

## АЛГОРИТМ КАЛИБРОВКИ И РЕКОНСТРУКЦИИ ДЛЯ СИСТЕМЫ FARICH ДЕТЕКТОРА НА СУПЕР ЧАРМ-ТАУ ФАБРИКЕ

А. Ю. Барняков<sup>1,2</sup>, В. С. Бобровников<sup>1</sup>, С. А. Кононов<sup>1</sup>,  
П. Д. Рогожин<sup>2</sup>, М. В. Чадеева<sup>3</sup>

*Для выполнения физической программы исследований на планируемом электрон-позитронном коллайдере Супер Чарм-Тау Фабрика необходима высокоточная система идентификации частиц, в качестве которой предлагается детектор черенковских колец FARICH на основе фокусирующего аэрогеля и матриц кремниевых фотоумножителей. В статье описан алгоритм реконструкции, разработанный для такого детектора. Алгоритм протестирован на модельных событиях с пионами при разном уровне шумов фотодетекторов. Показано, что для частоты темнового счета вплоть до  $10^5$  Гц/мм<sup>2</sup> погрешность измерения фактора  $\beta$  в диапазоне импульсов пионов от 0.6 до 1.5 ГэВ/с составляет менее  $5 \cdot 10^{-4}$  ( $1 \cdot 10^{-3}$ ) при направлении импульса частиц под углами  $0^\circ - 10^\circ$  ( $0^\circ - 45^\circ$ ) относительно нормали к плоскости фотодетекторов.*

**Ключевые слова:** детектор черенковских колец, кремниевый фотоумножитель.

1. *Введение.* Эксперименты на электрон-позитронных коллайдерах имеют своей целью прецизионную проверку Стандартной Модели и поиск новых явлений за ее пределами. В настоящее время научное сообщество рассматривает несколько вариантов  $e^+e^-$ -коллайдеров нового поколения: ILC в Японии [1], CEPC в Китае [2], CLIC и FCCee в ЦЕРНе [3, 4], а в России предложен проект  $e^+e^-$ -коллайдера сверхвысокой светимости

<sup>1</sup> ИЯФ СО РАН, 630090 Россия, Новосибирск, пр-т Лаврентьева, 11.

<sup>2</sup> НГТУ, 630073 Россия, Новосибирск, ул. Карла Маркса, 20.

<sup>3</sup> МФТИ, 141701 Россия, Московская обл., Долгопрудный, Институтский пер., 9.

<sup>4</sup> ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: chadeevamv@lebedev.ru.

( $\sim 10^{35} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ ) с энергией в системе центра масс от 3 до 7 ГэВ — Супер Чарм-Тау Фабрика (СЧТФ) [5]. Проектируемая детекторная система для экспериментов на коллайдере СЧТФ имеет стандартную цилиндрическую структуру с трековым детектором, системой идентификации частиц, электромагнитным калориметром и мюонным детектором. Для решения физических задач, в частности для изучения редких мод распада очарованных мезонов, поиска CP-нарушений и нарушения лептонного аромата в распадах тау-лептонов необходима система идентификации частиц, которая сможет обеспечить надежное разделение электронов, мюонов, пионов и каонов в диапазоне импульсов 0.5–1.5 ГэВ/с [6]. Например, для разделения мюонов и пионов на уровне трех стандартных отклонений точность измерения фактора  $\beta$  должна быть не хуже 0.005 (0.0006) для импульсов пионов 0.5 (1.5) ГэВ/с.

В статье представлен разработанный алгоритм поиска черенковского сигнала и оценки фактора  $\beta$  для системы идентификации на основе фокусирующего аэрогеля с регистрацией черенковского излучения матрицами кремниевых фотоумножителей (КФУ) [7]. Тесты на модельных событиях учитывали также возможный рост шумов, обусловленный радиационными повреждениями КФУ [8]. Предлагаемый метод позволяет обеспечить требуемую точность измерения величины  $\beta$  (на уровне лучше  $10^{-3}$ ) вплоть до уровня шумов фотодетекторов, ожидаемых после нескольких лет эксплуатации СЧТФ.

*2. Проект и модель детектора черенковских колец для СЧТФ.* Система идентификации частиц в детекторе на СЧТФ будет расположена между трековой камерой и электромагнитным калориметром. Черенковский детектор на основе фокусирующего аэрогеля (FARICH) позволяет повысить точность измерения скорости частиц за счет уменьшения ширины черенковских колец благодаря переменному показателю преломления аэрогеля [7]. В данной работе были использованы результаты моделирования подобной системы с площадью фотодетекторов  $830 \times 830 \text{ мм}^2$  без магнитного поля средствами пакета Geant4 [9].

В рассматриваемой модели прототипа FARICH радиатор состоит из четырех слоев аэрогеля толщиной 9.32 мм, 8.93 мм, 8.55 мм и 8.20 мм с показателями преломления 1.041, 1.044, 1.047 и 1.050 (в направлении к фотодетектору). На расстоянии 200 мм от радиатора и параллельно ему расположен слой фотодетекторов, собранный из 900 квадратных матриц кремниевых фотоумножителей с зазорами между матрицами 1 мм. Число КФУ в матрице составляет  $8 \times 8$ , площадь поверхности каждого КФУ –  $3.16 \times 3.16 \text{ мм}^2$ . В такой конфигурации общее число КФУ равно 56700, а доля чувствительной области (коэффициент заполнения) достигает 82%.

В моделировании источник одиночных заряженных пионов был расположен на расстоянии 1 мм от радиатора, а факторы  $\beta$  пионов были распределены равномерно в диапазоне 0.957–0.999. Углы вылета первичных частиц относительно нормали к плоскости фотодетекторов  $\theta_p$  варьировались в интервале  $0^\circ$ – $45^\circ$  с равномерным распределением по косинусу этого угла. Помимо моделирования ионизационных потерь и генерации черенковского излучения, методы пакета Geant4 для транспорта оптических фотонов позволяют учитывать оптические свойства материалов. В моделирование были также добавлены детекторные эффекты, а именно: временное разрешение электроники (200 пс), временной интервал считывания сигнала (20 нс) и эффективность КФУ (порядка 38% на максимуме длины волны черенковского излучения 400 нм).

Результатом моделирования события являются хиты – сигналы КФУ, зарегистрированные в бинарном режиме, т. е. без анализа амплитуды сигнала и количества фотонов, попавших одновременно в один пиксель. В этом режиме коррелированные шумы самих КФУ не влияют на количество и пространственное распределение хитов. Помимо случая идеальных фотодетекторов были проанализированы варианты добавления шумовых хитов КФУ вплоть до частоты темнового счета (DCR)  $10^6$  Гц/мм<sup>2</sup> (см. пример события на рис. 1). Для каждого хита сохранялась информация о времени его регистрации относительно момента генерации первичной частицы. В рассматриваемой конфигурации детектора с учетом временного разрешения разброс времен регистрации фотонов в одном событии составляет в среднем 1 нс.

*3. Метод реконструкции.* Основной задачей является определение фактора  $\beta$  частицы по проекции черенковского кольца на плоскость фотодетектора. На результат измерения влияет размытие кольца из-за толщины слоя аэрогеля, в котором происходит генерация черенковского излучения, размер отдельного КФУ, разброс черенковского угла из-за хроматической дисперсии показателя преломления аэрогеля, эллиптическая форма сечения черенковского конуса и разброс времен пролета фотонов за счет наклона траектории частицы относительно плоскости фотодетектора, а также искажение формы эллипса из-за преломления на границе радиатор-воздух, зависящее от угла вылета фотона. Процедура реконструкции включает несколько этапов.

Геометрические преобразования и корректировка времени пролета. В моделировании направление импульса первичной частицы задано в генераторе, а в реальном эксперименте импульс будет измерен в трековом детекторе. По направлению импульса первичной частицы определяют точку пересечения оси черенковского конуса с плоскостью фотодетектора ( $OXY$ ). Чем больше угол между направлением первичной частицы

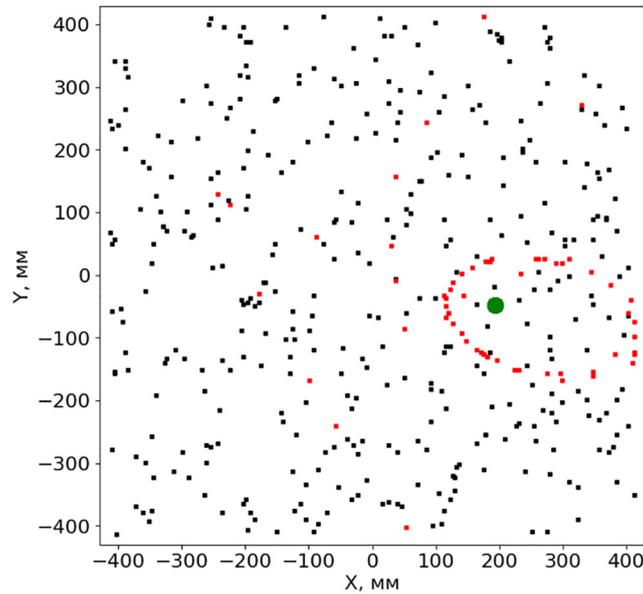


Рис. 1: Пример черенковского сигнала (красные квадраты) от пиона с параметрами  $\beta = 0.998$  и  $\theta_p = 45^\circ$ . Зеленый кружок обозначает пересечение оси черенковского конуса с плоскостью фотодетектора. Черные квадраты соответствуют шумовым хитам при  $DCR = 10^5$  Гц/мм<sup>2</sup>.

и нормалью к плоскости фотодетектора, тем больше искажение зарегистрированного черенковского кольца. Для уменьшения этих искажений нужно перейти в виртуальную плоскость, перпендикулярную оси черенковского конуса. При повороте происходит также корректировка относительных времен регистрации фотонов, которая для максимальных углов может достигать нескольких сотен пикосекунд. Условия моделирования задают максимальный ожидаемый размер кольца, что позволяет ограничить область поиска сигнального кластера размером  $400 \times 400$  мм<sup>2</sup> с центром в точке  $OXY$ . На рис. 2 показан пример расположения сигнальных хитов в координатной плоскости фотодетектора  $(x, y)$  до и после геометрических преобразований.

Поиск сигнального кластера. В координатах  $(r, \phi)$ , где  $r$  – расстояние от КФУ с хитом до точки  $OXY$ , а  $\phi$  – азимутальный угол в повернутой плоскости фотодетектора, сигнал имеет форму волны. Далее выполняется интегрирование по азимутальному углу и переход к координатам  $(r, t)$ , где  $t$  – время срабатывания пикселя. Учет времени хита позволяет улучшить качество реконструкции в условиях шума. Пример двумерной гистограммы с количеством хитов  $N(r, t)$  в одном событии показан на рис. 3. Следующий шаг алгоритма – поиск сигнального кластера, т. е. координат  $(r_0, t_0)$ , соответствующих

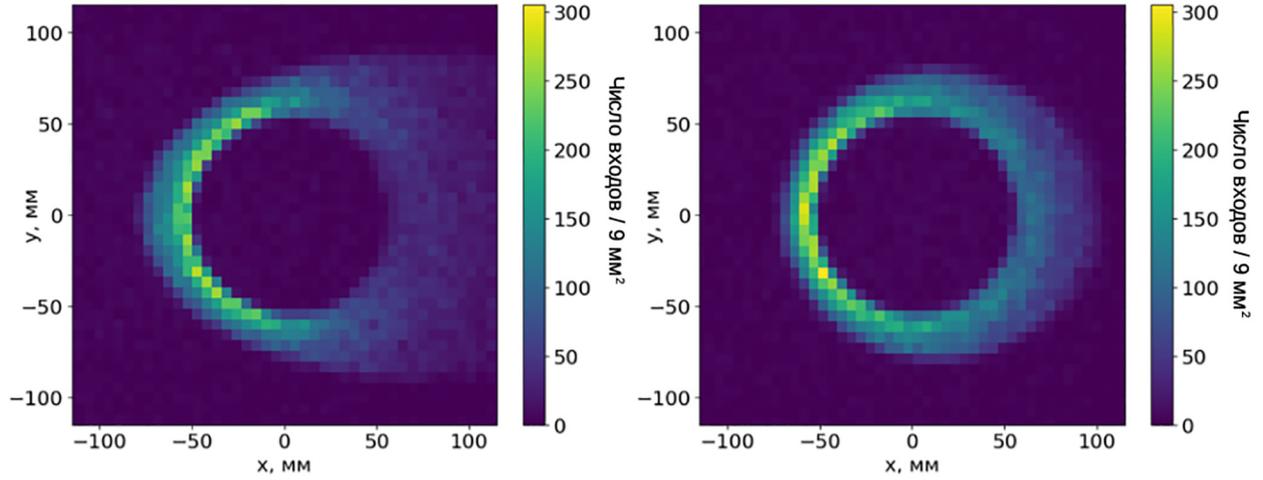


Рис. 2: Сигнал от черенковских фотонов до (слева) и после (справа) поворота виртуальной плоскости фотодетекторов относительно оси черенковского конуса ( $x = 0$  мм,  $y = 0$  мм) для пионов со скоростями  $0.990 \leq \beta \leq 0.999$ .

максимуму величины  $N(r, t)/r$ , поскольку число хитов в кольце примерно пропорционально его радиусу. В исследуемом диапазоне факторов  $\beta$  число сработавших пикселей в событии составляет от нескольких штук до нескольких десятков. Поиск максимума проводится методом сканирования с шагом  $\delta r$  и шириной скользящего окна  $\Delta r$  вдоль координаты  $r$  и с шагом  $\delta t$  и шириной скользящего окна  $\Delta t$  вдоль координаты  $t$ . Чтобы учесть искажения за счет наклона траектории частицы и преломлений на границе аэрогеля, реконструированный радиус  $R_{\text{reco}}$  вычисляют как взвешенное среднее в диапазоне  $\pm n$  шагов сканирования по  $r$  и  $\pm m$  шагов сканирования по  $t$  с помощью следующих выражений:

$$w_i = \frac{\sum_{j=-m}^m N(r_i, t_j)}{(2m + 1)}, \quad R_{\text{reco}} = \frac{\sum_{i=-n}^n w_i \cdot r_i}{\sum_{i=-n}^n w_i}, \quad (1)$$

где  $r_i = r_0 + i \cdot \delta r$  ( $-n \leq i \leq n$ ),  $t_j = t_0 + j \cdot \delta t$  ( $-m \leq j \leq m$ ).

Калибровка и оптимизация параметров. В общем случае реконструированный радиус отличается от идеального радиуса, соответствующего истинному фактору  $\beta_{\text{true}}$ . В данном алгоритме искомое значение  $\beta_{\text{reco}}$  получают из калибровочной зависимости  $\beta_{\text{true}}(R_{\text{reco}}, \theta_p)$ . Значения  $\beta_{\text{true}}$  доступны в моделировании на генераторном уровне и в экспериментах на тестовых пучках при испытаниях прототипов. На рис. 4 показан пример проекции калибровочной зависимости на плоскость  $(\beta_{\text{true}}, R_{\text{reco}})$ . Для аппроксимации зависимости  $\beta_{\text{true}}(R_{\text{reco}}, \theta_p)$  была использована модифицированная функция Гаусса

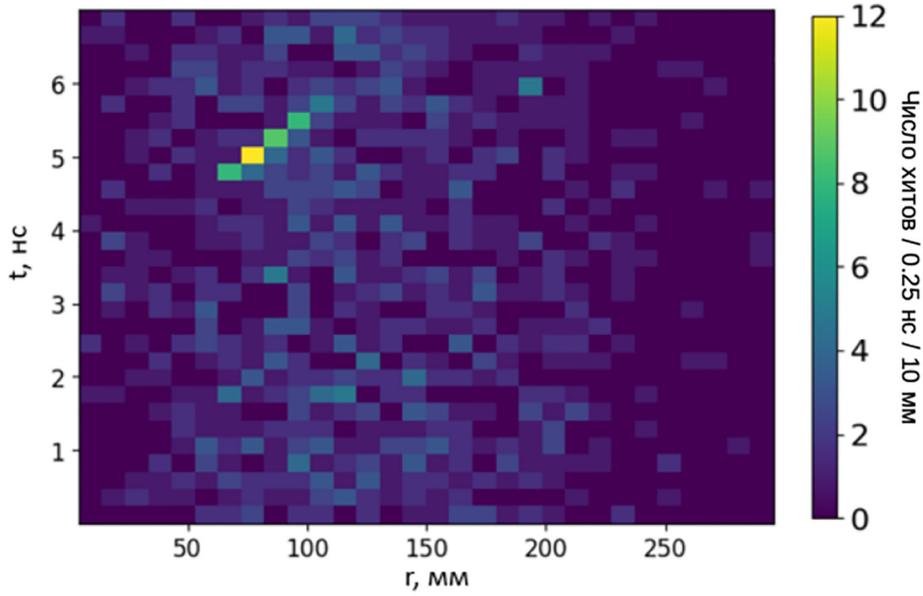


Рис. 3: Пример совместного распределения времен регистрации хитов ( $t$ ) и их расстояний ( $r$ ) до оси черенковского конуса для пиона с параметрами  $\beta_{\text{true}} = 0.998$ ,  $\theta_p = 45^\circ$  ( $DCR = 10^6$  Гц/мм<sup>2</sup>).

с логарифмическим преобразованием и параметризацией угловых зависимостей:

$$\ln \beta = \ln f_1(c) - \left( \frac{R_{\text{reco}} - f_2(c)}{f_3(c)} \right)^2, \quad f_i(c) = a_{0i} + a_{1i} \cdot c + a_{2i} \cdot c^2, \quad c = \cos \theta_p. \quad (2)$$

Аппроксимация небинированным методом максимального правдоподобия дает девять калибровочных коэффициентов  $a_{ki}$ , после чего значения  $\beta_{\text{reco}}$  вычисляются в каждом событии по известному углу  $\theta_p$  и реконструированному радиусу  $R_{\text{reco}}$  с помощью выражения (2). Оценкой точности реконструкции является ширина распределения разности  $\Delta\beta = RMS_{90}(\beta_{\text{reco}} - \beta_{\text{true}})$ , где для вычисления среднеквадратичного отклонения  $RMS_{90}$  используют 90% выборки вокруг среднего значения, чтобы исключить выбросы.

Параметры сканирования ( $\Delta r$ ,  $\delta r$ ,  $\Delta t$  и  $\delta t$ ) и усреднения ( $n$  и  $m$ ) были оптимизированы путем перебора значений и сравнения точности реконструкции  $\Delta\beta$  при разном уровне шумов на выборке из 200000 событий. Наилучшая точность получена при следующих значениях:  $\Delta r = 6$  мм,  $\delta r = 3$  мм,  $\Delta t = 0.25$  нс,  $\delta t = 0.25$  нс,  $n = 4$  и  $m = 4$ .

4. *Результаты.* Для оценки точности алгоритма методом перекрестной проверки полный набор из 1200000 моделированных событий был разделен на 10 равных частей, которые были использованы независимо для получения калибровочных коэффициентов при оптимальных значениях параметров (см. раздел 3). Каждый набор коэффициентов

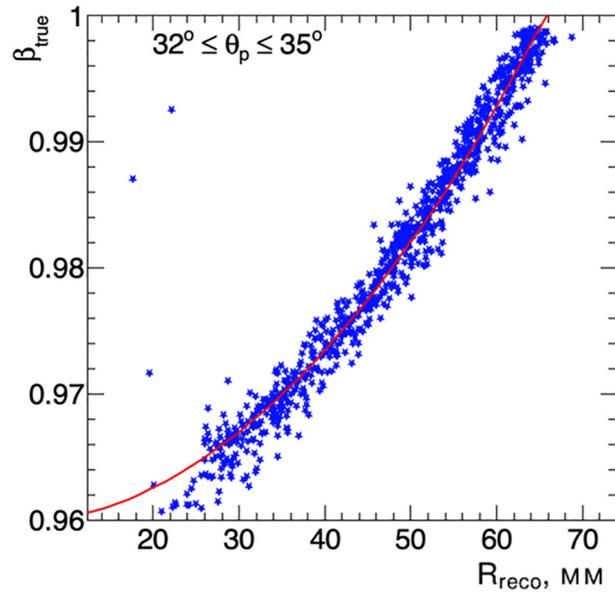


Рис. 4: Синие значки – проекция двумерной зависимости  $\beta_{\text{true}}(R_{\text{reco}}, \theta_p)$  для углов вылета первичной частицы  $32^\circ \leq \theta_p \leq 35^\circ$ ; красная кривая – аппроксимация функцией Гаусса.

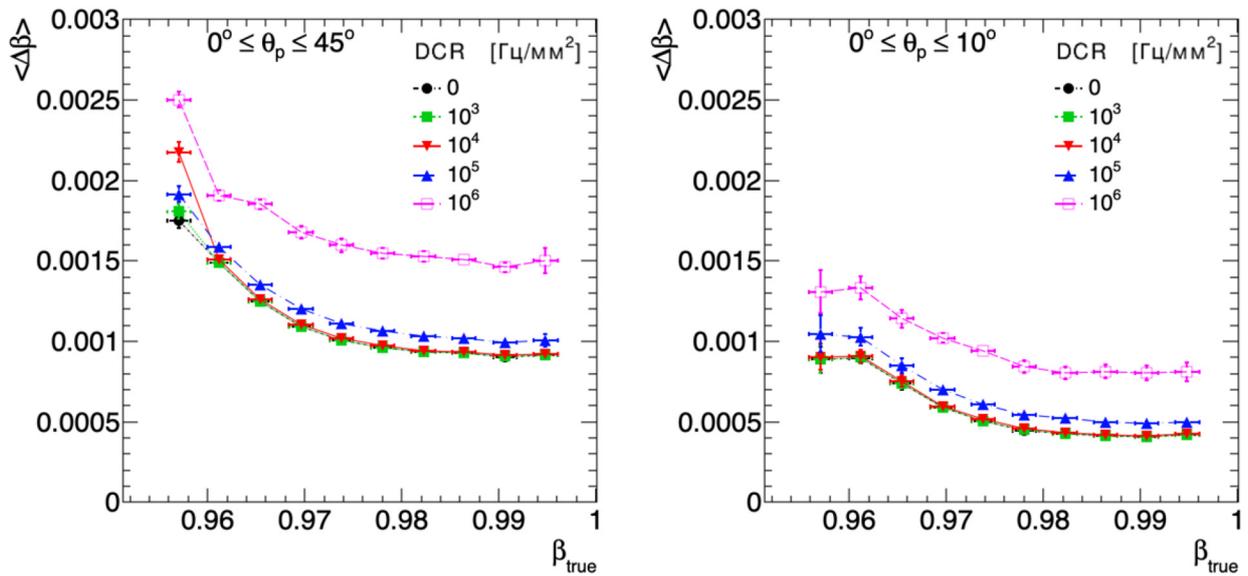


Рис. 5: Зависимость точности реконструкции фактора  $\beta$  от истинного значения  $\beta_{\text{true}}$  для разных уровней темнового счета фотодетекторов ( $DCR$ ) при углах вылета первичной частицы  $0^\circ - 45^\circ$  (слева) и  $0^\circ - 10^\circ$  (справа). Пояснения в тексте.

был применен к полной выборке для определения величин  $\Delta\beta_k$  ( $1 \leq k \leq 10$ ) в диапазонах значений  $\beta_{\text{true}}$ . В качестве итоговой оценки точности реконструкции в каждом диапазоне  $\beta_{\text{true}}$  было принято среднее значение  $\langle\Delta\beta\rangle = (\sum_{k=1}^{10} \Delta\beta_k)/10$ , а в качестве систематической погрешности – среднеквадратичное отклонение от этого среднего значения. Аналогичным образом была определена точность при добавлении шумов фотодетекторов. На рис. 5 слева представлена зависимость точности определения фактора  $\beta$  от истинного фактора  $\beta_{\text{true}}$  для пионов, испускаемых под углами от  $0^\circ$  до  $45^\circ$  относительно нормали к плоскости фотодетекторов, при различной частоте темнового счета. Усы ошибок показывают систематическую погрешность, которая получена методом перекрестной проверки и на порядок превышает статистическую погрешность. При дополнительных ограничениях на угол вылета пионов (до  $10^\circ$ ) и количество сигнальных хитов (не менее 5) погрешность измерения уменьшается в два раза (см. рис. 5 справа).

Качество работы алгоритма зависит от направления движения первичной частицы относительно плоскости фотодетектора, от истинного фактора  $\beta_{\text{true}}$  (определяющего размер черенковского кольца), а также от уровня шумов фотодетекторов. Для факторов  $\beta_{\text{true}} < 0.97$  точность алгоритма соответствует требованиям, предъявляемым к детектору FARICH, при всех исследованных уровнях шумов. Для диапазона  $0.97 \leq \beta_{\text{true}} \leq 0.999$  разработанный алгоритм обеспечивает точность реконструкции не хуже  $5 \cdot 10^{-4}$  ( $1 \cdot 10^{-3}$ ) при углах вылета до  $10^\circ$  ( $45^\circ$ ) и демонстрирует устойчивость вплоть до шумов  $10^5$  Гц/мм<sup>2</sup>. Увеличение погрешности до значений  $\sim 0.0016$  происходит при увеличении темнового счета до  $10^6$  Гц/мм<sup>2</sup>. Дополнительный вклад в систематическую погрешность можно ожидать для случая неполных черенковских колец, когда траектория первичной частицы близка к краю детектора. Один из возможных способов дальнейшего повышения точности – использование методов машинного обучения для реализации алгоритма реконструкции.

Пакет программ для создания цифровой модели детектора FARICH, использованной в данном исследовании, разработан в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 6 “Ядерная и радиационная физика”.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Н. Yamamoto, *Symmetry* **13**(4), 674 (2021). DOI: 10.3390/sym13040674.

- [2] J. Gao, Int. J. Mod. Phys. A **36**(22), 2142005 (2021). DOI: 10.1142/S0217751X21420057.
- [3] R. Franceschini, Int. J. Mod. Phys. A **35**(15), 2041015 (2020). DOI: 10.1142/S0217751X20410158.
- [4] A. Abada (on behalf of FCC Collaboration), Eur. Phys. J. C **79**(6), 474 (2019). DOI: 10.1140/epjc/s10052-019-6904-3.
- [5] A. E. Bondar (on behalf of Charm-Tau Factory Collaboration), Phys. Atom. Nucl. **76**, 1072 (2013). DOI: 10.1134/S1063778813090032.
- [6] M. N. Achasov (SCTF collaboration), Super Charm-Tau Factory: physics programme (2022). <https://sct.inp.nsk.su>.
- [7] A. Yu. Barnyakov, M. Yu. Barnyakov, V. S. Bobrovnikov, et al., Nucl. Instrum. Meth. A **1039**, 167044 (2022). DOI: 10.1016/j.nima.2022.167044.
- [8] M. Calvi, P. Carniti, C. Gotti, et al., Nucl. Instrum. Meth. A **922**, 243 (2019). DOI: 10.1016/j.nima.2019.01.013.
- [9] J. Allison (on behalf of Geant4 Collaboration), Nucl. Instrum. Meth. A **835**, 186 (2016). DOI: 10.1016/j.nima.2016.06.125.

Поступила в редакцию 30 июля 2023 г.

После доработки 18 октября 2023 г.

Принята к публикации 20 октября 2023 г.