

01

Программа реконструкции треков заряженных частиц в центральной части трековой системы SPD-эксперимента

© В.Ф. Андреев

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия
E-mail: andreevfv@lebedev.ru

Поступило в Редакцию 2 марта 2026 г.

В окончательной редакции 1 апреля 2026 г.

Принято к публикации 2 апреля 2026 г.

Приводится описание специального алгоритма реконструкции треков заряженных частиц в центральной части трековой системы сооружаемого SPD-эксперимента на коллайдере НИКА. Программа состоит из процедуры поиска трековых кандидатов в двумерном пространстве с последующим добавлением информации о продольной компоненте трека. Параметры треков оценивались с использованием фильтра Калмана, который учитывает энергетические потери и многократное рассеяние при прохождении заряженной частицы через вещество. Программа продемонстрировала высокую эффективность реконструкции треков и была добавлена в программное обеспечение SPD-эксперимента.

Ключевые слова: SPD-эксперимент, преобразование Хафа, реконструкция треков, фильтр Калмана, моделирование методом Монте-Карло.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.13.63144.20670

Основной целью сооружаемого на коллайдере НИКА в Дубне SPD-эксперимента (SPD — Spin Physics Detector) является изучение спин-зависимых структурных функций нуклонов и других спиновых эффектов в протон-протонных и дейтрон-дейтронных взаимодействиях с поляризованными и неполяризованными пучками частиц [1]. В настоящей работе предложен специальный алгоритм реконструкции треков заряженных частиц, использующий измерения только в центральной части трековой системы SPD-эксперимента, и приведены результаты его применения для реконструкции событий методом Монте-Карло (MC).

Трековая система SPD-эксперимента, подробно представленная в техническом описании детектора (TDR) [2], на первом этапе будет состоять из вершинного детектора, содержащего только один слой микроструктурного газового координатного детектора (MicroMegas), и основного трекового детектора, состоящего из тонкостенных дрейфовых газовых трубочек (straw tubes). Согласно последним предложениям, центральный трековый детектор будет разделен на шесть равных модулей, симметрично расположенных вокруг оси столкновения пучков, а число слоев с дрейфовыми трубочками в модуле будет равно 70. Часть дрейфовых трубочек расположена параллельно оси Z , направленной вдоль оси столкновения пучков частиц, а другая часть — под небольшим углом в 2° к оси Z . Внутренний радиус центральной части трекового детектора равен 27 см, внешний радиус 86.7 см, а общая длина детектора вдоль оси Z составляет 236 см. Система декартовых координат, используемая в SPD-эксперименте, является стандартной для большинства экспериментов в физике высоких энергий: ось Z совпадает с направлением сталкивающихся пучков частиц, ось Y вертикальна, ось X перпендикулярна осям

Z и Y и направлена к центру кольца коллайдера, а центр установки считается началом системы координат. Магнитное поле в SPD-эксперименте будет соленоидальным с величиной, достигающей 1.2 Т, а неоднородность поля в центральном трековом детекторе не превышает нескольких процентов.

В общем виде программа реконструкции треков состоит из двух последовательных частей: вначале ведется поиск в вершинном и трековом детекторах измерений, которые могут принадлежать к определенному трековому кандидату, а на втором шаге определяются параметры найденных трековых кандидатов с использованием процедуры аппроксимации. Так как на первом этапе работы SPD-эксперимента вершинный детектор будет состоять только из одного слоя, использование стандартной процедуры реконструкции треков [3,4], при которой сначала создаются трековые сегменты из измерений в вершинном детекторе, а затем уже добавляются измерения из центрального трекового детектора, становится невозможным. Поэтому для реконструкции треков была предложена последовательная процедура, при которой треки реконструируются с использованием измерений только в центральной части трекового детектора (рис. 1).

Согласно предложенной на рис. 1 схеме, процедура реконструкции треков начинается с нахождения измерений, принадлежащих трековому кандидату, в двумерном XY -пространстве. В качестве измерения, или MC-хита, на этом этапе рассматривается положение центральной проволочки (x , y -координаты) сработавшей дрейфовой трубочки, которая параллельна оси Z . При этом воспользуемся тем, что в постоянном магнитном поле траектория заряженной частицы в поперечной XY -плоскости представляет собой окружность радиусом $R \propto P_T/B_z$,

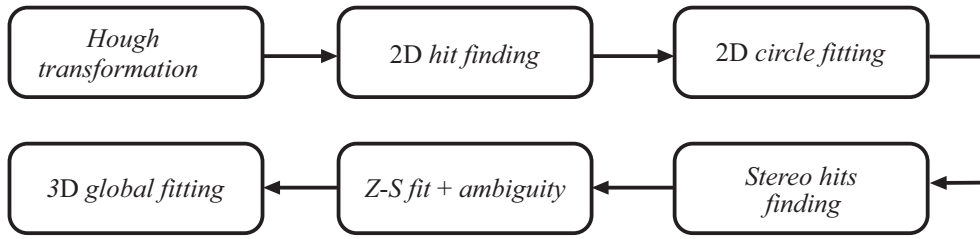


Рис. 1. Общая схема алгоритма реконструкции треков заряженных частиц в центральной части трекового детектора SPD-эксперимента.

где P_T — поперечный импульс частицы, B_z — компонента магнитного поля вдоль оси Z . Тогда для измерений (x_i, y_i) , лежащих на проходящей через начало координат окружности, верно следующее выражение:

$$r_i = 2R \sin(\varphi_i - \varphi), \quad (1)$$

где $r_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2}$ — величина радиус-вектора, соединяющего начало координат с точкой (x_i, y_i) на окружности, R — радиус окружности, φ — угол вылета частицы (угол касательной к окружности) в начале координат, $\varphi_i = \arctg(y_i/x_i)$ — угол радиус-вектора $\mathbf{r}_i$ относительно оси X . Выражение (1) также может быть записано как

$$d = \frac{1}{2R} = \frac{\sin(\varphi_i - \varphi)}{r_i}, \quad (2)$$

что представляет собой преобразование Хафа [5], для описания лежащих на окружности точек (x_i, y_i) в пространстве d – φ -параметров. При данном преобразовании Хафа [5] каждому измерению (x_i, y_i) или (r_i, φ_i) соответствует синусоидальная линия в пространстве d – φ -параметров. Таким образом, набор измерений (x_i, y_i) , лежащих на окружности, преобразуется в набор синусоидальных линий в пространстве d – φ -параметров, пересекающихся в точке, соответствующей параметрам рассматриваемой окружности. Для треков с относительно большим радиусом, т.е. в приближении малой разницы углов $(\varphi_i - \varphi)$, выражение (2) преобразуется к виду

$$d \approx \frac{\varphi_i - \varphi}{r_i}, \quad (3)$$

представляющему собой уравнение прямой линии в пространстве d – φ -параметров. Для нахождения пересечения синусоидальных или прямых линий в пространстве d – φ -параметров было использовано дискретное двумерное распределение, при котором каждое измерение (x_i, y_i) вносит вклад в определенную последовательность бинов в двумерной гистограмме. Пример таких двумерных гистограмм для выражений (2) и (3) приведен на рис. 2.

Задача нахождения МС-хитов, принадлежащих трековому кандидату, сводится к нахождению бинов с максимальным числом входов на двумерной гистограмме. Данная процедура применяется последовательно и состоит из следующих шагов:

- находится бин с максимальным числом входов;
 - все измерения, входящие в данный бин, приписываются определенному трековому кандидату и удаляются из дальнейшего рассмотрения;
 - находится следующий бин с максимальным числом входов;
 - процедура продолжается до тех пор, пока число входов в бин превышает некоторое пороговое значение;
 - на последнем шаге МС-хиты, принадлежащие трековому кандидату, аппроксимируются окружностью.
- Для повышения эффективности нахождения МС-хитов описанная выше процедура была модифицирована следующим образом:
- вначале рассматривались хиты только с первых 52-х слоев трекового детектора;
 - далее найденные хиты аппроксимировались окружностью;
 - затем окружность экстраполировалась к внешним слоям трекового детектора, и если МС-хиты находились на некотором минимальном расстоянии от окружности, то они добавлялись к трековому кандидату.

Величину бина двумерной гистограммы оптимизировали таким образом, чтобы получить максимальную эффективность нахождения трековых кандидатов. Оба рассмотренных варианта преобразования Хафа [5] (выражения (2) и (3)) были исследованы и показали сопоставимые результаты в эффективности нахождения треков.

Следующим этапом программы реконструкции является процедура добавления информации о продольной компоненте трека, или нахождение стереохитов, принадлежащих трековому кандидату. Стереохитами будем называть измерения в дрейфовых трубочках, расположенных под небольшим углом к оси Z , а в качестве измерения будем рассматривать не только x - и y -координаты сработавшей трубочки, но и радиус дрейфа, проекция которого на XY -плоскость представляет собой эллипс. Далее воспользуемся тем, что в постоянном магнитном поле траекторию заряженной частицы можно представить в виде прямой линии $z(S) = \text{ctg}\vartheta \cdot S + z_0$ в пространстве S – z -переменных. Здесь ϑ — полярный угол вылета частицы или угол относительно оси Z ; S — длина дуги окружности в XY -плоскости; z_0 — координата рождения трека.

На рис. 3,а (XY -плоскость, $z = 0$) показано пересечение трека (x_i) с одной из плоскостей, содержа-

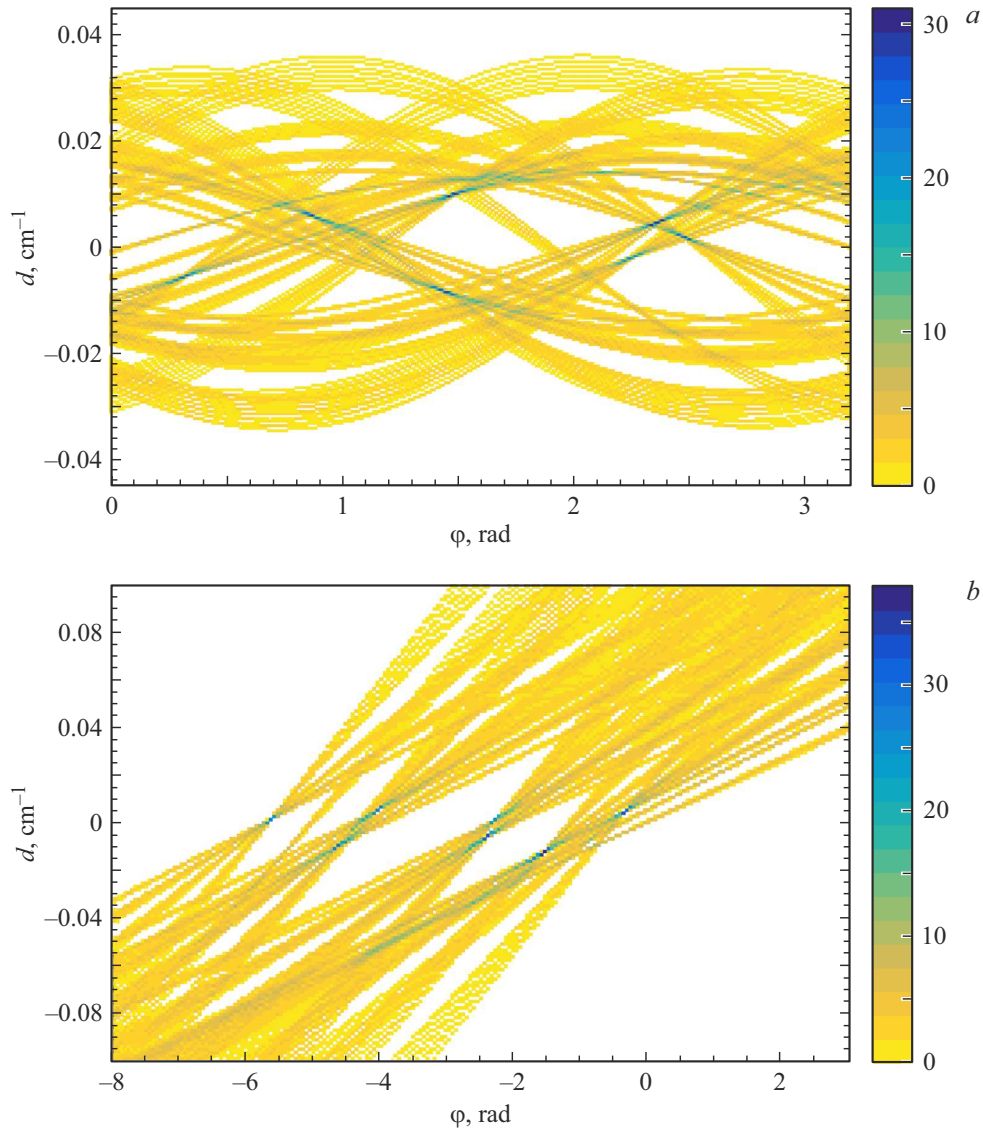


Рис. 2. Двумерные гистограммы в пространстве d – ϕ -параметров, полученные с использованием выражения (2) (а) и выражения (3) (b).

ших стереотрубочки. Длина дуги окружности S равна $S = R \cdot \Delta\phi$, где R — радиус окружности трекового кандидата, $\Delta\phi$ — азимутальный угол между векторами $\mathbf{r}_0$ и $\mathbf{r}_i$. При этом вектор $\mathbf{r}_0$ направлен от центра окружности (x_0, y_0) в начало координат, а вектор $\mathbf{r}_i$ соединяет центр окружности (x_0, y_0) и точку пересечения (x_i) . Для определения z -координаты МС-хита использовалось выражение $z = D / \tan \alpha$, где D — расстояние, на которое необходимо сместить эллипс вдоль оси X до касания трека (рис. 3, а), α — угол наклона стереотрубочки относительно оси Z . Это можно пояснить следующим образом: если XY -плоскость перемещать вдоль оси Z по направлению к МС-хиту, то радиус дрейфа (эллипс) и трек будут сближаться друг с другом, и при z -координате, равной положению МС-хита, эллипс коснется трека. Поскольку траектория заряженной частицы может находиться как слева, так и справа от цен-

тральной проволочки дрейфовой трубочки (лево-правая неопределенность), рассмотренная процедура приводит к двум возможным положениям эллипса x_1 и x_2 на оси X и, следовательно, к двум значениям z_1 и z_2 координаты МС-хита. На рис. 3, b представлена совокупность точек в пространстве S – z -переменных, полученная при использовании данной процедуры, при которой каждому значению длины дуги окружности S соответствуют два возможных значения z -координаты МС-хита.

Для разрешения лево-правой неопределенности z -координаты была использована процедура рекурсивного фита [6]:

- все точки в S – z пространстве аппроксимируются прямой линией $z(S) = kS + z_0$;
- затем удаляется точка с максимальным отклонением от полученной прямой;

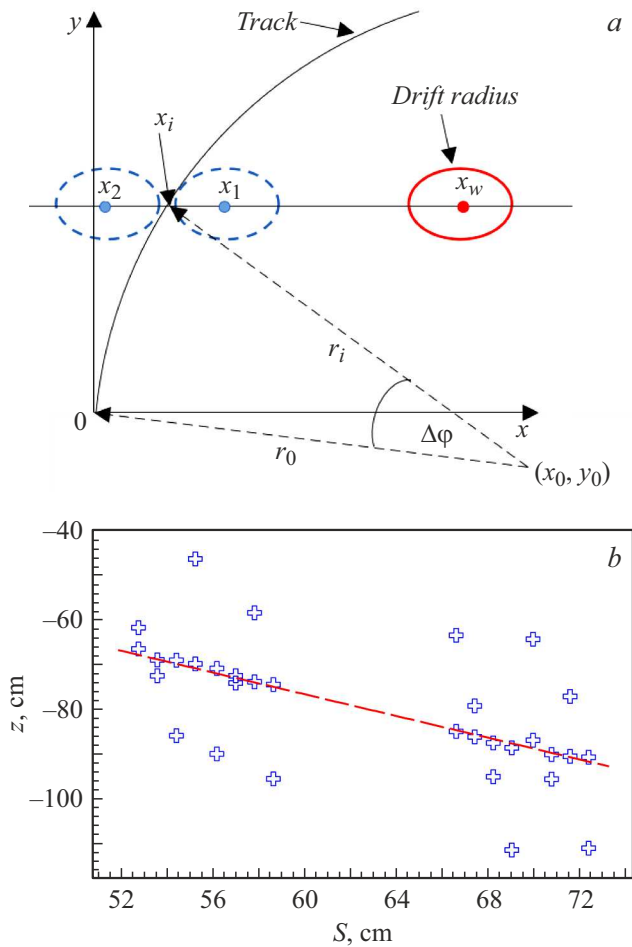


Рис. 3. *a* — положение сработавшей стереотрубки (x_w) и радиус дрейфа (сплошная окружность), два возможных положения эллипса x_1 и x_2 при касании трека (штриховые окружности). *b* — совокупность точек в S – z -пространстве, полученных при использовании процедуры определения z -координаты.

— проводится следующая аппроксимация прямой линией, и данная процедура повторяется до тех пор, пока для каждого значения S (или стереохита) не останется только одно значение z -координаты.

В результате описанной выше процедуры реконструкции получаем набор трековых кандидатов, для которых известны последовательность МС-хитов, принадлежащих трековому кандидату, первоначальная оценка параметров заряженной частицы и положения первой точки трека.

Завершающим этапом программы реконструкции треков является процедура определения параметров трековых кандидатов. Для этой цели во многих экспериментах в физике высоких энергий применяется фильтр Калмана [7], который также включен в пакет SPDroot [8] — программное обеспечение для моделирования отклика различных детекторов в SPD-эксперименте.

Для оценки работы программы реконструкции используются различные характеристики, среди которых эффективность реконструкции треков и величина ложно реконструированных треков (fake track) обычно рассматриваются как основные критерии работы программы. Для определения данных характеристик было смоделировано 10 000 протон-протонных взаимодействий (Minimum Bias), включающих дифракционные и неупругие взаимодействия, при энергии сталкивающихся протонов $\sqrt{s} = 10$ GeV. События Minimum Bias генерировались с использованием настроек программы PYTHIA8 [9], рекомендованных для данного класса событий, а отклик в трековых детекторах моделировался с применением пакета SPDroot [8]. Пространственное разрешение вершинного и трекового детекторов, равное $\sim 150 \mu\text{m}$, учитывалось при моделировании, при этом вершина взаимодействия находилась в начале координат. Дополнительно был сформирован специальный набор МС-треков, для которых известны все хиты, принадлежащие треку, а параметры треков определялись с использованием фильтра Калмана [7]. МС-треки также должны содержать не менее девяти хитов в центральной части трековой системы, полярный угол трека должен находиться в диапазоне $0.3 < \vartheta < 2.84$, а поперечный импульс трека P_T должен превышать $0.05 \text{ GeV}/c$. Данные критерии позволяют отбирать МС-треки, измеримые в центральной трековой системе SPD-эксперимента, при этом для анализа использовались события, содержащие один и более отобранных МС-треков. Таким образом, данный набор МС-треков представляет собой „идеальные“ характеристики программы реконструкции и использован как контрольный набор для исследования свойств программы. Общее число отобранных МС-треков составило $\sim 43\,000$, в их состав входили как треки, образованные в первичной вершине взаимодействия, так и вторичные треки, образованные от распадов короткоживущих частиц. Средняя множественность МС-треков в событии составила $\langle N^{\text{MC}} \rangle = 5.00 \pm 0.02$, а множественность реконструированных треков при данных критериях отбора была равна $\langle N^{\text{RC}} \rangle = 4.93 \pm 0.03$.

Эффективность реконструкции треков определялась как отношение $\varepsilon = N_F / N_{\text{tot}}$, где N_{tot} — полное число отобранных МС-треков, N_F — число МС-треков, имеющих не менее 50 % общих хитов с одним из реконструированных треков. Количество ложно реконструированных треков было определено аналогичным образом: $\varepsilon^{\text{fake}} = 1 - N_F^{\text{RC}} / N_{\text{tot}}^{\text{RC}}$, где $N_{\text{tot}}^{\text{RC}}$ — полное число реконструированных треков, а N_F^{RC} — число реконструированных треков, имеющих не менее 50 % общих хитов с одним из МС-треков. Условие в 50 % общих хитов определяет максимальную оценку эффективности программы реконструкции и может варьироваться при исследовании различных классов физических событий. Эффективность реконструкции и величина ложно реконструированных треков в зависимости от поперечного импульса P_T треков приведены на рис. 4. Верхние и нижние границы ошибок на распределениях оценены исходя

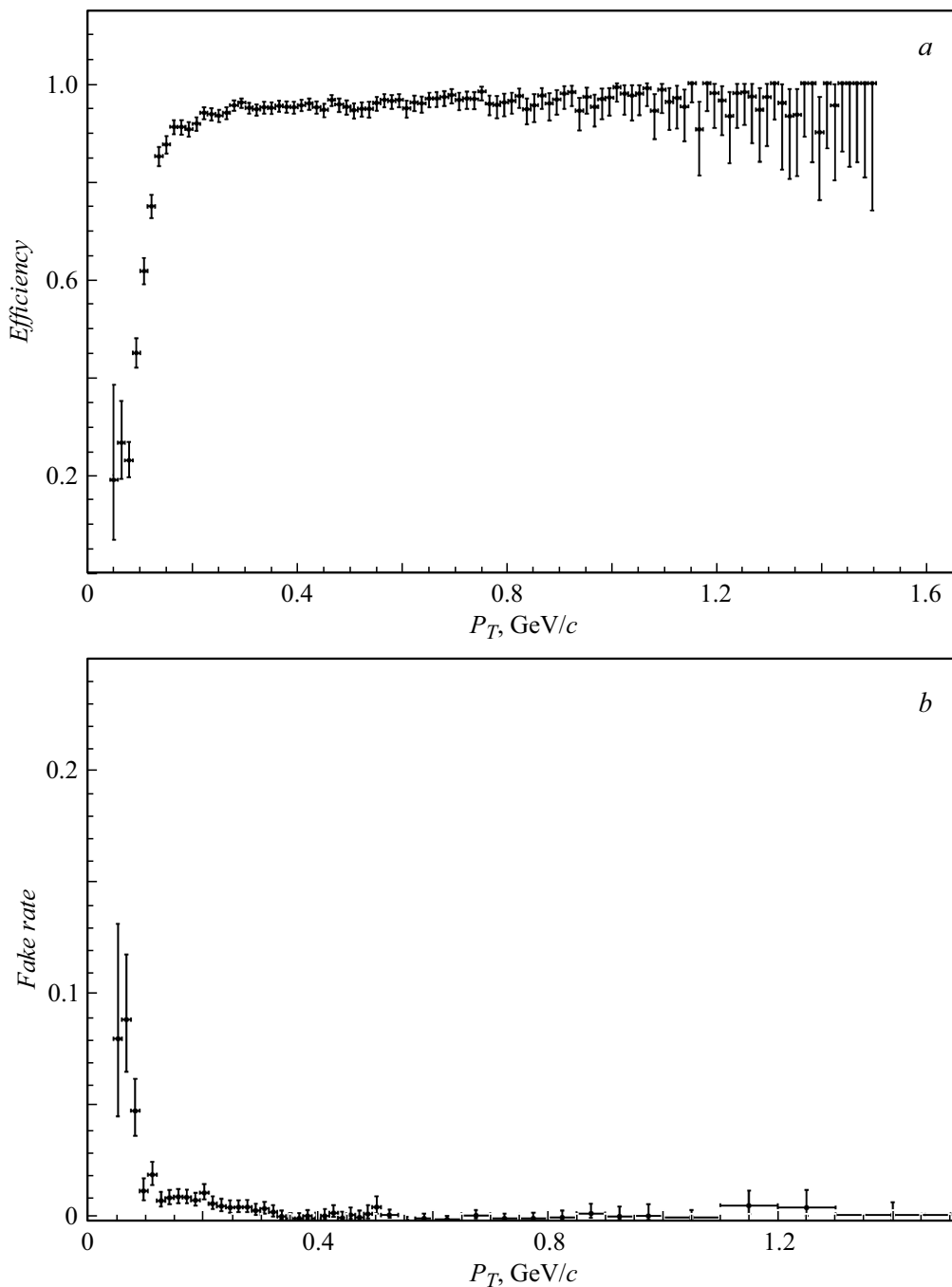


Рис. 4. Эффективность реконструкции (а) и количество ложно реконструированных треков (b) в зависимости от поперечного импульса P_T трека.

из биномиального распределения событий с использованием метода Клоппера–Пирсона в пакете программ ROOT [10] и доверительного интервала $CL = 0.6827$.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что разработанная программа реконструкции демонстрирует высокую эффективность реконструкции треков, достигающую $\sim 95\%$ для треков с поперечным импульсом $P_T > 200$ MeV/c, при этом вклад ложно реконструированных треков составляет менее 5% для

реконструированных треков с $P_T > 100$ MeV/c. Использование данной программы не только расширяет возможности изучения физических событий на первом этапе работы SPD-эксперимента, но и позволяет проводить оптимизацию геометрии центральной трековой системы.

Конфликт интересов

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A. Arbuzov, A. Bacchetta, M. Butenschoen, F.G. Celiberto, U. D'Alesio, M. Deka, I. Denisenko, M.G. Echevarria, A. Efremov, N.Ya. Ivanov, A. Guskov, A. Karpishkov, Ya. Klopov, B.A. Kniehl, A. Kotzinian, S. Kumano, J.P. Lansberg, K.-F. Liu, F. Murgia, M. Nefedov, B. Parsamyan, C. Pisano, M. Radici, A. Rymbekova, V. Saleev, A. Shipilova, Q.-T. Song, O. Teryaev, *Prog. Part. Nucl. Phys.*, **119**, 103858 (2021). DOI: 10.1016/j.pnpnp.2021.103858
- [2] V. Abazov, V. Abramov, L. Afanasyev, R. Akhunzyanov et al. (SPD Collaboration), *Nat. Sci. Rev.*, **1**, 1 (2024). DOI: 10.54546/NaturalSciRev.100101
- [3] В.Ф. Андреев, Кр. сообщения по физике ФИАН, **11**, 31 (2022). [V.F. Andreev, *Bull. Lebedev Phys. Inst.*, **49**, 379 (2022)]. DOI: 10.3103/S1068335620120118].
- [4] S. Chatrchyan, V. Khachatryan, A.M. Sirunyan, A. Tumasyan et al. (CMS Collaboration), *JINST*, **9** (10), P10009 (2014). DOI: 10.1088/1748-0221/9/10/P10009
- [5] P. Azzi, D. Barney, T. Bergauer, P. Bloch et al. (CMS Collaboration), *The phase-2 upgrade of the CMS tracker*, technical design report (CERN, 2017), CERN-LHCC-2017-009; CMS-TDR-014. DOI: 10.17181/CERN.QZ28.FLHW
- [6] W.I. Andersson, A. Akram, T. Johansson, R. Kliemt, M. Papenbrock, J. Regina, K. Schönning, T. Stockmanns, *Comput. Softw. Big Sci.*, **5**, 18 (2021). DOI: 10.1007/s41781-021-00064-0
- [7] R.E. Kalman, *J. Basic Eng.*, **82**, 35 (1960). DOI: 10.1115/1.3662552
- [8] SPDroot program [Электронный ресурс]. <https://git.jinr.ru/nica/spdroot>
- [9] T. Sjöstrand, S. Ask, J.R. Christiansen, R. Corke, N. Desai, P. Ilten, S. Mrenna, S. Prestel, C.O. Rasmussen, P.Z. Skands, *Comput. Phys. Commun.*, **191**, 159 (2015). DOI: 10.1016/j.cpc.2015.01.024
- [10] R. Brun, F. Rademakers, *Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. A*, **389**, 81 (1997). DOI: 10.1016/S0168-9002(97)00048-X