

УДК 539.12, 539.1.08

ПРОГРАММА РЕКОНСТРУКЦИИ ТРЕКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В SPD ЭКСПЕРИМЕНТЕ

В. Ф. Андреев

В работе приводится описание алгоритма реконструкции треков заряженных частиц, образованных в первичной вершине взаимодействий, для проектируемого SPD эксперимента на коллайдере НИКА. Основными компонентами программы реконструкции являются поиск первичных трековых сегментов в вершинном детекторе, оценка их параметров и экстраполяция треков в трековой системе SPD эксперимента. Экстраполяция трека происходит с учетом магнитного поля и эффектов от прохождения через вещество, таких как многократное рассеяние и энергетические потери заряженной частицы. При оценке параметров треков применяется фильтр Калмана. Разработанная программа показала высокую эффективность реконструкции треков и была включена в программное обеспечение SPD эксперимента.

Ключевые слова: реконструкция треков заряженных частиц, фильтр Калмана, фитирование треков, Монте-Карло моделирование, коллайдер НИКА, SPD эксперимент.

Введение. Основной целью планируемого SPD эксперимента на коллайдере НИКА в Дубне является изучение спин-зависимых структурных функций нуклонов и других спиновых эффектов в протон-протонных и дейтрон-дейтронных взаимодействиях в поляризованных и неполяризованных пучках частиц [1]. Определение характеристик исследуемых событий с наилучшей точностью является одним из основных требований, предъявляемым к детекторам SPD эксперимента. Например, трековая система должна обеспечивать точность измерения поперечного импульса $\sigma_{p_T}/p_T \approx 2\%$ для заряженных частиц с импульсом 1 ГэВ/с, измерение положения первичной вершины взаимодействия

лучше 100 мкм, а эффективность реконструкции мюонов должна достигать 99% в диапазоне псевдобыстроты $0 \leq |\eta| \leq 2.5$. Таким образом, эффективное нахождение треков заряженных частиц и точное определение их характеристик является важнейшим требованием для измерения изучаемых процессов в SPD эксперименте.

В данной работе рассмотрена процедура реконструкции треков заряженных частиц, образованных в первичной вершине взаимодействий, и приведены результаты использования данной процедуры применительно к Монте-Карло событиям для SPD эксперимента. Программу реконструкции треков (здесь и далее по тексту “трек” всегда будет обозначать трек заряженной частицы) можно разделить на две основные части: нахождение трековых кандидатов и определение параметров треков с использованием программы фитирования. Нахождение трековых кандидатов означает выделение из всего множества измерений в вершинном и трековом детекторах SPD эксперимента, в данном случае Монте-Карло (МС) хитов, таких измерений, которые, как мы полагаем, принадлежат к одному и тому же треку. Далее на основе выделенных измерений производится оценка параметров трека с использованием программы фитирования.

Для описания установки SPD используется система координат, в которой ось Z ориентирована вдоль номинального направления пучка частиц, движущегося против часовой стрелки, ось Y вертикальна, а ось X перпендикулярна к Z и Y осям и направлена к центру кольца коллайдера. Началом системы координат является центр установки SPD, который часто называется точкой взаимодействия. Необходимо также подчеркнуть, что согласно проекту коллайдера НИКА столкновение пучков частиц в SPD эксперименте будет происходить под нулевым углом.

Трековая система SPD эксперимента, подробное описание которой приведено в [1], состоит из двух основных частей: вершинного детектора, содержащего кремниевые детекторы в качестве регистрирующих элементов и трекового детектора, состоящего из тонкостенных дрейфовых трубочек (строу-детектор). В настоящее время рассматриваются несколько возможных конфигураций вершинного детектора:

– чувствительная часть вершинного детектора в его центральной части состоит из 4-х цилиндрических слоев пиксельных детекторов (MAPS) толщиной в 50 мкм и размером пикселя 29×27 мкм, симметрично расположенных вокруг оси z , совпадающей с осью столкновения пучков частиц. Длина центральной части детектора вдоль оси z составляет 73.8 см. В передней и задней частях вершинного детектора предусматривается размещение 4-х дисков с пиксельными детекторами;

– вся чувствительная часть вершинного детектора состоит из 5-ти цилиндрических слоев двухсторонних микроstriповых детекторов (DSSD) толщиной в 300 мкм и с расстоянием между стрипами в 95 мкм для p^+ -слоя и 281.5 мкм для n^+ -слоя, соответственно. Пространственный угол между стрипами составляет 90 градусов. В передней и задней частях вершинного детектора также предусматривается размещение 5-ти дисков с микроstriповыми детекторами;

– чувствительная часть вершинного детектора состоит только из 3-х слоев DSSD детекторов. Данная конфигурация в настоящее время находится на стадии предварительного обсуждения и не будет рассматриваться в данной работе.

Эффективное пространственное разрешение для кремниевых детекторов типа DSSD оценивается в 27.4 мкм для r - φ и 81.26 мкм для r - z координат, соответственно, а для MAPS детекторов данное разрешение полагалось равным 8 мкм.

Трековый детектор SPD эксперимента в центральной своей части является также симметричным относительно оси z и разделен на 8 равных частей по азимутальному углу, каждая из которых содержит 58 слоев строу-детекторов. Минимальный и максимальный радиус трекового детектора равен 27 см и 85 см, соответственно, а длина детектора вдоль оси z составляет 236 см. Дополнительно 16 слоев строу-детекторов расположены в передней и задних частях трекового детектора. Предполагается, что пространственное разрешение строу-детекторов будет составлять примерно 150 мкм. Данные величины пространственного разрешения для вершинного и трекового детекторов SPD эксперимента были использованы при Монте-Карло моделировании.

Алгоритм нахождения первичных трековых сегментов в вершинном детекторе. Планируется, что магнитное поле в SPD эксперименте будет однородным и параллельным оси z , с величиной до 1.2 Тесла, и при этом неоднородность компоненты поля B_z в центральной части трекового детектора не будет превышать нескольких процентов. Направление компоненты B_z магнитного поля будет совпадать с направлением сталкивающихся пучков и, следовательно, движение заряженной частицы в однородном магнитном поле состоит из суммы двух движений: равномерного движения вдоль направления магнитного поля и равномерного вращения по окружности. Таким образом, траектория заряженной частицы представляет собой спираль вокруг оси сталкивающихся пучков с радиусом окружности $R = P_T/qB_z$, где q – заряд частицы и P_T – поперечный импульс частицы или компонента импульса частицы, перпендикулярная оси z . Если выбрать ось z вдоль направления сталкивающихся пучков, то такая траектория может быть представлена следующими пятью параметрами:

- x_C, y_C – x и y – координаты центра окружности в плоскости XU ;
- q/R – величина, обратная радиусу окружности с учетом заряда частицы;
- φ_0 – азимутальный угол трека в первичной вершине взаимодействия;
- $\text{tg}(\lambda)$ – тангенс угла наклона спирали, где $\lambda = \text{arctg}(P_z/P_T)$.

При выборе таких переменных траекторию частицы можно представить прямой линией в пространстве Sz -переменных: $z(S) = \text{tg}(\lambda) \cdot S + z_0$, с углом наклона $k = \text{tg}(\lambda)$ и длиной дуги окружности $S = q \cdot R \cdot (\varphi - \varphi_0)$, которая определена таким образом, что равняется нулю в точке рождения трека или в z_0 -координате первичной вершины взаимодействия. Таким образом, задача нахождения МС хитов, принадлежащих к одному и тому же треку в вершинном детекторе, сводится к задаче нахождения последовательности МС хитов, образующих прямую линию в пространстве Sz -координат.

Программа реконструкции треков начинается с построения первичных трековых сегментов (track seed) с использованием МС хитов вершинного детектора, и состоит из последовательности следующих шагов:

- построение 2-точечных трековых сегментов, когда комбинируются МС хиты с различных слоев вершинного детектора, начиная с 1-го слоя в возрастающей последовательности. То есть, МС хиты в 1-м слое комбинируются с МС хитами во 2-м слое, в 3-м слое и так далее по возрастающей. Далее эта процедура повторяется с МС хитами во 2-м слое, в 3-м слое и других слоях вершинного детектора;
- на следующем шаге производится первичная оценка параметров трекового сегмента: радиуса и координат центра окружности, z_0 -координаты и угла наклона прямой $\text{tg}(\lambda)$ в пространстве Sz -координат. На данном шаге в качестве третьей, дополнительной точки, используется точка начала координат ($x = 0.0, y = 0.0$);
- далее к 2-точечным трековым сегментам добавляется 3-й МС хит с другого слоя вершинного детектора и при этом требуется выполнение определенных условий по азимутальному и полярному углам для нового МС хита. С каждым новым добавленным МС хитом производится уточнение параметров окружности, z_0 -координаты и угла наклона прямой линии.

Пример данной процедуры для DSSD опции вершинного детектора приведен на рис. 1, на котором синим цветом показаны МС хиты в пространстве Sz -переменных, а красным цветом выделены МС хиты, принадлежащие к одному из найденных треков.

В результате данной процедуры образуется большое количество 2-, 3-, 4- или 5-точечных (для DSSD версии вершинного детектора) трековых сегментов. Далее применяется процедура объединения трековых сегментов, которые содержат один и тот же

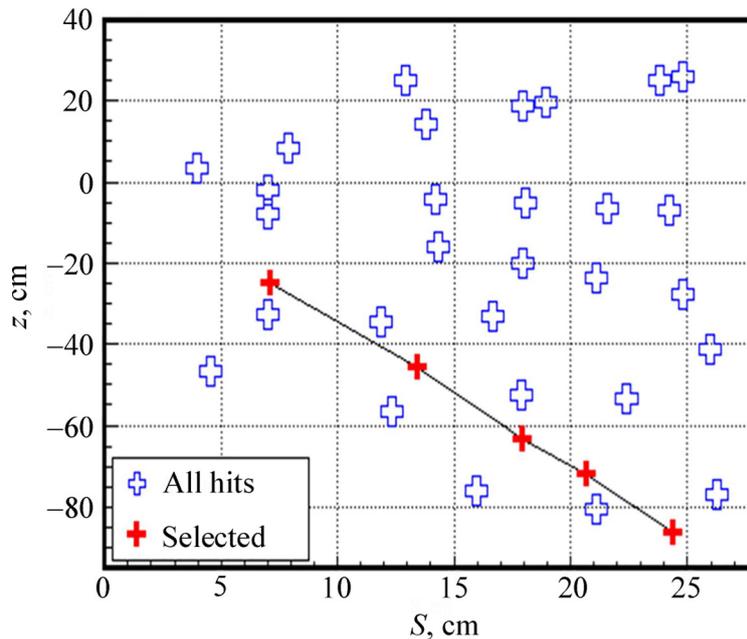


Рис. 1: Пример расположения MC хитов в пространстве Sz -переменных в вершинном детекторе SPD эксперимента. Линией соединены MC хиты, принадлежащие к одному из треков.

набор MC хитов. Так как каждый трековый сегмент характеризуется z_0 -координатой или вершиной, в которой он образовался, то следующим шагом является оценка z -координаты первичной вершины взаимодействия, при которой используются 5-, 4- или 3-точечные трековые сегменты. Все трековые сегменты, которые не связаны с данной первичной вершиной, не учитываются в дальнейшей процедуре реконструкции треков.

Важным элементом данной процедуры нахождения первичных трековых сегментов является наличие двух и более MC хитов в вершинном детекторе у реконструируемого трека. На рис. 2 приведено распределение числа треков, содержащих определенное число MC хитов в вершинном детекторе для 2-х опций геометрии вершинного детектора. На распределениях видно, что большинство треков содержат два и более MC хита в вершинном детекторе, но также наблюдается некоторое число треков с меньшим количеством MC хитов. Треки, имеющие менее двух MC хитов в вершинном детекторе, не будут учтены в данной процедуре реконструкции.

Алгоритм нахождения хитов трекового кандидата в трековом детекторе. Общая схема поиска и добавления MC хитов к трековому кандидату в трековом строудетекторе SPD эксперимента приведена на рис. 3.

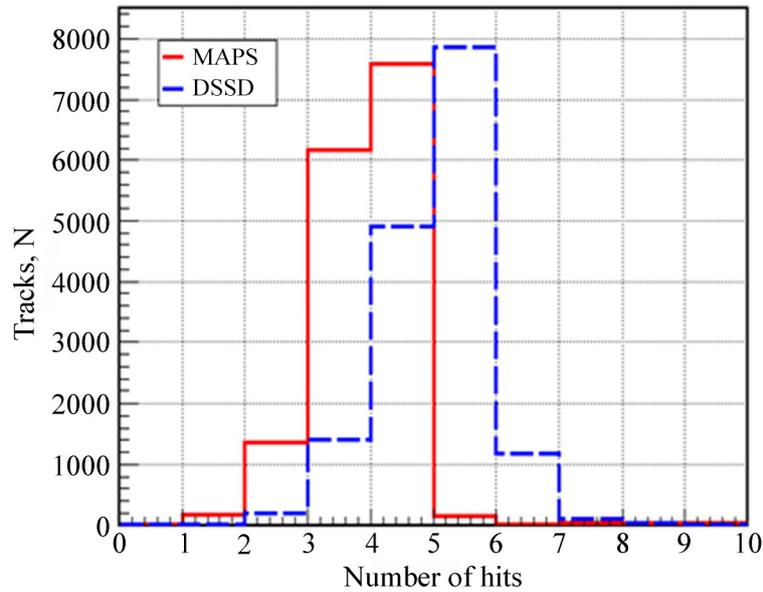


Рис. 2: Распределение треков, содержащих определенное количество МС хитов в вершинном детекторе, для двух опций геометрии вершинного детектора: MAPS (—), DSSD (- -).

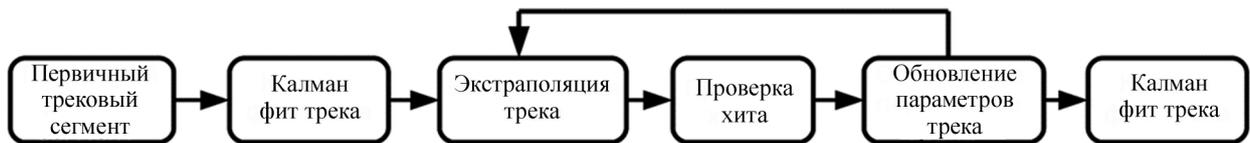


Рис. 3: Схема поиска и добавления МС хитов к трековому кандидату в строу-детекторе SPD эксперимента.

В данной процедуре входными элементами являются первичные трековые сегменты, полученные на первом этапе программы реконструкции с использованием МС хитов в вершинном детекторе. Далее происходит оценка параметров трековых сегментов с использованием программы фитирования на основе фильтра Калмана [2], который в настоящее время является составной частью пакета программ SPDroot [3]. Исследование данной реализации фильтра Калмана, проведенное в работе [4], показало, что он может быть успешно использован для определения параметров треков применительно к трековой системе SPD эксперимента. Следующий шаг состоит в экстраполяции трекового кандидата к первому слою трековой системы, содержащему строу-детекторы. Экстраполяция трека осуществляется с применением метода Рунге–Кутта–Нюстрём [5],

который также добавлен в пакет программ SPDroot, и при этом учитывается как реальная карта магнитного поля, так и многократное рассеяние и энергетические потери заряженной частицы при прохождении вещества. Далее проверяется расстояние от точки пересечения трека и плоскости трекового детектора до оси сработавшей трубки строу-детектора с учетом ошибки при экстраполяции трека. Если МС хит удовлетворяет критериям отбора, то он добавляется к трековому кандидату, далее проводится новая оценка параметров трекового кандидата и трек экстраполируется к следующему слою строу-детекторов. В том случае, когда на данном шаге два или более МС хита удовлетворяют критериям отбора, то они все добавляются к трековому кандидату. Экстраполяция трека останавливается если пройдены все плоскости трековой системы или число пустых плоскостей превышает определенное число, которое является настраиваемым параметром.

В результате процедуры реконструкции получается большое количество трековых кандидатов, среди которых может находиться некоторое число, относящееся к одному и тому же треку, то есть данный трек был реконструирован два или более раз. Поэтому в финальной части программы реконструкции проводится процедура нахождения и отбраковки дублирующих кандидатов среди реконструированных треков. Для этого каждому трековому кандидату присваивается параметр качества трека, определяемый выражением: $q = N_{\text{hits}} + \beta \cdot (\chi^2/ndf)$, где N_{hits} – полное число МС хитов, принадлежащих к данному кандидату, χ^2/ndf – параметр, полученный при фитировании трекового кандидата (ndf – число степеней свободы) и β – коэффициент. Если при сравнении 2-х трековых кандидатов число совместных МС хитов будет превышать некоторое значение, то трек, имеющий меньший параметр качества, выбраковывается при данной процедуре. Число совместных МС хитов и коэффициент β являются настраиваемыми параметрами, которые могут отличаться в зависимости от геометрии трековой системы.

Моделирование событий. В качестве входных данных для проверки программы реконструкции треков использовались Монте-Карло хиты, полученные при моделировании отклика трековой системы в пакете программ SPDroot [3], который был разработан для описания геометрии и моделирования отклика различных детекторов SPD эксперимента. При моделировании отклика также учитывалось пространственное разрешение как вершинного, так и трекового детекторов. Здесь надо подчеркнуть, что на данном этапе разработки программы реконструкции треков рассматривался только идеальный отклик детекторов, при котором не учитывалось наличие шумов, ложных срабатываний и эффективность трековых детекторов.

Для оценки эффективности программы реконструкции треков и оценки ее качества были смоделированы следующие два набора Монте-Карло событий с использованием генератора частиц и программы моделирования событий PYTHIA 8 [6]:

– набор из 8-ми заряженных мюонов с импульсом 1 ГэВ/с, равномерно распределенных по азимутальному и полярному углам;

– так называемые Minimum Bias (MB) события, включающие в себя дифракционные и неупругие взаимодействия, смоделированные при энергии сталкивающихся протонов $\sqrt{s} = 27$ ГэВ.

При моделировании также было рассмотрено два варианта положения первичной вершины взаимодействия: вершина находится в начале координат ($x = y = z = 0.0$ см) и координаты вершины распределены по Гауссу с величиной сигма, равной 30 см для z -координаты и 0.1 см для x -, y -координат, соответственно. Второй вариант распределения вершины взаимодействия соответствует предполагаемому распределению реальных событий в SPD эксперименте. Важной составной частью пакета SPDroot является программа “идеальной” реконструкции треков, в которой точно известны все MC хиты, принадлежащие к данному треку, а определение параметров заряженных треков происходит на основе фильтра Калмана.

Результаты работы программы реконструкции треков. Основными характеристиками, определяющими качество работы программы реконструкции, являются эффективность нахождения треков (efficiency), количество ложнореконструированных треков (fake track) и величина треков-клонов, когда один и тот же трек реконструируется два и более раз (clone track). Для оценки этих параметров в данной работе, как референтные, использовались “идеально-реконструированные” треки. Эффективность реконструкции определялась следующим выражением: $\varepsilon = N_F/N_{\text{tot}}$, где N_{tot} – полное число “идеально-реконструированных” треков и N_F – число “идеально-реконструированных” треков, для которых был найден соответствующий трек среди реконструированных треков. Соответствующим треком называется такой реконструированный трек, который содержит не менее одного MC хита в вершинном детекторе и не менее 50% MC хитов в трековом строу-детекторе, совпадающих с MC хитами в “идеально-реконструированном” треке. Число ложнореконструированных треков определялось аналогичным образом, только для каждого реконструированного трека искался соответствующий трек среди “идеально-реконструированных” треков. Если такой трек не находился, то данный реконструированный трек рассматривался как ложнореконструированный трек и их величина определялась выражением: $N_{\text{fake}} = 1 - N_F^R/N_{\text{tot}}^R$, где N_{tot}^R – полное число ре-

конструированных треков, N_F^R – число реконструированных треков, для которых был найден соответствующий трек среди “идеально-реконструированных” треков.

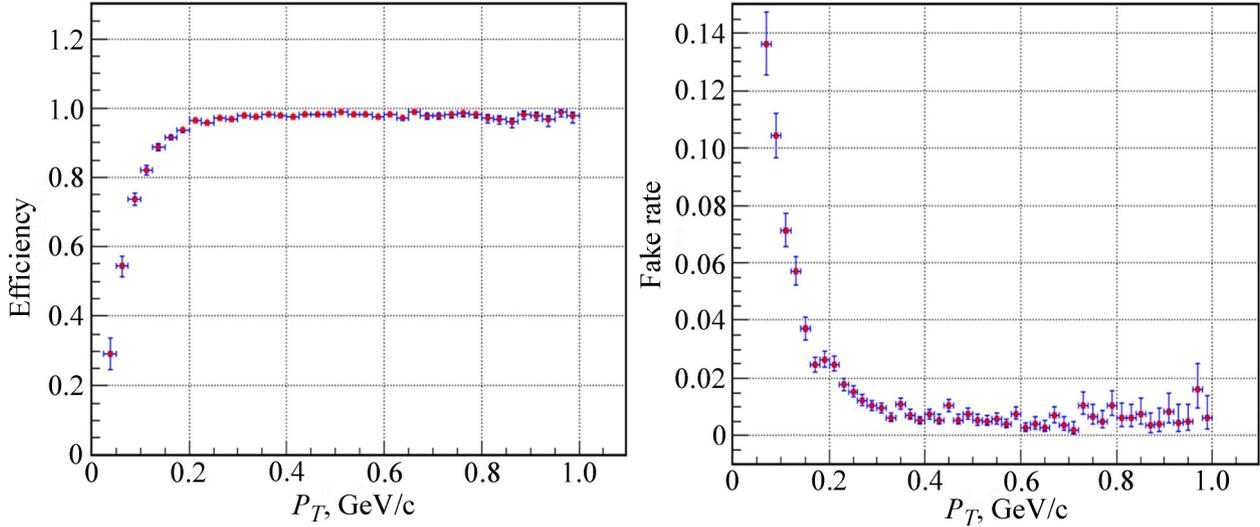


Рис. 4: Эффективность реконструкции треков (левый рисунок) и число ложно-реконструированных треков (правый рисунок) как функция поперечного импульса трека.

На рис. 4 приведены эффективность реконструкции треков и число ложно-реконструированных треков в зависимости от поперечного импульса треков для DSSD опции вершинного детектора. Полученные результаты демонстрируют высокую эффективность реконструкции ($> 95\%$), а также низкий вклад от ложнореконструированных треков ($< 3\%$) для треков с величиной поперечного импульса $P_T > 150$ МэВ/с.

Рассмотренные выше характеристики программы реконструкции (эффективность реконструкции треков, число треков-клонов и величина ложнореконструированных треков) далее были проверены для двух следующих наборов треков:

а) all tracks – все реконструированные треки с поперечным импульсом $P_T > 25.0$ МэВ/с и полным импульсом частицы $P > 75.0$ МэВ/с, содержащие три и более МС хита в трековых детекторах. Данные величины порогов были выбраны с учетом формы распределения поперечного и полного импульсов заряженных треков, образованных в первичной вершине взаимодействия, и условия, что менее 0.1% всех треков будут отброшены при анализе;

б) selected tracks – поперечный импульс реконструированного трека должен быть $P_T > 100.0$ МэВ/с, а импульс частицы $P > 200.0$ МэВ/с. Отобранные треки также

должны содержать два и более МС хита в вершинном детекторе и хотя бы один МС хит в трековом строу-детекторе, а первичная вершина взаимодействия должна находиться в пределах $-30.0 \text{ см} < z < 30.0 \text{ см}$.

Общее число реконструированных треков (all tracks), использованных при данном анализе, составило ~ 18000 треков для каждого типа событий, а число отобранных треков (selected tracks) для указанных порогов равняется $\sim 90\%$ от общего числа реконструированных треков.

В табл. 1 суммированы полученные результаты для двух наборов Монте-Карло событий и двух опций геометрии вершинного детектора SPD эксперимента. Значения без скобок соответствуют вершине, находящейся в начале координат, а значения, приведенные в круглых скобках табл. 1, соответствуют набору Монте-Карло событий, когда координаты первичной вершины взаимодействия были распределены по Гауссу. Полученные результаты демонстрируют высокую эффективность реконструкции треков заряженных частиц, образованных в первичной вершине взаимодействий, низкий уровень ложнореконструированных треков и незначительный вклад треков-клонов.

Т а б л и ц а 1

Эффективность реконструкции треков, число треков-клонов и величина ложнореконструированных треков

		DSSD			MAPS		
		eff [%]	clone [%]	fake [%]	eff [%]	clone [%]	fake [%]
8 muons	all tracks	96.4 (95.4)	<0.1 (<0.1)	3.1 (3.0)	96.5 (93.1)	<0.1 (<0.1)	2.9 (2.6)
	selected	99.7 (99.5)	<0.1 (<0.1)	0.1 (0.1)	99.6 (99.5)	<0.1 (<0.1)	<0.1 (<0.1)
MB	all tracks	90.3 (89.4)	1.0 (1.1)	5.8 (5.1)	91.6 (86.6)	0.4 (0.5)	3.7 (2.9)
	selected	97.9 (97.8)	0.5 (0.6)	1.6 (1.4)	97.3 (96.0)	0.2 (0.3)	1.2 (1.0)

Дальнейшее развитие программы реконструкции предусматривает реконструкцию треков, образованных в результате распада короткоживущих частиц или рожденных во вторичных взаимодействиях, а также реконструкцию треков, содержащих менее двух хитов в вершинном детекторе.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 22-12-109.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] V. M. Abazov, V. Abramov, L. G. Afanasyev, et al., The SPD proto-collaboration. Conceptual design of the Spin Physics Detector. arXiv:2102.00442v1 [hep-ex] 31 Jan 2021.

- [2] R. E. Kalman, Journal of Basic Engineering, **D82**, 35 (1960). DOI: <https://doi.org/10.1115/1.3662552>.
- [3] SPDroot program, <https://git.jinr.ru/nica/spdroot>.
- [4] В. Ф. Андреев, С. Г. Герасимов, Краткие сообщения по физике ФИАН **47**(12), 11 (2020). DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068335620120118>.
- [5] E. Lund, L. Bugge, I. Gavrilenko, A. Strandlie, Journal of Instrumentation **4**, P04001 (2009). DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/4/04/P04001>.
- [6] T. Sjostrand, S. Ask, J. R. Christiansen, et al., Comput. Phys. Commun. **191**, 159 (2015). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2015.01.024>.

Поступила в редакцию 15 августа 2022 г.

После доработки 6 октября 2022 г.

Принята к публикации 7 октября 2022 г.