

Моделирование end-сар-трекера детектора SPD

В.А. Кузьмин^{1, *}

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Поступила в редакцию 05.02.2026; подписана в печать 05.03.2026)

На примере straw end-сар-трекера детектора SPD (Spin Physics Detector), который в настоящее время разрабатывается в Объединенном институте ядерных исследований (г. Дубна), моделируется работа детектора такого типа с целью оценки эффективности и точности реконструкции треков для различных конфигураций его слоев. Показывается, что трекер с двухслойной конструкцией координатных плоскостей не может однозначно давать информацию для реконструкции треков из-за большого диапазона углов вхождения треков в детектор. Предлагается метод реконструкции для слоеного детектора из дрейфовых трубок, в котором слой не объединяется в координатные плоскости, а для реконструкции треков используются только сигналы от отдельных слоев детектора. Чтобы найти оптимальную геометрию проектируемого трекера, рассчитываются эффективность и точность восстановления трека для 20 различных геометрических конфигураций детектора с разными вариантами точностей его электроники. Демонстрируется достаточность используемой методики моделирования. Результаты моделирования указывают на возможность создания трекера с однослойными координатными плоскостями, который по точности аналогичен детектору, состоящему из идеальных двухслойных координатных плоскостей.

PACS: 29.20.-c, 29.40.Gx, 29.90.+g, 02.70.Uu УДК: 53.05, 53.07

Ключевые слова: трек частицы, трековый детектор, дрейфовая трубка, реконструкция трека, детектор SPD.

DOI: [10.55959/MSU0579-9392.81.2620203](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.81.2620203)

ВВЕДЕНИЕ

Straw tube (ST) детекторы широко используются в современной физике высоких энергий. ST-детектор состоит из длинных дрейфовых трубок, заполненных газом, с проводящим внутренним слоем в качестве катода и проволокой, натянутой вдоль цилиндрической оси в качестве анода. Если между катодом и анодом подать высокое напряжение, то созданное электрическое поле внутри трубки разделит ионы и электроны, образующиеся в газе при прохождении через него заряженной частицы, вызывая ток между катодом и анодом трубки. Форма электрического сигнала позволяет определить расстояние от следа (трека) частицы до проволоки. Точность нахождения этого расстояния определяется свойствами газа и возможностями электроники детектора. ST-детекторы используются во многих текущих и предстоящих экспериментах по физике высоких энергий для отслеживания заряженных частиц. Например, ST-детекторы применяются в экспериментах COMPASS [1], PANDA [2, 3], ATLAS [4–6], NA62 [7], GlueX [8]. Их использование планируется в предстоящем эксперименте SPD [9] на ускорительном комплексе NICA (г. Дубна) [10]. Каждый эксперимент преследует разные физические цели и, следовательно, имеет разную геометрию детектора и состав газовых смесей.

Слой параллельных дрейфовых трубок в плоскости XU с анодом вдоль оси U позволяет определить расстояние в плоскости XZ от провода до ближайшей точки трека заряженной частицы или с точностью до радиуса трубки координаты точки трека (x, z) . Для повышения точности используются несколько плоскостей с параллельными трубками. Такой набор называется координатной плоскостью. Трек можно считать прямолинейным в масштабе расстояний порядка диаметра трубки.

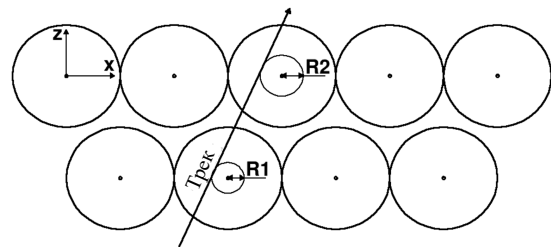


Рис. 1. Двухслойная координатная плоскость

В плоскости, перпендикулярной центральному электроду, трек (рис. 1) проходит по касательной к двум окружностям с радиусами $R1$ и $R2$, которые определяются электроникой детектора по форме электрического сигнала. Если траектория частицы перпендикулярна плоскости XU , то положение касательной вместе с двумя точками траектории определяются однозначно с некоторой точностью δ .

* E-mail: kuzmin@sinp.msu.ru

В случае наклонных треков для определения положения касательных используются несколько слоев, образующих координатную плоскость, как это делается, например, в детекторе COMPASS.

В этой статье на примере SPD-детектора мы описываем метод восстановления трека в ST-трекере, координатные плоскости которого состоят только из одного слоя дрейфовых трубок и изучаем точность восстановления трека для различных конструкций этого детектора.

1. STRAW END-CAP-ТРЕКЕР ДЕТЕКТОРА SPD

Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ) в г.Дубна, Россия, строит ионный коллайдер на базе нуклотрона NICA, предназначенный для изучения релятивистской ядерной и адронной физики [10]. NICA будет ускорять различные ионы, начиная с протонов, до энергии $\sqrt{S_{NN}}$ 27 ГэВ для протонов и 11 ГэВ для Au соответственно. Пучки будут сталкиваться в двух точках взаимодействия, где будут установлены два 4 π -детектора. Одним из них является детектор спиновой физики (SPD). Он спроектирован для изучения физики пучков поляризованных ионов в переходной области между пертурбативной и непертурбативной квантовой хромодинамикой. Трековый детектор SPD представляет собой ST-детектор, состоящий из двух основных частей: центральной (barrel) и двух торцевых (end-cap) (рис. 2). Принципиальное различие между этими двумя детекторами заключается в расположении дрейфовых трубок. Если в barrel они параллельны оси луча и магнитному полю внутри детектора, то в end-cap дрейфовые трубки перпендикулярны этому направлению. Это определяет разницу алгоритмов идентификации и восстановления трека в barrel- и end-cap детекторах. По техническому проекту SPD (TDR) [11] end-cap-трекер состоит из 8 координатных плоскостей (по две пары плоскостей XYUV) (рис. 3, а). Все координатные плоскости собраны в корпус небольшой толщины (рис. 3, б). Каждая координатная плоскость, в свою очередь, состоит из двух одинаковых слоев дрейфовых трубок, которые повернуты на 180° относительно друг друга. Расстояние от точки взаимодействия (центр SPD-детектора) до ближайшего слоя составляет 137 см. Диаметр детектора около 160 см. На рис. 4 показано расположение дрейфовых трубок одного слоя. Слой состоит из 128 трубок переменной длины диаметром 9.6 мм. В середине имеется свободное пространство для трубы ускорителя. Трубки в один слой крепятся на отдельной круглой раме. Центр симметрии труб смещен относительно окружности несущей конструкции вдоль оси X на величину, равную четверти радиуса. Это позволяет получить координатную плоскость, подобную показанной на рис. 1, состоящую из двух слоев, повернутых один относительно другого на 180°. В дальнейшем геометрия детектора со слоями, имеющими

в середине такое пустое пространство (рис. 4), будет обозначена словом «полоса». Вариант детектора с дополнительными 28 трубками по обе стороны от трубы ускорителя, над и под ней, называется «квадратом». Планируется, что электроника детектора позволит определять расстояние до трека частицы с точностью до 200 мкм.

2. ДВУХСЛОЙНАЯ КООРДИНАТНАЯ ПЛОСКОСТЬ

Двухслойная координатная плоскость, описанная в TDR, позволяет однозначно определять координаты трека в плоскости XZ для частиц, которые рождаются достаточно далеко от детектора. Однако расчеты динамики протонного пучка ускорителя NICA показывают, что точка взаимодействия может отклоняться от своего предполагаемого положения на величину порядка 50 см [12]. Точка взаимодействия расположена в центре детектора в 137 см от end-cap-трекера. Это означает, что направление входа частиц в end-cap-трекер может меняться в широком диапазоне (минимальный угол около 58°), что приведет к неоднозначности при определении координат в плоскости XZ. На рис. 5 показаны 9 возможных наклонных траекторий, пересекающих двухслойную координатную плоскость, 8 из которых соответствует касательным на рис. 1.

Согласно TDR, расположение слоев в координатной плоскости менее плотное, чем на рис. 1. Трубки соседних слоев не соприкасаются друг с другом и между ними есть промежуток. Этот факт также влияет на распределение треков, показанных на рис. 5. Треки частиц были смоделированы при следующих условиях:

1. положение точки взаимодействия распределено случайным образом в соответствии с гауссовым распределением со стандартным отклонением в 50 см;
2. следы вторичных частиц сферически равномерно распределены внутри конуса с вершиной в точке взаимодействия.

Результаты моделирования для двух типов координатных плоскостей показаны на рис. 6. В случае соприкасающихся слоев (без зазора) выделяются два типа треков: 2 и 7, которые соответствуют перпендикулярным к плоскости детектора трекам. Однако по-прежнему существует неопределенность в определении типа касательной более чем для 30% треков. В случае зазора между слоями шесть типов треков одинаково вероятны, что сводит на нет смысл использования двухслойных координатных плоскостей в end-cap-трекере.

Зазор между слоями позволяет упростить конструкцию трекера, собирая координатные плоскости из одинаковых элементов. С другой стороны, ограниченные размеры детектора затрудняют его

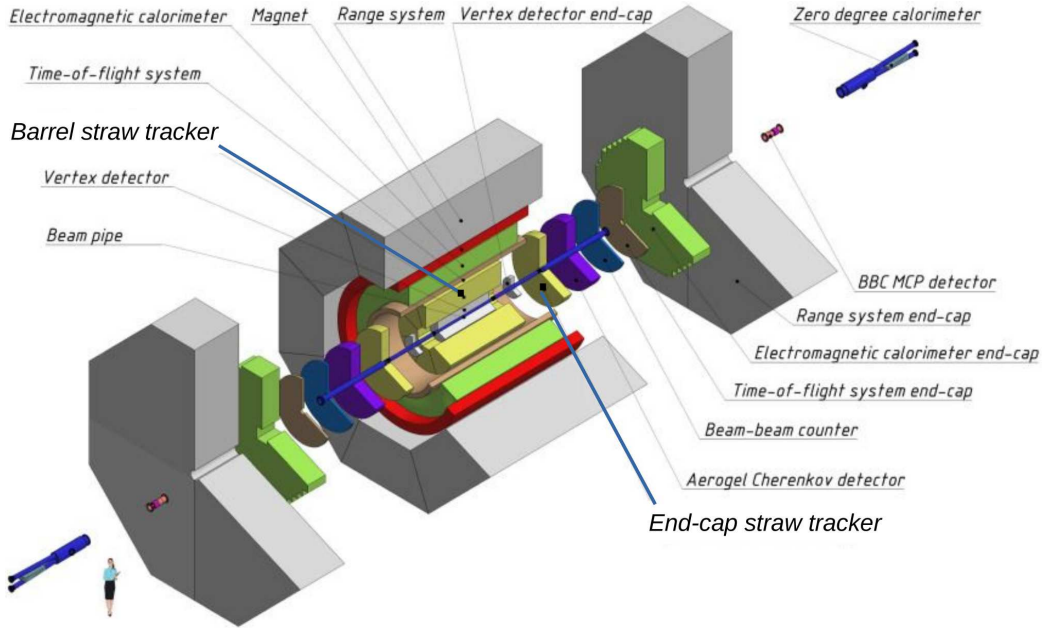


Рис. 2. SPD-детектор [11]

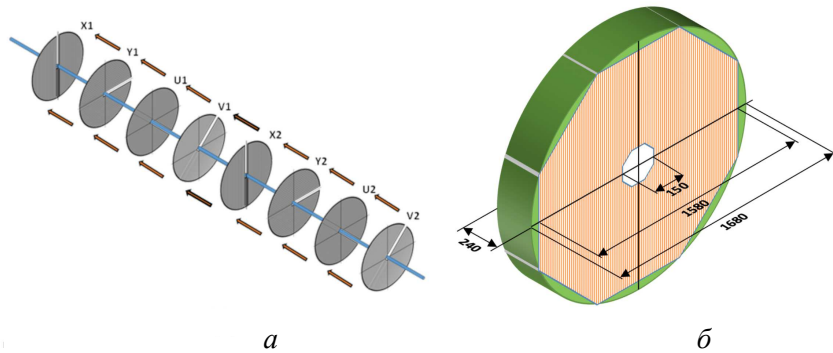


Рис. 3. End-cap детектор

сборку из многослойных координатных плоскостей. Кроме того, двухслойная координатная плоскость не позволяет однозначно определять координаты трека с помощью касательных. В этом контексте возникает вопрос: возможно ли реконструировать треки в ST-детекторе, состоящего из однослойных координатных плоскостей?

3. МЕТОД РЕКОНСТРУКЦИИ ТРЕКОВ ДЛЯ ДЕТЕКТОРА С ОДНОСЛОЙНЫМИ КООРДИНАТНЫМИ ПЛОСКОСТЯМИ

После того, как частица прошла через дрейфовую трубку, имеется информация о координатах ее центра в перпендикулярной к ней плоскости, а также наименьшее расстояние между траекторией частицы и центральным электродом. Другими словами, мы не можем связать точку в плоскости слоя с определенной точкой трека. Это означает, что нам не известна ни одна трехмерная координата трека или его хит (hit). Хиты используются для нахож-

дения параметров модели трека. Траектория заряженной частицы, движущейся в однородном магнитном поле, имеет форму спирали. Уравнения, описывающие это движение:

$$\begin{cases} x = x_{cL} + R \cos(\varphi_{0L} - qt), \\ y = y_{cL} + R \sin(\varphi_{0L} - qt), \\ z = z_{0L} + h_z t, \end{cases} \quad (1)$$

где x_{cL} , y_{cL} , z_{0L} , R , h_z определяют положение кривой в пространстве, а φ_{0L} and t задают положение точки на ней, q — заряд частицы. Параметры модели трека находятся из условия минимума суммы

$$\min \sum_{hits} \left(\frac{H_i - T_i}{\sigma_i} \right)^2, \quad (2)$$

где H_i определяет хит трека, T_i — ближайшая к этому хиту точка на кривой модели трека, σ_i — ошибка измерения.

Рис. 7 иллюстрирует процесс определения местоположения трека однослойной координатной плоскостью. Кривая представляет проекцию модели

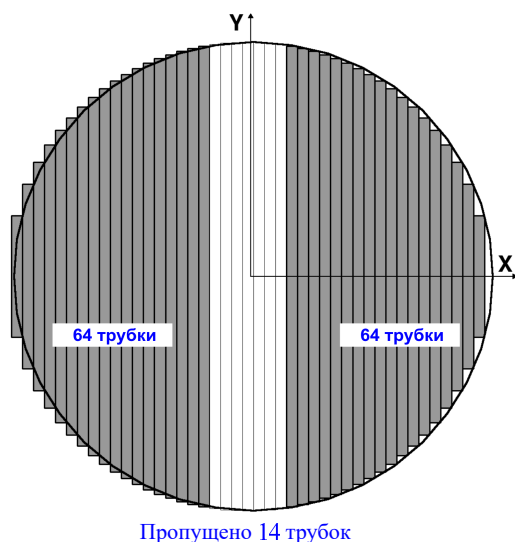


Рис. 4. Геометрия слоя end-cap детектора (TDR)

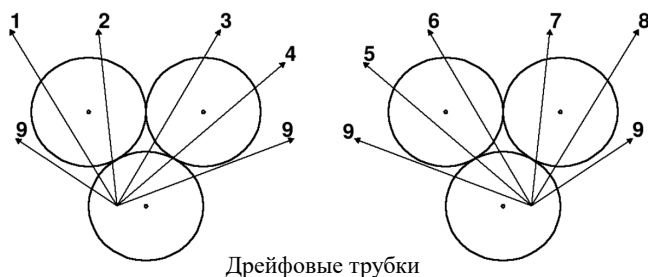


Рис. 5. Варианты пересечения двухслойной координатной плоскости треком частицы

трека на плоскость XZ в момент минимизации выражения (2). Точку H_B , центр большого круга (дрейфовая трубка с сигналом), назовем базовым хитом. Радиус меньшего круга соответствует расстоянию между электродом и треком, определяемому электроникой детектора. Точка T_m на модельной кривой трека находится на минимальном расстоянии трека к электроду. Точка пересечения отрезка $H_B T_m$ с малой окружностью — это точка H_F , которую назовем плавающим хитом. Его координаты используются в выражении (2) как H_i . Моделирование end-cap-трекера, описанное ниже, подтверждает эффективность использования этого метода в детекторе с координатными плоскостями, состоящими из отдельных слоев.

4. ВАРИАНТЫ КОНСТРУКЦИИ END-CAP-ТРЕКЕРА SPD

Целью данного исследования является поиск оптимальной геометрии end-cap-трекера SPD. Оптимальность определяется эффективностью и точностью восстановления трека. Следует применить этот критерий в первую очередь к варианту трекера, представленному в TDR. В нем на координат-

ной плоскости имеется полоса, которая не содержит дрейфовых трубок. Поэтому также интересно рассмотреть вариант, в котором эта полоса содержит подобные датчики. Как показано выше, координатные плоскости, предложенные в TDR, неэффективны для определения хитов трека из-за флуктуаций точки взаимодействия вдоль пучка. Предложенный выше метод реконструкции трека в однослойном детекторе требует начального приближения модели трека, параметры которого определяют движение частицы в плоскости XY . Один слой в этой плоскости обеспечивает только одну координату X (рис. 4). Вторая координата может быть получена из двух слоев, дрейфовые трубки которых непараллельны. Для повышения точности слои должны располагаться рядом друг с другом. Наибольшая точность достигается, когда угол поворота между двумя слоями равен $\pi/2$. Однако при таком угле в конфигурации «полоса» половина слоев имеет одинаковую «мертвую» зону без дрейфовых трубок, что в конечном счете может ухудшить работу детектора. Поэтому мы исследуем различные углы поворота слоев. End-cap-детектор имеет относительно небольшую толщину, что приводит к короткой проекции следа на плоскость XY . Это затрудняет точное определение кривизны и, следовательно, поперечного импульса частицы. Чтобы решить эту проблему, мы рассматриваем модели детектора с увеличенным числом слоев, которые все еще могут поместиться в пределах пространства, отведенного для end-cap-трекера. В таблице приведены варианты end-cap-трекера SPD, которые были рассмотрены в данном исследовании.

5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКЛИКА END-CAP-ТРЕКЕРА SPD

Задача исследования большого количества вариантов детекторов включает в себя упрощенное моделирование отклика сенсоров детектора для создания хитов треков. Далее по ним реконструируются исходные параметры трека. Это позволит сравнить восстановленные параметры с их исходными значениями и найти ошибки реконструкции параметров трека и эффективность для каждого варианта конструкции end-cap-трекера из таблицы.

Какие факторы влияют на хиты трека, получаемые с помощью детектора? Их два. Первый — это вероятность срабатывания или превышения сигнала в электронике дрейфовой трубки выше порогового значения, что определяется длиной пути заряженной частицы в газовой среде трубки. Очевидно, колебания сигнала вблизи порогового значения обусловлены периферийным прохождением частиц, когда они следуют закону Ландау из-за небольшого количества вещества, проходимого заряженной частицей. Вторым фактором является величина погрешности при определении расстояния от электрода до трека, которая определяется качеством и сложностью электроники трекера.

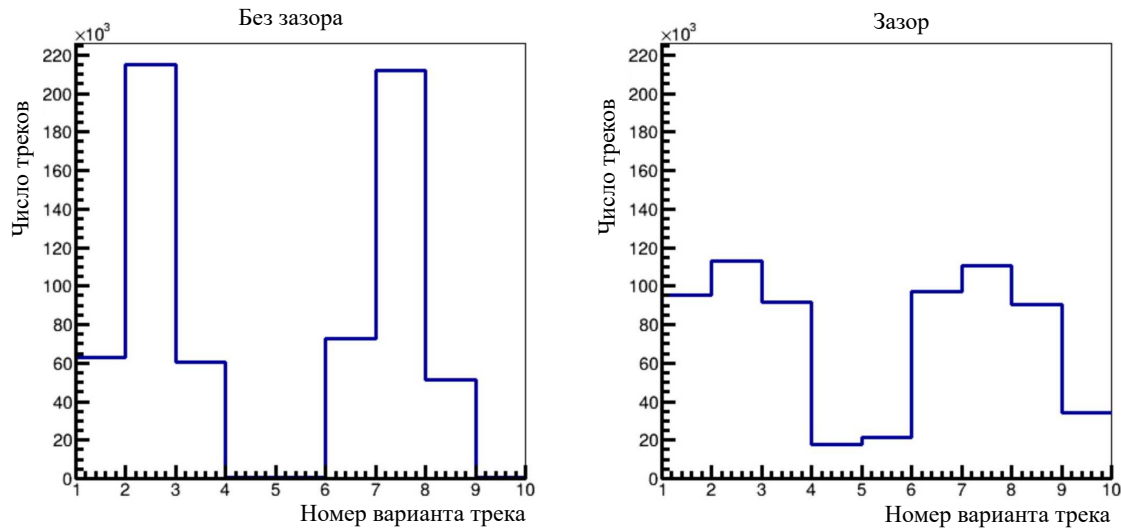


Рис. 6. Распределение треков по типу касательной для двухслойной координатной плоскости end-сар-трекера SPD. Слева — случай соприкасающихся слоев, справа — расстояние между центрами слоев составляет 1.8 см

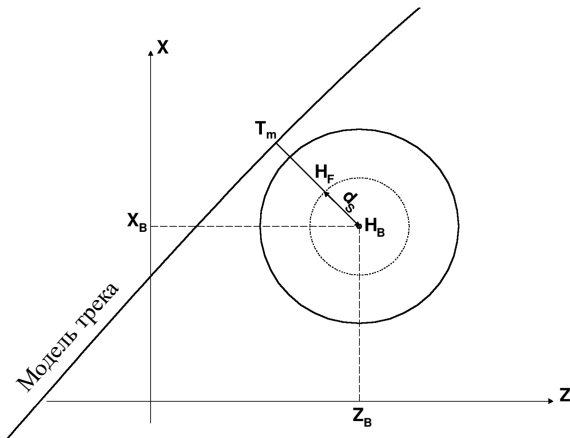


Рис. 7. Поиск хита трека в однослойной координатной плоскости end-сар детектора

Пусть d_{12} — длина трека частицы внутри дрейфовой трубки. Среднее значение вероятности срабатывания трубки зависит от d_{12} и показано на рис. 8. d_{tr} — это точка, в которой вероятность приближается к 1. Это значение и форма функции слева от него зависят от состава газа, его состояния и характеристик электронных компонентов устройства, то есть от многих параметров, которые сложно учесть при моделировании проектируемого детектора, точные характеристики которого неизвестны. С другой стороны, высокая эффективность дрейфовых трубок под воздействием пучка заряженных частиц была продемонстрирована экспериментально [7, 13].

Эффективность определяется интегралом от функции вероятности. Целью данного исследования является оптимизация геометрии end-сар-трекера, поэтому точное значение интеграла от функции вероятности не имеет значения, и была выбрана величина 96,5%. Если мы возьмем функцию ве-

роятности в виде ступеньки (жирная пунктирная линия на рис. 8), то можно найти значение d_{ef} . Для диаметра трубки 9.6 мм при ее эффективности 96.5% $d_{ef}=2,7$ мм. Вероятность не является ступенчатой функцией, а скорее относится к типу, показанному сплошной линией на рис. 8.

Сигнал end-сар-трекера представляет собой сумму сигналов от каждого отдельного слоя, вероят-

Таблица. Варианты конструкции end-сар-трекера SPD

Вариант	Полоса без трубок	Координатная плоскость	Угол поворота	Число слоев
0	да	да	TDR	16
1	нет	да	TDR	16
2	да	нет	$\pi/2$	16
3	нет	нет	$\pi/2$	16
4	да	нет	$7\pi/16$	16
5	нет	нет	$7\pi/16$	16
6	да	нет	$3\pi/8$	16
7	нет	нет	$3\pi/8$	16
8	да	нет	$\pi/4$	16
9	нет	нет	$\pi/4$	16
10	да	нет	$\pi/16$	16
11	нет	нет	$\pi/16$	16
12	да	нет	$\pi/2$	32
13	нет	нет	$\pi/2$	32
14	да	нет	$7\pi/16$	32
15	нет	нет	$7\pi/16$	32
16	да	нет	$3\pi/8$	32
17	нет	нет	$3\pi/8$	32
18	да	нет	$\pi/4$	32
19	нет	нет	$\pi/4$	32

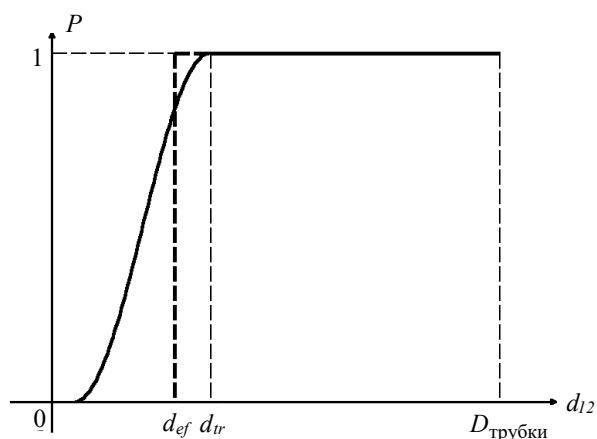


Рис. 8. Вероятность срабатывания дрейфовой трубки.

ности срабатывания которых описываются одинаковыми функциями распределения вероятностей. Согласно центральной предельной теореме математики результирующее распределение имеет форму, близкую к нормальному распределению. Результаты моделирования показали, что значения распределений искомых величин для выборок в миллион событий отличаются в третьем знаке для двух исходных функций вероятности (сплошная и пунктирная линии на рис. 8), если они дают одну и ту же эффективность дрейфовой трубки. В последующих расчетах использовалась функция, которая обозначена сплошной линией.

На данный момент нет информации об электронике проектируемого детектора, поэтому ошибки при определении расстояния от центрального электрода до трека взяты в соответствии с нормальным распределением с различными значениями стандартного отклонения: 100, 200 и 400 мкм. Например, 200 мкм — это типичное значение для детекторов такого типа [13].

Алгоритм моделирования:

1. Положительный и отрицательный знаки заряда частицы равновероятны. Вершины треков на оси пучка флуктуируют по нормальному закону с сигмой 50 см. Треки направлены таким образом, чтобы они были равномерно распределены в пределах телесного угла, под которым детектор виден из вершины.
2. В качестве модели трека используется спираль. Радиус спирали (поперечный импульс) равномерно распределен в заданном диапазоне. Шаг спирали (продольный импульс) выбирается равномерно случайным образом, чтобы трек попадал в детектор.
3. В каждом слое, в зависимости от расстояния, пройденного внутри дрейфовой трубки, определяется вероятность превышения порогового сигнала, а затем расстояние до трека с учетом случайной ошибки.

4. Используя два смежных слоя с непараллельными дрейфовыми трубками, находится 3D-хит трека, который используется при построении начального приближения для модели трека.
5. Используя начальное приближение, рассчитываются параметры трека.

6. РЕЗУЛЬТАТЫ

Чтобы выбрать из представленных в таблице наиболее оптимальный вариант трекера, мы исследуем точность восстановления импульса трека. Она зависит от величины и направления импульса. Если рассчитать точность для разных вариантов, используя один тот же набор треков, то качественно полученные результаты будут аналогичны результатам и для набора треков с другими параметрами. По этой причине мы приводим результаты только для одного значения поперечного импульса частицы. Миллион треков, сгенерированных согласно условиям предыдущего раздела, был использован для тестирования каждого из 20 вариантов end-cap-трекера. Все треки имеют постоянный радиус кривизны 100 см, что соответствует импульсу 330 МэВ при напряженности магнитного поля в детекторе 1 Тл. Отклик детектора (хиты трека в каждом слое) был смоделирован для каждого варианта геометрии детектора, и для каждого зарегистрированного трека (сигнал выше порога) были реконструированы его параметры.

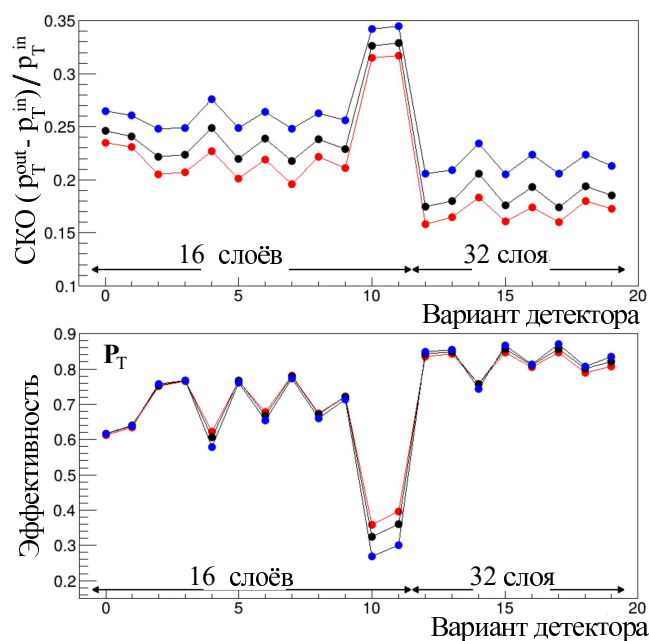


Рис. 9. Среднеквадратичное отклонение (СКО) относительной ошибки реконструкции поперечного импульса и эффективность вариантов end-cap-трекера. Голубой цвет — точность электроники 400 мкм, черный — 200 мкм, красный — 100 мкм

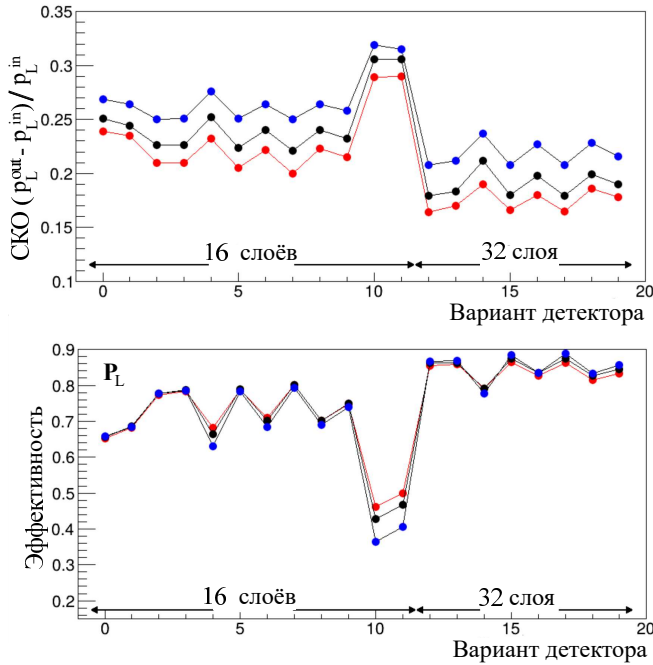


Рис. 10. Средне квадратичное отклонени (СКО) относительной ошибки реконструкции продольного импульса и эффективность вариантов end-cap-трекера. Голубой цвет — точность электроники 400 мкм, черный — 200 мкм, красный — 100 мкм

Рис. 9 и 10 демонстрируют относительную точность восстановления поперечного и продольного импульсов в зависимости от геометрических параметров трекера и точности его электроники. Отбор событий происходил по условию $|P_{rec} - P_{MC}| / P_{MC} < 0.5$, где P — поперечный или продольный импульс. Для обнаружения вторичных частиц важна точность реконструкция вершины трека. Все сгенерированные треки начинаются на оси Z . Для каждого трека находится точка T_{minZ} , ближайшая к оси Z . Среднее расстояние r_0 от T_{minZ} до оси Z для всех вариантов показано на рис. 11. Вторая зависимость на этом рисунке представляет собой среднеквадратичное отклонение разности между координатами Z точки T_{minZ} и вершины трека. На обоих графиках представлены только события с погрешностью восстановления вершины менее 25 см как в поперечном, так и в продольном направлениях.

7. ОБСУЖДЕНИЕ

Все результаты предыдущего раздела были получены с использованием представленного выше метода для однослойных координатных плоскостей, когда имеется только расстояние от центрального электрода до трека, т.е. хит трека определяется множеством точек окружности. Выброс точек на рис. 9–11 для вариантов трекера 10 и 11 обусловлен малым углом поворота соседних плоскостей, что уменьшает точность начального прибли-

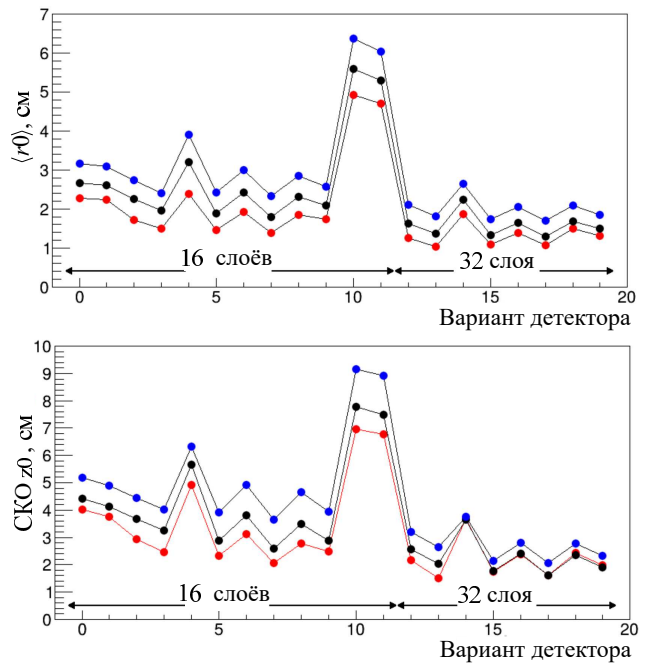


Рис. 11. Точность реконструкции вершины трека. Голубой цвет — точность электроники 400 мкм, черный — 200 мкм, красный — 100 мкм

жения модели трека. Полученные результаты интересно сравнить со случаем, когда имеются обе координаты хита в слое, как в детекторе с многослойными координатными плоскостями. Для этого из данных Монте-Карло определяется и положение хита трека на окружности. Это точка касания окружности треком, радиус которой равен расстоянию от центрального электрода до трека. Результаты такого анализа относительной погрешности реконструкции поперечного импульса показаны на рис. 12, а, б для двух вариантов end-cap-трекера. Оба имеют одинаковое количество слоев. Рис. 12, а для варианта 1 таблицы, когда пара слоев образует координатную плоскость. На рис. 12, б показаны результаты для варианта 3 таблицы, в котором все соседние слои повернуты относительно друг друга. Сравнение точностей реконструкции треков показывает, что наличие смежных параллельных слоев снижает точность детектора. С другой стороны, для достижения аналогичной точности детектора с однослойными координатными плоскостями необходимо увеличить количество слоев. Это следует из рис. 12, в с результатами варианта 17 таблицы, имеющего 32 слоя.

End-cap-трекеры состоят из достаточно большого количества одинаковых слоев. Вероятности появления сигнала и погрешность определения расстояния до трека описываются одинаковыми функциями распределения в каждом слое. Такая ситуация близка к условиям центральной предельной теоремы. Численная проверка независимости параметров конечных распределений от формы функции вероятности срабатывания дрейфовой трубки

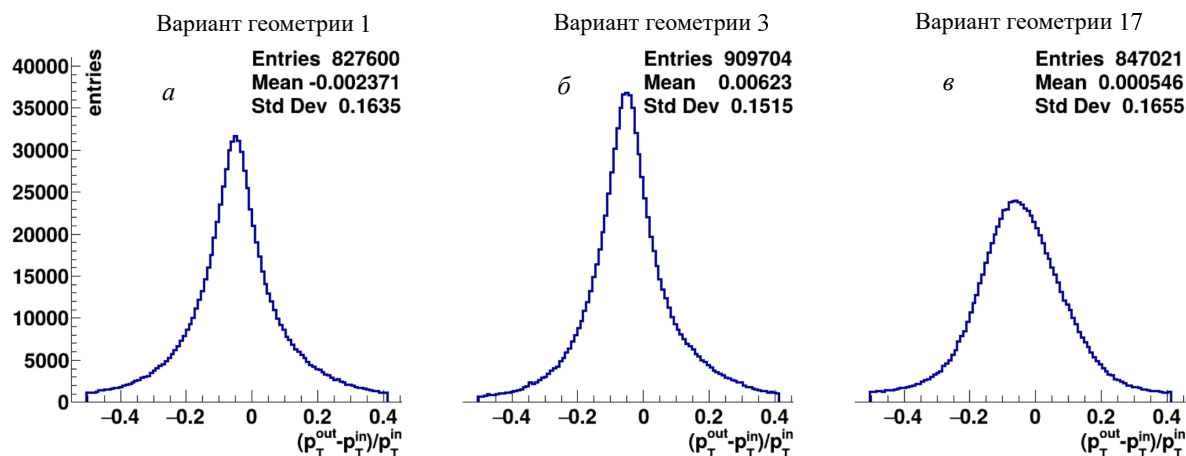


Рис. 12. Функции распределения относительной ошибки реконструкции поперечного импульса трека

подтверждает достаточность использования упрощенного метода моделирования для определения точности реконструкции параметров трека.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере проектируемого в ОИЯИ (г. Дубна) end-cap-трекера детектора SPD, предложен метод моделирования подобных детекторов и продемонстрирована его достаточность для оценки точности реконструкции треков.

Особенностью детектора является его небольшая толщина и широкий диапазон углов, регистрируемых треков, кроме того, отсутствуют прямые хиты трека. Для надежного получения двумерных координат в слое дрейфовых трубок необходимы более сложные координатные плоскости с числом слоев больше двух. Поэтому был предложен метод рекон-

струкции треков, использующий «плавающие» хиты трека, которые строятся из условия, что трек проходит на заданном расстоянии от центрального электрода дрейфовой трубки.

Используя предложенный метод моделирования и алгоритм восстановления трека, были рассчитаны точности восстановления трека для 20 различных конфигураций детектора и трех уровней точности электроники. Было показано, что при увеличении числа однослойных координатных плоскостей в пределах размера детектора может быть достигнута точность детектора, состоящего из идеальных двухслойных координатных плоскостей. Полученные данные позволяют выбрать оптимальную конструкцию детектора, основываясь как на точности реконструкции трека, так и на технической сложности реализации детектора.

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М. В. Ломоносова.

- [1] Abbon P. (COMPASS Collaboration) // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*. **577**, N 3, 455. (2007).
- [2] Wintz P. // *Hyperfine Interactions* **229**, N 1-3, 147. (2014).
- [3] Smyrski J., Apostolou A., Biernat J. // *Journal of Instrumentation*. **3**, C06032. (2017)
- [4] Abat E. (ATLAS TRT Collaboration) // *Journal of Instrumentation*. **3**, N 2, P02014. (2008).
- [5] Abat E. (ATLAS TRT Collaboration) // *Journal of Instrumentation*. **3**, N 12, P10003. (2008).
- [6] Abat E., Addy T.N., Akesson T.P.A. et al (ATLAS TRT Collaboration) // *Phys. Procedia*. **3**, N 6, P06007. (2008).
- [7] Sergi A. // *Journal of Instrumentation*. **37**, 530. (2012).
- [8] Jarvis N.S., Meyer C.A., Zihlmann B. // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*. **37**, 530. (2012).
- [9] Ladygin V.P. // *JPS Conf. Proc.* **37**, 011012. (2022).
- [10] Kekelidze V.D., Matveev V.A., Meshkov I.N. // *Eur. Phys. J. A* **52**, 211. (2016).
- [11] Abazov V. (SPD Collaboration) // *Natural Science Review*. **1**, N 3, 1. (2025).
- [12] Kozlov O.S., Kostromin S.A., Melnikov S.A. // *Phys. Part. Nucl.* **53**, N 5, 1021. (2022).
- [13] Volkov V.Yu., Volkov P.V., Enik T.L. // *Physics of particles and nuclei, letters*. **6**, 847. (2022).

Modelling of the SPD end-cap detector

V. A. Kuzmin

Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University

Moscow 119991, Russia
E-mail: kuzmin@sinp.msu.ru

Using the example of the straw end-cap tracker of the SPD detector (Spin Physics Detector), which is currently being developed at the Joint Institute for Nuclear Research (Dubna), the operation of a detector of this type is simulated for estimating the efficiency and accuracy of track reconstruction for various configurations of its layers. It is shown that a tracker with a two-layer construction of coordinate planes cannot unambiguously provide information for track reconstruction because of the large range of angles of incidence of the tracks into the detector. A reconstruction method is proposed for a layered detector made of drift tubes, in which the layers are not combined into coordinate planes, and only signals from individual detector layers are used for track reconstruction. In order to find the optimal geometry of the tracker being designed, the efficiency and accuracy of track reconstruction are calculated for 20 different geometric configurations of the detector with different levels of the accuracy of its electronics. The sufficiency of the modelling methodology used is demonstrated. The simulation results indicate the possibility of creating a tracker with single-layer coordinate planes, which is analogous in accuracy to a detector consisting of perfect two-layer coordinate planes.

PACS: 29.20.-c ,29.40.Gx,29.90.+r,02.70.Uu

Keywords: tracking detector, particle track, track hits, straw tube tracker, physics spin detector (SPD).

Received 2025.

English version: *Moscow University Physics Bulletin. 2026. 81, No. . Pp. .*

Сведения об авторе

Кузьмин Валентин Александрович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: 495 939-12-57, e-mail: kuzmin@sinp.msu.ru.