчатовский институт“ — ПИЯФ) [1–3]. Регистрация оптического излучения сцинтиллятора в данном детекторе осуществляется с помощью двух матриц, состоящих из 100 фотоэлектронных умножителей (ФЭУ). Каждый ФЭУ располагается внутри цилиндрического защитного кожуха. Даже слабое магнитное поле Земли (МПЗ) ухудшает характеристики ФЭУ. Одним из методов ослабления МПЗ является магнитное экранирование [4–7]. Наиболее простым, дешевым и надежным, а в ряде случаев единственно возможным способом ослабления внешних магнитных полей является пассивное экранирование с применением специальных магнитомягких материалов. Аморфные магнитомягкие сплавы на основе кобальта уже зарекомендовали себя как исходный материал для создания эффективных защитных экранов от постоянных

и переменных магнитных полей промышленной частоты благодаря повышенным магнитным свойствам по сравнению с кристаллическими аналогами, а также их технологическим преимуществам: гибкости и возможности придания любой формы без потери магнитных свойств [8,9]. Кроме того, аморфные сплавы в отличие от кристаллических аналогов не требуют проведения дорогостоящей высокотемпературной вакуумной термообработки, что значительно сокращает расходы на изготовление экрана.

В эксперименте „Нейтрино-4“ по поиску стерильного нейтрино обнаружен эффект осцилляций на уровне достоверности трех стандартных отклонений [10]. Для проверки предположения о том, что эффект связан с влиянием магнитного поля на коэффициент усиления ФЭУ, ставится задача экранирования ФЭУ от магнитного поля. С целью значительного увеличения точности эксперимента создается вторая нейтринная лаборатория на реакторе СМ-3 (Димитровград, Россия) и разрабатывается новый нейтринный детектор. Детектор сцинтилляционного типа состоит из четырех модулей, имеющих многосекционную структуру с горизонтальным расположением 100 секций с ФЭУ, расположенными по обе стороны секции. Показана возможность увеличения точности эксперимента в 2.7 раза, что позволит до-



**Рис. 1.** Конструкция детектора реакторных антинейтрино на подвижной платформе (вверху) и схема расположения детектора в помещении 170 (внизу). 1 — детектор антинейтрино, 2 — подвижная платформа, 3 — медь, 4 — борированный полиэтилен, 5 — борированная резина, 6 — панели активной защиты вертикальные, 7 — панели активной защиты верхние.

стигнуть уровня достоверности больше 5 стандартных отклонений и ответить на вопрос о существовании стерильного нейтрино, если систематический эффект не подтвердится. Детальное описание нового эксперимента представлено в недавно опубликованной работе [3].

Одной из важнейших задач эксперимента является борьба с возможными систематическими ошибками. По этой причине особое внимание уделено магнитному экранированию ФЭУ, поэтому для проверки предположения о том, что эффект осцилляций связан с влиянием магнитного поля на коэффициент усиления ФЭУ, ставится задача защиты ФЭУ от влияния МПЗ. Кроме того, за счет увеличения статистической точности новой установки эффект будет проверен на новом уровне точности. Детектор является передвижным, что нужно для измерения зависимости потока антинейтрино от расстояния от центра реактора (рис. 1).

Магнитное поле в этом помещении определяется не только МПЗ, но также наличием стальных балок опорных конструкций и подъемно-транспортного оборудова-

ния. Поэтому магнитное поле является неоднородным и требуется экранирование каждого ФЭУ. Так, в [11], в разд. 10.2 указано, что магнитное поле влияет на ФЭУ Hamamatsu и их необходимо экранировать, причем для сглаживания краевых эффектов ФЭУ должен помещаться внутрь экрана таким образом, чтобы расстояние между краем ФЭУ и краем экрана было порядка одного радиуса фотокатода (рис. 12 в [11]). В работе [12] представлен магнитный экран для ФЭУ Hamamatsu R7081-100, который окружает весь фотокатод. Конструкция детектора Нейтрино-4М требует максимально плотной упаковки ФЭУ, но подсветка между секциями должна быть исключена, поэтому использовались диафрагмы на торцах световодов, находящихся в объеме с жидким сцинтиллятором, а также диафрагмы перед световодом ФЭУ. Оптимальная геометрия световодов, положения диафрагм и положения ФЭУ определялись компьютерным моделированием. Такая оптимизация требуется для получения наилучшего разрешения детектора [3]. В результате компромисса между подсветкой и светосбором

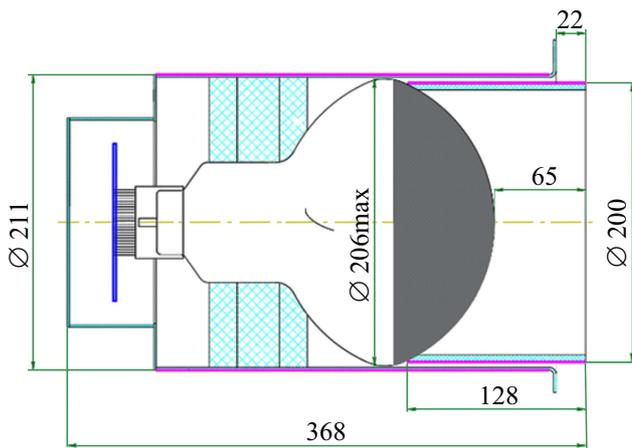


Рис. 2. Сборка ФЭУ с магнитным экраном.

определяется положение диафрагм и размер цилиндрического световода перед ФЭУ (рис. 2). В результате центральная точка цилиндрического полусферического фотокатода ФЭУ оказалась на расстоянии 40 мм от среза наружного магнитного экрана. При диаметре экрана 210 мм эффект экранирования магнитного поля на расстоянии 40 мм по оси еще недостаточно высок по сравнению с центром экрана. Как будет показано ниже, увеличение этого расстояния до 65 мм позволяет увеличить эффект экранирования в 2–3 раза. По этой причине внутренний световод, который проходит через общий корпус нейтринного детектора и упирается в стекло емкости со сцинтиллятором, был использован для продления зоны экранирования на 25 мм. Для этого он был покрыт снаружи лентой из аморфного сплава, а изнутри покрыт отражающей зеркальной фольгой.

Наружный цилиндр ( $\varnothing 211$  мм) из алюминия прикреплен к стенке (толщина 22 мм) многосекционного нейтринного детектора, где расположено 25 таких же сборок, и покрыт лентой из аморфного магнитомягкого сплава для экранирования ФЭУ. Внутренний цилиндр ( $\varnothing 200$  мм) является световодом (изнутри покрыт отражающей зеркальной фольгой), который упирается с одной стороны в ФЭУ, а с другой стороны — в стенку емкости из оргстекла (30 мм), общую для всех 25 квадратных световодов (рис. 1). Внутренний цилиндр ( $\varnothing 200$  мм) покрыт снаружи лентой из аморфного магнитомягкого сплава для увеличения зоны экранирования ФЭУ дополнительно на 25 мм.

Специалистами НИЦ „Курчатовский институт“–„ЦНИИ КМ „Прометей“ предлагается экранировать ФЭУ от геомагнитного поля с помощью рулонного магнитного материала МАР-1К, разработанного на основе аморфного сплава [13]. Для этого необходимо разработать экранирующие конструкции из материала МАР-1К и исследовать их магнитные характеристики, что являлось задачами настоящей работы. С целью обеспечения эффективного экранирования исследуется зависимость коэффициента экранирования (КЭ) от коли-

чества слоев рулонного магнитного материала МАР-1К. Следует отметить, что исследование КЭ разрабатываемых конструкций является многокомпонентной задачей, для решения которой применялись как расчетные, так и экспериментальные методы [14].

## 1. Материалы и методы исследования

Для изготовления рулонного материала МАР-1К использовались ленты шириной 30 мм и толщиной  $20 \mu\text{m}$  из аморфного магнитомягкого сплава системы Co-Fe-Ni-Cr-Mn-Si-B, термообработанные по специальной технологии, разработанной в НИЦ „Курчатовский институт“–„ЦНИИ КМ „Прометей“. Магнитные свойства сплава измерялись в соответствии с методикой, изложенной в ГОСТ 8.377-80, на тороидальных образцах с помощью магнитоизмерительной установки МК-3Э, позволяющей фиксировать основную кривую намагничивания и магнитную проницаемость. На рис. 3 представлена кривая намагничивания ( $B-H$  зависимость) для используемого нами сплава после термообработки. Начальная относительная магнитная проницаемость сплава составила 12 000, максимальная относительная магнитная проницаемость — 800 000. Измеренная кривая намагничивания использовалась для задания магнитных свойств материала экрана при проведении численного расчета КЭ.

Монтаж рулонного магнитного материала МАР-1К осуществлялся на цилиндрический защитный кожух (рис. 4) ФЭУ с внешним радиусом  $R = 106$  мм и длиной  $H = 265$  мм.

Измерения магнитной индукции проводились в естественном геомагнитном поле. Модуль вектора магнитной индукции внутри экранирующей конструкции измерялся с помощью трехкомпонентного феррозондового магнитометра МТ-4. Данный магнитометр использует дифференциальный метод измерения магнитной индукции, основанный на ее компенсации в объеме магнитного сердечника датчика. Погрешность измерения магнитной индукции по компонентам составляет 40 нТ, погрешность измерения модуля магнитной индукции — 50 нТ.

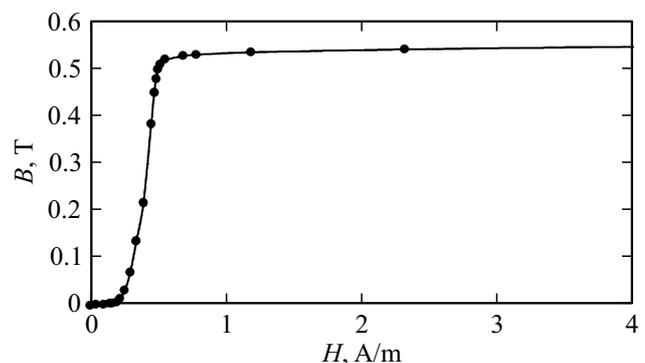
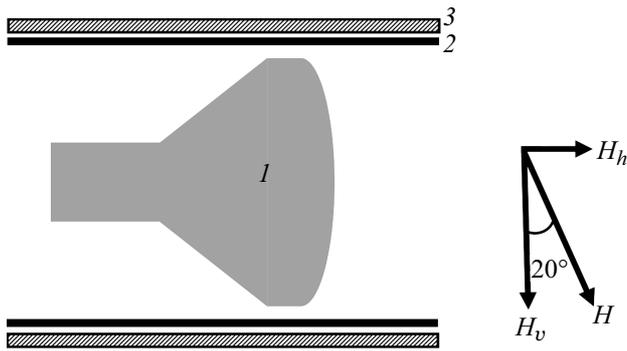


Рис. 3. Кривая намагничивания.



**Рис. 4.** Схема экранирующей конструкции для ФЭУ. 1 — ФЭУ, 2 — кожух, 3 — рулонный магнитный материал MAP-1K,  $H$  — МПЗ, где  $H_h$  — горизонтальная составляющая,  $H_v$  — вертикальная составляющая МПЗ.

Для нахождения КЭ (SC) проводились измерения модуля индукции магнитного поля в области измерения без экрана и внутри экрана ( $B_{\text{(without screen)}}$  и  $B_{\text{(inside the screen)}}$ ). КЭ рассчитывался по формуле:

$$SC = B_{\text{(without screen)}}/B_{\text{(inside the screen)}}.$$

КЭ определялся также расчетным методом, применение которого позволяет получить распределение магнитного поля во всем объеме экранирующей конструкции и проанализировать различные варианты расположения конструкции относительно МПЗ. Моделирование экранирования МПЗ проводилось методом конечных элементов [15,16] в программной среде COMSOL Multiphysics, включающей в себя модуль „Магнитные поля“. В программе решаются уравнения Максвелла для магнитного поля с использованием скалярного магнитного потенциала в качестве зависимой переменной. Нелинейные магнитные свойства материала, из которого изготовлен экран, задаются с помощью кривой намагничивания (рис. 3), полученной экспериментально на магнитоизмерительной установке МК-3Э. Магнитный экран, как тонкий слой высокопроницаемой среды, описывается граничным условием нормального разрыва плотности магнитного потока и тангенциального магнитного поля внутри слоя. В модели реализована возможность выбора количества слоев материала MAP-1K.

В расчете МПЗ направлено под углом  $20^\circ$  к вертикальной оси (рис. 4). Данный угол определялся исходя из географического местоположения лаборатории, где проводились исследования. Экранирующая конструкция располагалась в горизонтальной плоскости, при этом рассмотрено два случая ее расположения относительно МПЗ: ось конструкции направлена вдоль или поперек горизонтальной составляющей МПЗ. Расчет проводился для единичного экрана и сборки из 25 экранов, поскольку по проекту нейтринного детектора ФЭУ предполагаются в сборках из 25 экранирующих кожухов. При расположении экранов на расстоянии, сравнимом

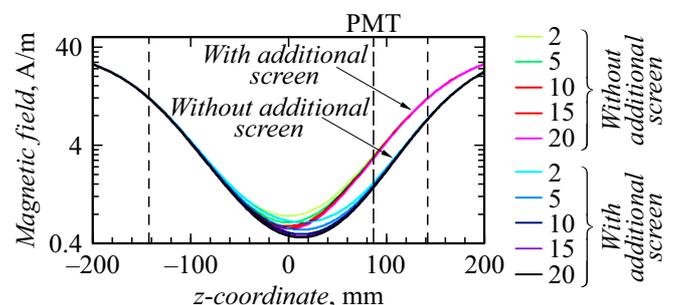
с их диаметром, они должны влиять на эффективность экранирования друг друга.

## 2. Результаты и их обсуждение

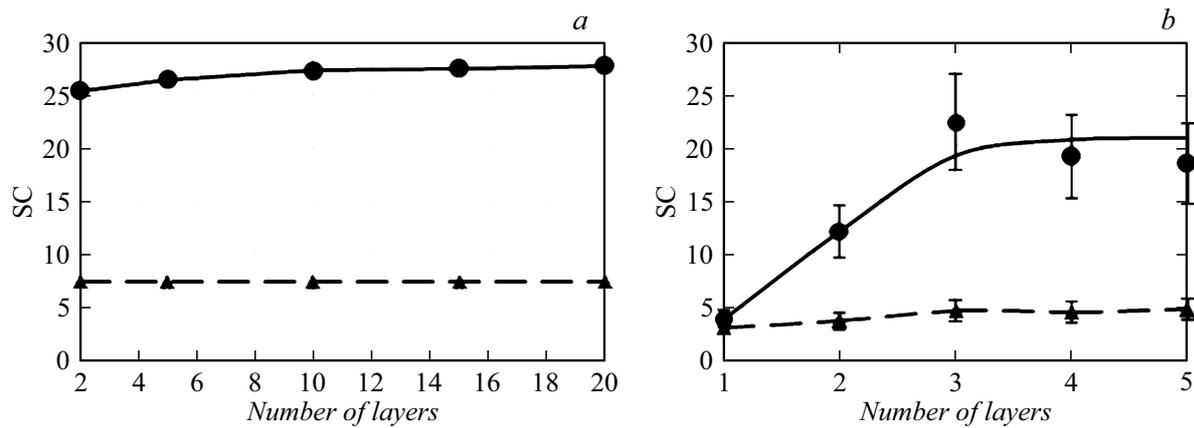
Для предложенной цилиндрической конструкции проведен расчет зависимости напряженности магнитного поля вдоль оси цилиндра для разного количества слоев экранирующего материала (рис. 5). Из результатов расчета следует, что при двух слоях материала MAP-1K напряженность магнитного поля в центре экрана составляет  $0.8 \text{ A/m}$ , а при двадцати слоях уменьшается до  $0.6 \text{ A/m}$ . Таким образом, при увеличении количества слоев от 2 до 20 напряженность магнитного поля уменьшается в центре экрана в 1.4 раза, в то время как на его краях она практически не меняется. По этой причине невозможно достичь увеличения КЭ на краю цилиндра (в месте расположения центральной точки фотокатода) за счет увеличения числа слоев экранирующего материала.

Магнитное поле вдоль оси цилиндра является менее опасным, так как электроны, летящие преимущественно по оси цилиндра, не отклоняются продольным магнитным полем. Поскольку чувствительность ФЭУ выше к компоненте МПЗ, направленной перпендикулярно оси ФЭУ, экранирование более значимо для случая, когда ось ФЭУ направлена поперек горизонтальной составляющей МПЗ.

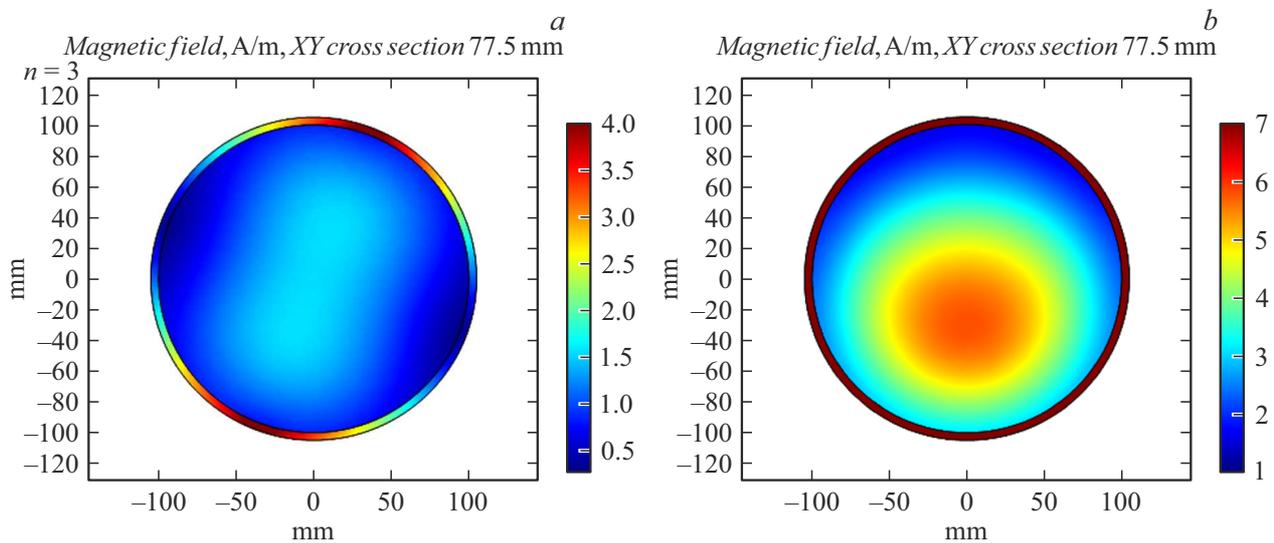
ФЭУ рекомендуется располагать на краю кожуха для обеспечения максимальной области приема фотонов, однако, согласно рис. 5, на торцах экрана магнитное поле экранируется значительно хуже, чем в центре конструкции. С целью увеличения эффективности экранирования предлагается использовать новый вариант конструкции с дополнительным экраном с уменьшенным внутренним радиусом  $R = 100 \text{ mm}$  и длиной  $H = 128 \text{ mm}$  (рис. 2). Уменьшенный диаметр дополнительного экрана позво-



**Рис. 5.** Распределение напряженности магнитного поля вдоль оси цилиндра для разного количества слоев материала MAP-1K (ось цилиндра направлена вдоль горизонтальной составляющей МПЗ). Координата  $Z = 0$  соответствует центру основного экрана. Две штриховые линии справа и слева обозначают торцы основного экрана. Вертикальный штрих с отметкой ФЭУ указывает положение центральной точки фотокатода.



**Рис. 6.** Расчетная (a) и экспериментальная (b) зависимости КЭ от количества слоев материала MAP-1K в контрольной точке (ось конструкции направлена вдоль (треугольник) и поперек (кружок) горизонтальной составляющей МПЗ).



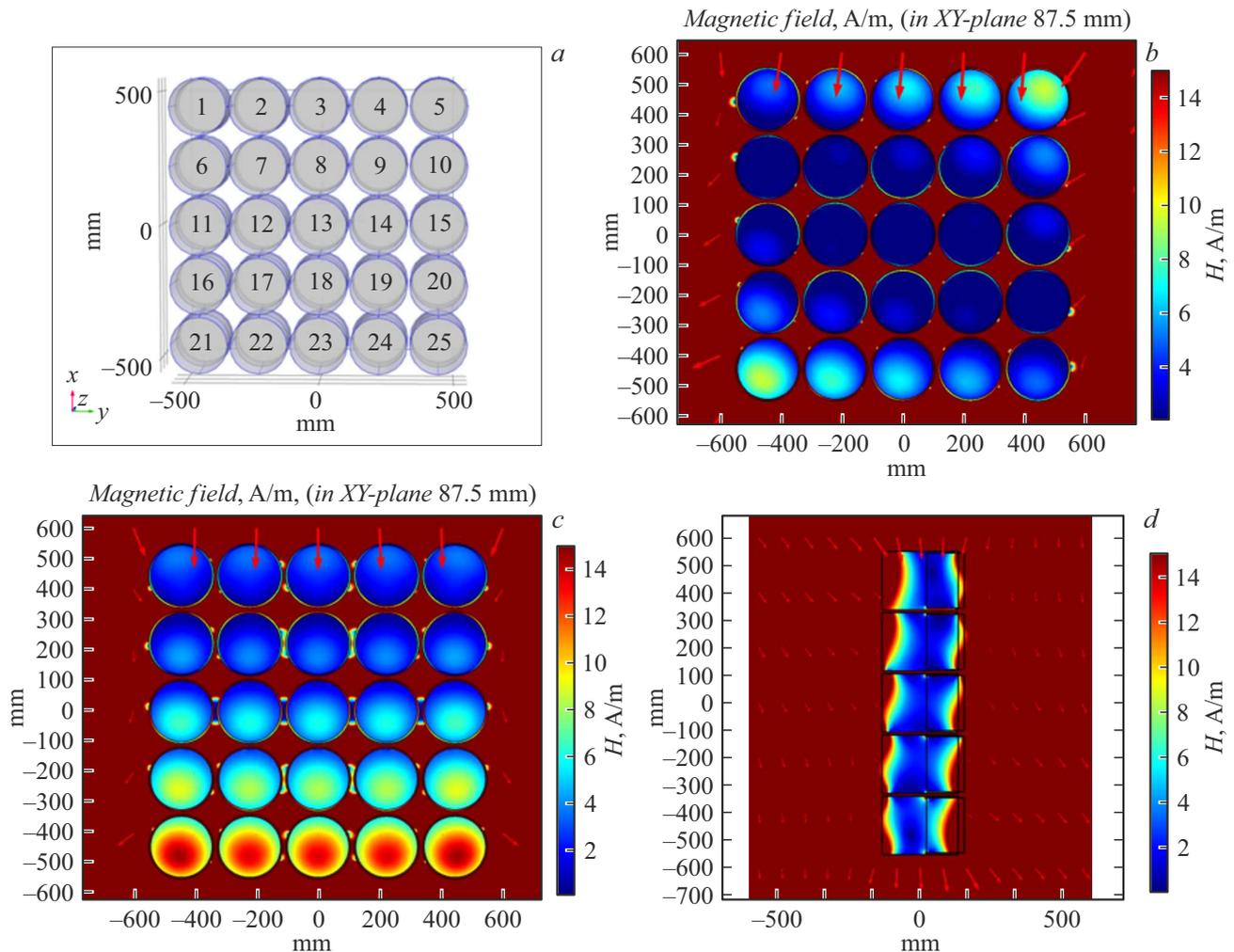
**Рис. 7.** Распределение напряженности магнитного поля  $H$  для трех слоев материала MAP-1K в плоскости на расстоянии 65 мм от края внутреннего цилиндрического экрана (ось конструкции направлена поперек (a) и вдоль (b) горизонтальной составляющей МПЗ).

лил продлить экран вплоть до стекла емкости с жидким сцинтиллятором. При этом центральная точка полусферического фотокаатода ФЭУ, которая имеет наиболее выгодное расположение по сравнению с другими его частями, расположенными ближе к центру экрана, находится на расстоянии 65 мм от края внутреннего цилиндра (обозначено пунктиром на рис. 5). Эта точка рассматривается как наиболее критичная, так как глубже к центру КЭ значительно увеличивается. Поэтому для дальнейших расчетов и измерений была выбрана контрольная точка — на оси цилиндра, на расстоянии 65 мм от края внутреннего экрана, в месте расположения центральной части полусферического фотокаатода.

Проведен расчет магнитного поля для новой конструкции с двойным экраном и построено распределение напряженности вдоль оси цилиндра для разного количе-

ства слоев материала MAP-1K (рис. 5). Установка дополнительного экрана позволила уменьшить магнитное поле в 2.2 раза в области размещения фотокаатода по сравнению с первым вариантом конструкции.

Расчет КЭ при расположении оси экранирующей конструкции в поперечном и продольном направлениях по отношению к горизонтальной составляющей МПЗ показал, что увеличение слоев материала MAP-1K с 5 до 10 приводит к увеличению КЭ на 0.5% для продольного направления и на 3% для поперечного (рис. 6, a). Поэтому использование количества слоев свыше пяти будет нецелесообразным с точки зрения затрат на материалы. На основании проведенных расчетов был сделан вывод, что два слоя материала MAP-1K на основном и дополнительном экранах обеспечивают достаточное экранирование при минимальных затратах.



**Рис. 8.** *a* — расположение и нумерация магнитных экранов в сборке; *b* — распределение напряженности магнитного поля в поперечном сечении, проходящем через контрольную точку (при расположении экрана поперек горизонтальной составляющей МПЗ); *c* и *d* — распределение напряженности магнитного поля в поперечном (*c*) и продольном (*d*) сечении, проходящем через контрольную точку (при расположении экрана вдоль горизонтальной составляющей МПЗ).

Для количества слоев материала МАР-1К от 1 до 5 КЭ был измерен экспериментально, результаты измерений представлены на рис. 6, *b*. Экспериментальные исследования показали, что, начиная с трех слоев материала МАР-1К, КЭ выходит на приблизительно постоянный уровень с учетом погрешности измерений и составляет  $5.5 \pm 0.5$  для продольного направления горизонтальной составляющей МПЗ и  $20 \pm 6$  — для поперечного. Следует отметить, что более важным является экранирование поперечного поля, а коэффициент экранирования 10 является уже достаточным.

Распределение напряженности магнитного поля ( $H$ ) в плоскости на расстоянии 65 мм от края внутреннего экрана для трех слоев материала МАР-1К при ориентации оси конструкции поперек и вдоль горизонтальной составляющей МПЗ показало, что при поперечном расположении напряженность внутри экрана имеет осевую симметрию относительно направления МПЗ (рис. 7, *a*).

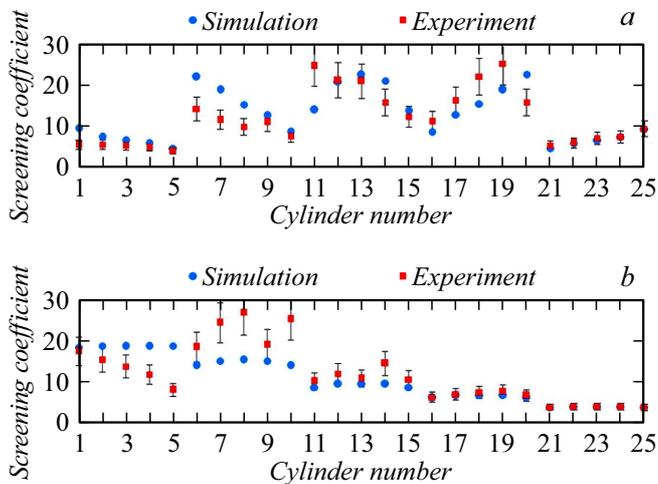
При параллельном расположении максимальная напряженность наблюдается внутри экрана в нижней его части, т.е. несимметрично относительно центра, что связано с ориентацией экранирующей конструкции относительно МПЗ (рис. 7, *b*). Однако следует еще раз напомнить, что продольное магнитное поле является менее опасным.

Исследования особенностей распределения напряженности магнитного поля в экране при поперечном и продольном расположении экрана относительно горизонтальной составляющей МПЗ показали, что более высокая эффективность экранирования обеспечивается при его поперечном расположении.

Распределение напряженности магнитного поля ( $H$ ) для сборки из 25 цилиндров, представленное на рис. 8, показало, что в случае ориентации сборки поперек горизонтальной составляющей МПЗ минимум магнитного поля наблюдается в центре сборки, а максимум —



**Рис. 9.** Макет сборки из 25 экранов для сцинтилляторного детектора спектров нейтрино НИЦ „Курчатовский институт“ – ПИЯФ.



**Рис. 10.** Сравнение результатов расчета КЭ в каждом экране сборки из 25 экранов для моделирования и эксперимента: ось конструкции ориентирована поперек (а), и вдоль (b) горизонтальной составляющей МПЗ.

на краях в экранах 5 и 21 (рис. 8, b). При ориентации сборки вдоль горизонтальной составляющей МПЗ взаимное влияние экранов друг на друга приводит к тому, что максимум напряженности находится в экранах 21–25, расположенных в нижней части сборки. Это обусловлено направлением магнитного поля и искажением силовых линий на границах сборки. На рис. 8, d цветом

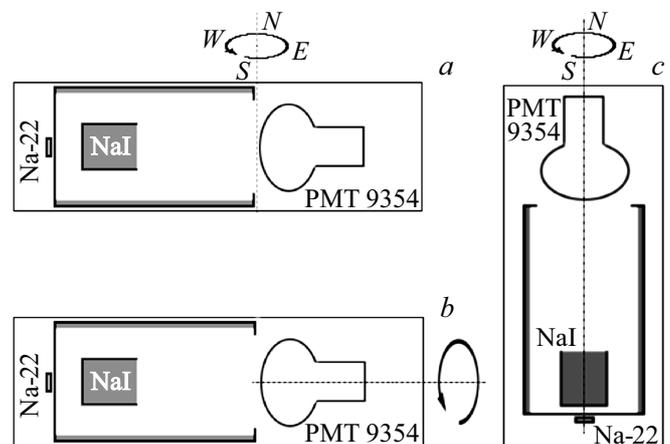
представлено распределение напряженности в боковом сечении в центре экранов 3, 8, 13, 18, 23, а стрелками показано направление силовых линий магнитного поля. На краях экранов, где силовые линии сгущаются, МПЗ проникает в цилиндрический экран на большее расстояние. Картина распределения магнитного поля у краев экрана получается также несимметричной, так как МПЗ направлено под углом 20° (рис. 8, c).

При сравнении рисунков 7, a и 8, b, 7, b и 8, c можно заметить, что характер распределения напряженности в единичном экране и в сборке схож. В случае ориентации сборки поперек горизонтальной составляющей МПЗ наименьшая эффективность экранирования наблюдается в боковых элементах по направлению поля. В случае ориентации вдоль горизонтальной составляющей МПЗ — в нижней части сборки. Однако даже в этом случае магнитное поле составляет допустимые значения 12 А/м, причем из-за продольной компоненты магнитного поля.

Для проведения экспериментальных исследований взаимного влияния близко расположенных друг к другу экранов был создан макет из 25 экранированных кожухов с тремя слоями магнитного материала МАР-1К (рис. 9). Для каждого экрана проведены измерения магнитной индукции.

На рис. 10 представлены результаты экспериментальных измерений КЭ и их сравнение с результатами моделирования. При ориентации оси конструкции поперек горизонтальной составляющей МПЗ КЭ уменьшается в углах сборки для 5 и 21 экранов. При ориентации оси конструкции вдоль горизонтальной составляющей МПЗ КЭ уменьшается на нижнем ряду сборки.

Исследования показали, что эффективность экранирования ФЭУ больше при расположении конструкции поперек горизонтальной составляющей МПЗ. Выявленные особенности взаимного влияния экранов в сборке хорошо согласуются с результатами компьютерного моделирования, что позволяет использовать данную модель для расчетов аналогичных конструкций.



**Рис. 11.** Схема сцинтилляционного детектора.

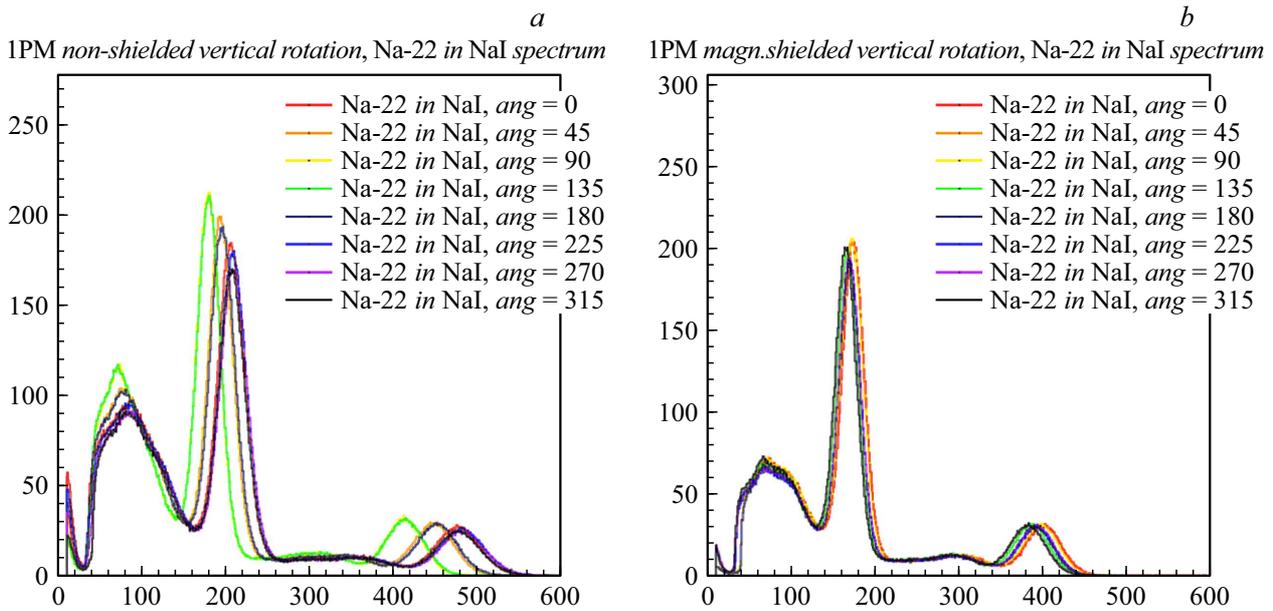


Рис. 12. Спектры Na-22 в детекторе при повороте неэкранированного (а) и экранированного (б) ФЭУ в вертикальном положении.

Для проверки работы магнитного экрана использован сцинтилляционный детектор амплитудным анализатором с ФЭУ ET-Enterprises 9354KB (система динодов с линейной фокусировкой) в вертикальном и горизонтальном положении, источник сцинтилляций — гамма-излучение изотопа Na-22 в кристалле NaI(Tl). Схемы установки представлены на рис. 11.

Для проверки зависимости отклика детектора от положения ФЭУ в МПЗ производилось вращение с интервалами  $45^\circ$  горизонтально расположенного детектора вокруг вертикальной оси (рис. 11, а), а также вращение ФЭУ вокруг оси в горизонтальном (рис. 11, б) и вертикальном (рис. 11, с) положении, в каждой позиции определялось положение энергетических пиков источника на шкале амплитуд и его относительное изменение в сравнении с выделенным направлением. Спектры источника в 8 позициях ФЭУ для случая вращения неэкранированного (рис. 12, а) и экранированного (рис. 12, б) расположенного вертикально ФЭУ вокруг оси представлены на рис. 12. Среднее относительное изменение положения энергетических пиков при вращении составило для неэкранированного и экранированного ФЭУ соответственно 15 и менее 1% в горизонтальном положении при вращении детектора вокруг вертикальной оси, 6 и менее 1% в горизонтальном положении при вращении ФЭУ вокруг собственной оси, 5 и менее 1% в вертикальном положении при вращении ФЭУ вокруг собственной оси.

## Заключение

Установлена зависимость КЭ единичного экрана от количества слоев материала MAP-1K. На основании расчетов и экспериментальных исследований сделан вывод

о том, что 3 слоя магнитного материала MAP-1K обеспечивают максимальный КЭ при минимальных затратах на конструкцию.

Проведено исследование магнитных характеристик единичного экрана и сборки из 25 экранов, сделанных из магнитного материала MAP-1K, расчетным и экспериментальными методами. По результатам исследований КЭ в сборке из 25 каркасов, экранированных трехслойным рулонным магнитным материалом MAP-1K, установлено, что в случае ориентации оси конструкции поперек горизонтальной составляющей МПЗ КЭ уменьшается в угловых экранах по направлению поля, в случае ориентации оси конструкции вдоль горизонтальной составляющей МПЗ — в нижнем ряду сборки. Эффективность экранирования ФЭУ максимальна при расположении оси конструкции поперек горизонтальной составляющей МПЗ. Однако в реальных условиях положение и ориентация ФЭУ определяется техническими особенностями сцинтилляционного детектора.

КЭ МПЗ, измеренный на расстоянии 65 mm от края малого экрана, для всех изготовленных экранов составляет не менее 4.5 (при ориентации оси экрана вдоль горизонтальной составляющей МПЗ) и не менее 10 (при ориентации оси экрана поперек горизонтальной составляющей МПЗ).

Проверена зависимость отклика детектора с ФЭУ, экранированным обсуждаемым экраном, от положения ФЭУ относительно МПЗ, относительное изменение отклика составляет менее 1%.

Таким образом, разработанная система экранирования обеспечивает необходимый уровень защиты ФЭУ нового сцинтилляционного детектора нейтрино и может быть рекомендована для применения в установках подобного типа.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] M.V. Kovalchuk, V.V. Voronin, S.V. Grigoriev, A.P. Serebrov. *Crystallography Reports*, **66** (2), 195 (2021). DOI: 10.1134/S1063774521020061
- [2] М.В. Ковальчук, С.Л. Смольский, К.А. Коноплев. *Кристаллография*, **66** (2), 184 (2021). DOI: 10.31857/S0023476121020053
- [3] А.П. Серебров, В.Г. Ивочкин, Р.М. Самойлов, А.К. Фомин, В.Г. Зиновьев, С.С. Волков, В.Л. Головцов, Н.В. Грузинский, П.В. Неустроев, В.В. Федоров, И.В. Паршин, А.А. Герасимов, М.Е. Зайцев, М.Е. Чайковский, А.М. Гагарский, А.Л. Петелин, А.Л. Ижухов, М.О. Громов, С.А. Сазонтов, А.А. Тузов, В.И. Рыкалин, Д.А. Макаренков, А.М. Немерюк, Т.Е. Кузьмина. *ЖТФ*, **93** (1), 175 (2023). DOI: 10.21883/JTF.2023.01.54079.241-22 [A.P. Serebrov, V.G. Ivochkin, R.M. Samoilov, A.K. Fomin, V.G. Zinoviev, S.S. Volkov, V.L. Golovtsov, N.V. Gruzinskii, P.V. Neustroev, V.V. Fedorov, I.V. Parshin, A.A. Gerasimov, M.E. Zaytsev, M.E. Chaikovskii, A.M. Gagarskiy, A.L. Petelin, A.L. Izhutov, M.O. Gromov, S.A. Sazontov, A.A. Tuzov, V.I. Ryikalina, D.A. Makarenkov, A.M. Nemeryuk, T.E. Kuzmina. *Tech. Phys.*, **93** (1), 166 (2023). DOI: 10.21883/TP.2023.01.55452.241-22]
- [4] G. Ranucci, D. Giugni, I. Manno, A. Preda, P. Ullucci, A. Golubchikov, O. Smirnov. *Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res.*, **337**, 211 (1993). DOI: 10.1016/0168-9002(93)91156-H
- [5] E. Calvo, M. Cerrada, C. Fernandez-Bedoya, I. Gil-Botella, C. Palomares, I. Rodriguez, F. Toral, A. Verdugo. *Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res.*, **621**, 222 (2010). DOI: 10.1016/j.nima.2010.06.009
- [6] M. Chen, B. Gao, J. Gao, H. He, C. Liu, H. Li, K. Li, L. Ren, S. Si, J. Wu, W. Wang, X. You. *Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res.*, **1039**, 167128 (2022). DOI: 10.1016/j.nima.2022.167128
- [7] O. Smirnov, D. Korablev, A. Sotnikov, A. Stahl, J. Steinmann, V. Khudyakov, I. Avetissov, M. Zykova. *JINST*, **18**, P04015 (2023). DOI: 10.1088/1748-0221/18/04/P04015
- [8] П.А. Кузнецов, С.А. Маннинен, О.В. Васильева. *Вопросы материаловедения*, **4** (68), 67 (2011).
- [9] Б.В. Фармаковский, П.А. Кузнецов. В сб.: *V Международ- ный симпозиум по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии ЭМС-2003, 16–19 сен- тября 2003 г.*, сб. науч. докл. (СПбГЭТУ „ЛЭТИ“, СПб, 2003), с. 92–94.
- [10] A.P. Serebrov, R.M. Samoilov, V.G. Ivochkin, A.K. Fomin, V.G. Zinoviev, P.V. Neustroev, V.L. Golovtsov, S.S. Volkov, A.V. Chernyj, O.M. Zhrebttsov, M.E. Chaikovskii, A.L. Petelin, A.L. Izhutov, A.A. Tuzov, S.A. Sazontov, M.O. Gromov, V.V. Afanasiev, M.E. Zaytsev, A.A. Gerasimov, V.V. Fedorov. *Phys. Rev. D*, **104**, 032003 (2021). DOI: 10.1103/PhysRevD.104.032003
- [11] Hamamatsu Photonics K.K. *Photomultiplier Tubes and Assemblies for Scintillation Counting & High Energy Physics*, TPMZ0003E01 APR. 2017 IP (2000) [https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99\\_SALES\\_LIBRARY/etd/High\\_energy\\_PMT\\_TPMZ0003E.pdf](https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/etd/High_energy_PMT_TPMZ0003E.pdf)
- [12] A.D. Avrorin, A.V. Avrorin, V.M. Aynutdinov, R. Bannash, I.A. Belolaptikov, D.Yu. Bogorodsky, V.B. Brudanin, N.M. Budnev, I.A. Danilchenko, G.V. Domogatsky, A.A. Doroshenko, A.N. Dyachok, Zh.-A.M. Dzhilkibaev, S.V. Fialkovsky, A.R. Gafarov, O.N. Gaponenko, K.V. Golubkov, T.I. Gress, Z. Honz, K.G. Kebkal, O.G. Kebkal, K.V. Konischev, A.V. Korobchenko, A.P. Koshechkin, F.K. Koshechkin, A.V. Kozhin, V.F. Kulepov, D.A. Kuleshov, V.I. Ljashuk, M.B. Milenin, R.A. Mirgazov, E.R. Osipova, A.I. Panfilov, L.V. Pan'kov, E.N. Pliskovsky, M.I. Rozanov, E.V. Rjabov, B.A. Shaybonov, A.A. Sheifler, M.D. Shelepov, A.V. Skurihin, A.A. Smagina, O.V. Suvorova, V.A. Tabolenko, B.A. Tarashansky, S.A. Yakovlev, A.V. Zagorodnikov, V.L. Zurbanov. *EPJ Web Conf.*, **116**, 01003 (2016). DOI: 10.1051/epjconf/201611601003
- [13] О.В. Васильева, А.С. Жуков, П.А. Кузнецов, А.К. Мазеева, С.А. Миннинен, Т.В. Песков, Б.В. Фармаковский. *Способ получения магнитного и электромагнитного экрана* (Пат. на изобретение RU2636269 С1, 21.11.2017. Заявка №2016144967 от 16.11.2016)
- [14] В.Е. Митрохин, А.В. Ряполов, А.Е. Известия Транссиба, **1** (17), 72 (2014).
- [15] С.А. Маннинен, П.А. Кузнецов. *Измерительная техника*, **8**, 52 (2016).
- [16] П.А. Кузнецов, С.А. Маннинен, А.А. Жумагалиева. *Измерительная техника*, **6**, 52 (2017).