

P10-2008-152

В. В. Иванов¹, А. А. Лебедев^{1,2,*}, С. А. Лебедев^{1,2},
Г. А. Ососков¹

**К ВОПРОСУ ОБ ОПТИМИЗАЦИИ ГЕОМЕТРИИ
ДЕТЕКТОРА ПЕРЕХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТА СВМ**

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

²Gesellschaft für Schwerionenforschung, Дармштадт, Германия

*E-mail: alebedev@jinr.ru

Иванов В. В. и др.

P10-2008-152

К вопросу об оптимизации геометрии детектора переходного излучения для эксперимента CBM

В работе дается описание программ реконструкции траекторий заряженных частиц и их идентификации с помощью детектора переходного излучения TRD (Transition Radiation Detector) в эксперименте CBM. Алгоритм распознавания траекторий частиц основан на методе слежения по треку с применением фильтра Калмана. Идентификация электронов/пионов проводится с помощью прямой нейронной сети, использующей в качестве входной информации потери энергии в детектирующих слоях TRD. Представлены первые результаты по оптимизации геометрии TRD с учетом эффективностей реконструкции траекторий, идентификации электронов и подавления пионов.

Работа выполнена в Лаборатории информационных технологий ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2008

Ivanov V. V. et al.

P10-2008-152

Geometry Optimization of the Transition Radiation Detector for the CBM Experiment

A description of the software for charged particles track reconstruction and their identification by the Transition Radiation Detector (TRD) is given in this paper. The algorithm for track reconstruction is based on track following method together with the Kalman filter application. An artificial neural network, which uses as input samples the particles energy losses in the TRD layers, has been applied for electron/pion identification. First results on the optimization of the TRD geometry with regard for efficiencies of track reconstruction, electron identification and pion suppression are presented.

The investigation has been performed at the Laboratory of Information Technologies, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2008

ВВЕДЕНИЕ

В эксперименте CBM (Compressed Baryonic Matter) на строящемся в институте GSI (Дармштадт, Германия) ускорительном комплексе FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) планируется изучение новых состояний ядерной материи, образующихся в соударениях тяжелых ядер при энергиях от 8 до 45 А ГэВ [1].

На рис. 1 приведена схема экспериментальной установки CBM, которая содержит следующие элементы: координатные STS (Silicon Tracking System) и MVD (Micro-Vertex Detector) детекторы, которые располагаются внутри дипольного магнита и предназначены для реконструкции траекторий заряженных частиц и определения их импульсов; детекторы черенковского RICH (Ring Image CHerenkov) и переходного TRD (Transition Radiation Detector) излучения образуют систему идентификации электронов; детектор RPC (Re-

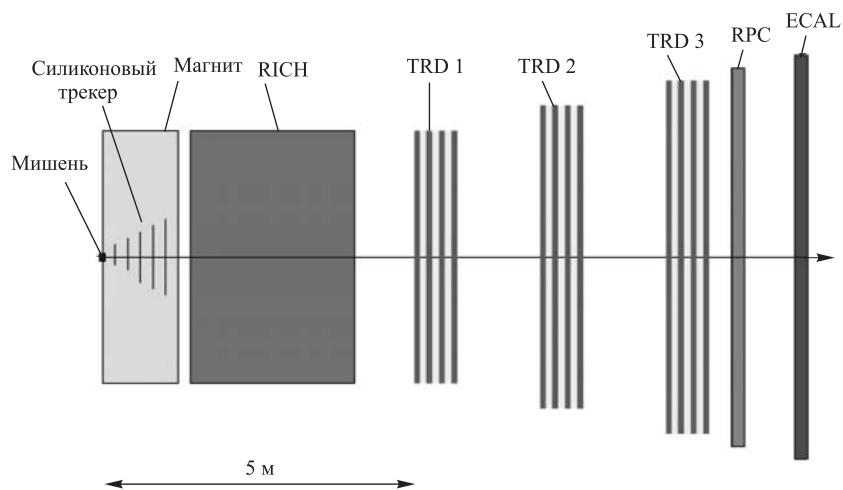


Рис. 1. Схема экспериментальной установки CBM (показаны три станции TRD)

sistive Plate Chamber) используется для идентификации адронов по измерениям их времен пролета; электромагнитный калориметр ECAL (Electromagnetic Calorimeter) предназначен для регистрации фотонов.

Настоящая работа представляет продолжение исследований, выполненных в работе [2]. В ней рассмотрено текущее состояние программ реконструкции траекторий заряженных частиц и идентификации частиц с помощью детектора TRD, представлены первые результаты анализа эффективности реконструкции траекторий, идентификации электронов и подавления пионов в зависимости от числа слоев TRD. Цель этих исследований — оптимизация геометрии TRD и уменьшение его стоимости.

В разд. 1 приводится описание детектора TRD и формулируются решаемые с его помощью задачи. В разд. 2 дается краткое описание алгоритмов, используемых для реконструкции траекторий заряженных частиц и идентификации электронов/пионов. В разд. 3 приводятся эффективности реконструкции траекторий и идентификации частиц для различных вариантов геометрии TRD. В заключение обсуждаются полученные результаты и делаются выводы.

1. ДЕТЕКТОР ПЕРЕХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ — TRD

В настоящий момент стандартный вариант GEANT3 [3] модели установки СВМ детектор TRD содержит три станции (см. рис. 1), расположенные, соответственно, на расстояниях 5, 7 и 9 м от мишени. Отдельная станция включает четыре идентичных детектирующих слоя, каждый из которых формируется из различных материалов с общей толщиной 6 см. Детектирующие слои имеют мелкоячеистую структуру прямоугольной формы. Ориентация ячеек меняется на 90° от слоя к слою. Таким образом, удается достичь высокого пространственного разрешения детектора, которое составляет 0,03–0,05 см поперек ячейки и 0,27–3,3 см вдоль нее.

В рассматриваемой модели каждый детектирующий слой TRD содержит набор материалов в следующих пропорциях (см. рис. 2): 29 мм полипропилена (радиатор), 6 мм газа; задняя плата состояла из 0,03 мм меди, покрытой золотом; 1,5 мм майлара, а также в наборе было 0,07 мм меди, покрытой золотом; 23,4 мм воздуха.

Обработка событий в детекторе TRD производится в два этапа (см. рис. 3). Вначале выполняется реконструкция траекторий заряженных частиц, зарегистрированных ячейками детектирующих слоев. При этом алгоритм реконструкции треков формирует из набора хитов (x, y, z) координат сработавших ячеек пространственный трек. На втором этапе на основе данных об энергетических потерях в ячейках, отвечающих восстановленному треку, выполняется идентификация зарегистрированной частицы.

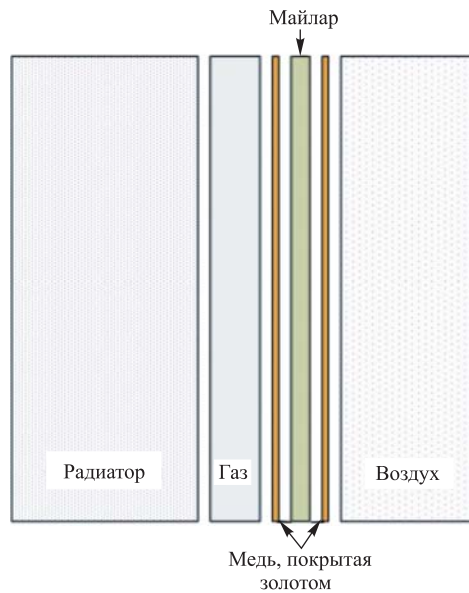


Рис. 2. Структура одного детектирующего слоя TRD

Следует отметить, что существенная разница в продольном и поперечном размерах ячеек приводит к меняющейся от слоя к слою точности определения (x, y) -координат трека, что наряду с большой множественностью событий (до 1200 треков на одно срабатывание установки) и большим многократным кулоновским рассеянием сильно осложняет задачу восстановления траекторий, зарегистрированных TRD.

Эффективность алгоритма реконструкции треков определяется отношением правильно найденных треков к общему числу треков, зарегистрированных TRD. Кроме того, отдельно подсчитываются эффективности работы алгоритма для различных типов треков: испускаемых из первичной вершины, «жестких» с большим импульсом и др.

С каждой из восстановленных траекторий ассоциируется набор потерь энергии, оставленных заряженной частицей в детектирующих слоях. С помощью указанного набора потерь энергии решается задача идентификации частицы, а именно, соответствия потерь энергии рассматриваемой выборки распределению потерь энергии (ионизационных и переходного излучения) электронов (нулевая гипотеза H_0), либо ионизационных потерь энергии пионов (альтернативная гипотеза H_1). Идентификация частиц проводится с помощью обученной прямооточной нейронной сети, которая выполняет роль

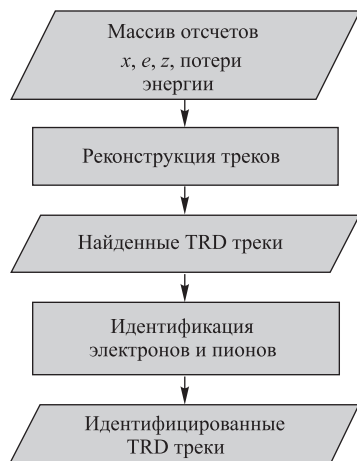


Рис. 3. Блок-схема реконструкции события в TRD

обеспечить высокую эффективность восстановления треков (не ниже 90 %) и получить приемлемый коэффициент подавления пионов: 100–150 [1].

проверочной статистики в задаче статистической проверки гипотез. Порог на величину выходного сигнала на выходе нейронной сети выбирается таким образом, чтобы потеря электронов не превышала наперед заданного уровня значимости α (ошибка первого рода); при этом вклад пионов в допустимую область β (ошибка второго рода) позволяет определить «коэффициент подавления пионов», который равняется $100/\beta$.

За счет сокращения числа детектирующих слоев TRD можно добиться значительной экономии средств на производство детектора. Однако это с неизбежностью ведет к падению эффективности реконструкции траекторий и понижению коэффициента подавления пионов. Поэтому необходимо подобрать оптимальное количество детектирующих слоев TRD таким образом, чтобы

2. АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ СОБЫТИЙ В TRD

2.1. Реконструкция траекторий. Алгоритм поиска треков основан на методе слежения по треку с применением фильтра Калмана [4]. Кроме того, в нем используется так называемое ветвление (branching), при котором для каждого хита, прошедшего проверку на присоединение к сегменту трека, создается отдельное, независимое ответвление трека.

Общая схема алгоритма представлена на рис. 4. Видно, что процедура поиска треков носит итерационный характер, т. е. после каждой итерации поиск треков можно возобновить, изменив параметры поиска. Кроме того, хиты, которые включены в найденные ранее треки, помечаются как уже использованные, тем самым с каждой последующей итерацией количество свободных хитов уменьшается, и слежение можно проводить с более мягкими ограничениями.

В качестве входной информации используются массив с хитами и массив с иницилирующими треками, задающими направление для начального поиска. Алгоритм поиска состоит из двух основных частей: слежение и выбор хороших треков. Схема процедуры слежения представлена на рис. 5.

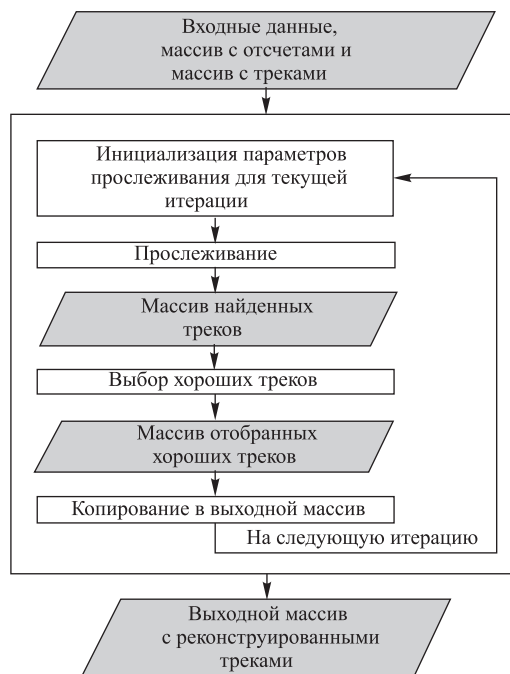


Рис. 4. Схема алгоритма реконструкции треков

При выборе хороших треков учитываются число хитов на треке (его длина), величина χ^2 , вычисляемая при подгонке хитов найденного трека с помощью фильтра Калмана, а также наличие общих хитов с найденными ранее треками.

Для TRD оказались востребованными два различных подхода поиска траекторий. Первый, так называемый «STS based», использует информацию треков, предварительно реконструированных в вершинном детекторе STS, для задания входного массива с иницилирующими треками. Во втором, автономном (standalone) варианте поиска используется только информация отсчетов из TRD. В этом случае иницилирующие треки создаются путем перебора возможных трековых элементов в первой TRD-станции.

2.2. Идентификация электронов и пионов с помощью искусственной нейронной сети. Для идентификация электронов и пионов используются различия в распределениях потерь энергии электронами и пионами в детектирующих слоях TRD. Представленные в данной работе результаты получены для пионов и электронов, испущенных из первичной вершины (см. рис. 1)

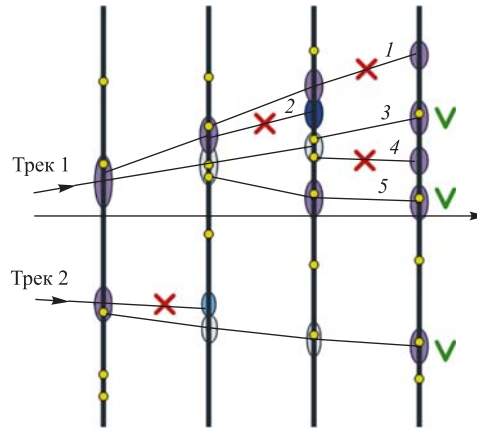


Рис. 5. Схема работы алгоритма слежения (в предположении, что один хит на треке может отсутствовать)

с начальным импульсом 1,5 ГэВ/с. Кроме того, для того, чтобы исключить основную массу вторичных электронов, учитывались только такие события, для которых импульс частиц в области первой станции TRD превышал 0,5 ГэВ/с.

На рис. 6 приведены распределения потерь энергии для электронов в первом детектирующем слое: а) потери на переходное излучение, б) ионизационные потери, в) полные потери. На рис. 7 приведено распределение количества слоев TRD, в которых для отдельного электронного трека потеря энергии на переходное излучение отсутствует. Из этого распределения видно, что при регистрации электрона для более половины детектирующих слоев вклад потерь энергии на переходное излучение отсутствует. Это обстоятельство с очевидностью заметно осложняет идентификацию электронов.

На рис. 8 приведено распределение ионизационных потерь энергии пионами в этом же детектирующем слое TRD.

В работе [5] была исследована и продемонстрирована возможность идентификации электронов и пионов для СВМ TRD с помощью искусственной нейронной сети (ИНС) — многослойного персептрона из пакета JETNET [6].

В настоящей работе в качестве ИНС нами использовался многослойный персептрон из пакета ROOT [3]. Сеть состояла из трех слоев: n нейронов (по числу детектирующих слоев TRD) во входном слое, $2n$ нейронов в скрытом слое и один выходной нейрон. Для обучения сети использовались выборки из 3000 электронов и 3000 пионов, сгенерированных с помощью пакета GEANT3 в среде СВМ ROOT [8]; при этом полагалось, что для пионов выходной сигнал должен быть равен -1 , а для электронов $+1$.

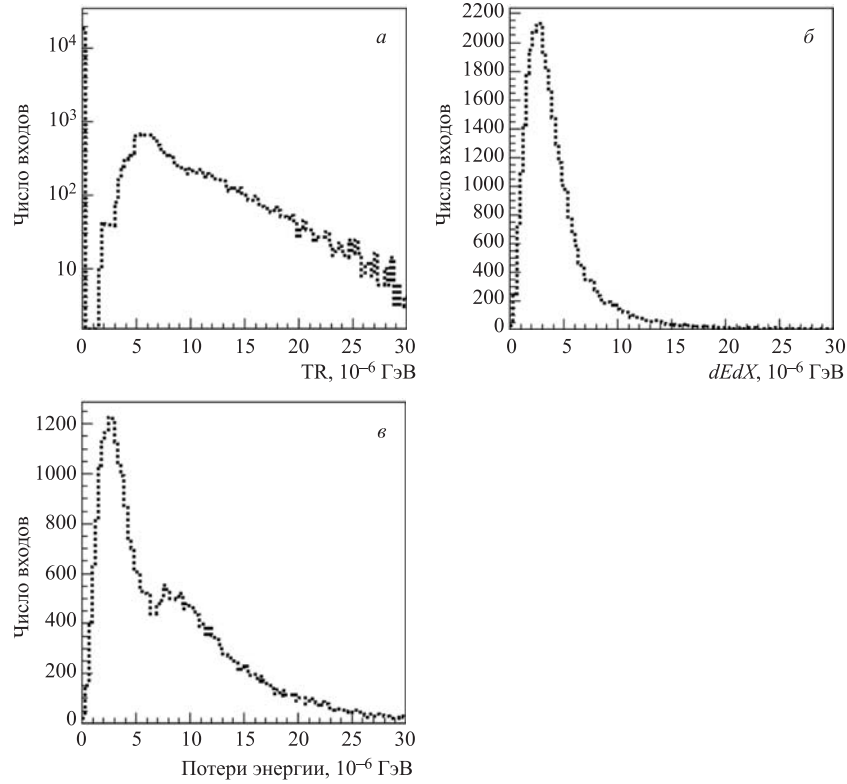


Рис. 6. Распределения потерь энергии для электронов в первом детектирующем слое: а) переходное излучение, б) ионизационные потери, в) суммарная потеря энергии

Использование в качестве входных данных для ИНС выборок, составленных из исходных потерь энергии, не позволило достичь приемлемой скорости обучения нейронной сети и уровня идентификации частиц. Для решения указанной проблемы в работе [5] было предложено преобразование исходных данных согласно следующей формуле:

$$\lambda_i = \frac{\Delta E_i - \Delta E_{\text{мп}}^i}{\xi_i} - 0,225, \quad i = 0, 1, \dots, n, \quad (1)$$

где ΔE_i — значение потери энергии в i -м детектирующем слое; $\Delta E_{\text{мп}}^i$ — наиболее вероятное значение потери энергии; $\xi_i = \frac{1}{4,02}$ FWHM распределения энергетических потерь для пионов в i -м детектирующем слое. В нашем случае $\Delta E_{\text{мп}}^i = 1,17$, а $\xi_i = 0,52$.

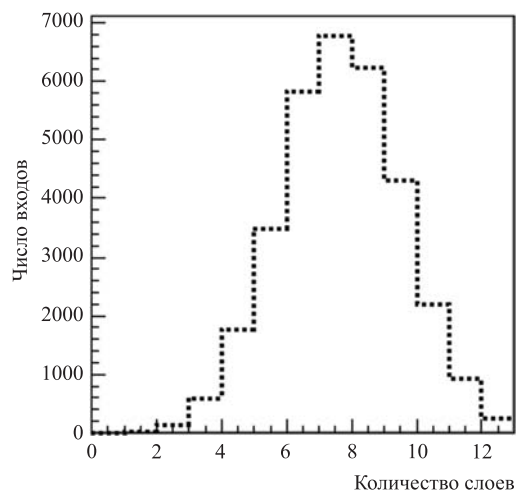


Рис. 7. Распределение количества слоев TRD для отдельного электронного трека, в которых отсутствует потеря энергии на переходное излучение

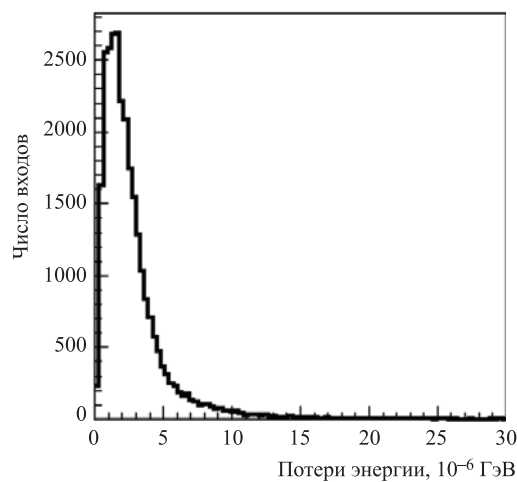


Рис. 8. Распределение ионизационных потерь энергии пионов в первом детектирующем слое

После преобразования массив величин λ_i сортируется в порядке возрастания и для каждого λ_i вычисляется соответствующее ему значение функции распределения Ландау l_i [9]. Подготовленные таким образом наборы величин l_i используются в качестве входных данных для ИНС.

Результаты применения данного подхода в задаче идентификации электронов и пионов с помощью ИНС приведены в разд. 3.3.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Оптимизация количества детектирующих слоев в TRD. Оптимизация TRD-детектора проводилась путем сокращения количества детектирующих слоев и их расположения. В настоящий момент в TRD по умолчанию задается 12 детектирующих слоев, которые сгруппированы в три станции (см. рис. 9).

Вначале для сокращения числа слоев из каждой станции были исключены по одному (рис. 10, *а*) и по два (рис. 10, *б*) детектирующих слоя, что соответствует примерно 25- и 50 %-му уменьшению стоимости детектора.

Однако оба этих варианта не обеспечили необходимого уровня распознавания треков в случае автономного подхода. В этой связи были рассмотрены два других варианта расположения детектирующих слоев, представленных на рис. 11. Эти варианты не столь экономичны по стоимости, как приведенные на рис. 10, но позволяют сократить расходы на изготовление TRD примерно на 17 % (для геометрии 4–3–3) и 33 % (для геометрии 4–2–2).

Результаты расчетов эффективности алгоритма поиска траекторий частиц для рассмотренных вариантов геометрии TRD-детектора приведены ниже.

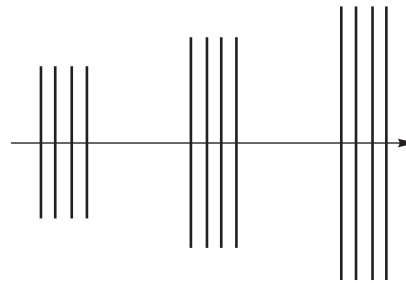


Рис. 9. Схема TRD с 12 детектирующими слоями 4–4–4

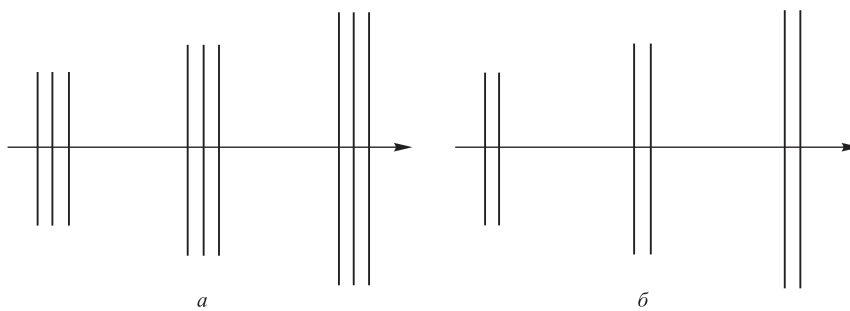


Рис. 10. Схема TRD: *а*) с девятью детектирующими слоями (3–3–3), *б*) с шестью детектирующими слоями (2–2–2)

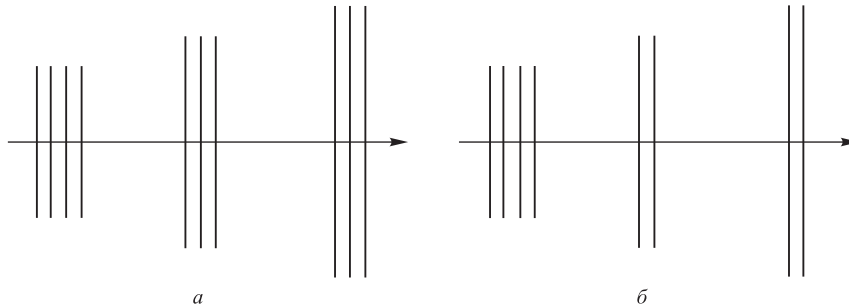


Рис. 11. Схема TRD: *а*) с десяти детектирующими слоями (4–3–3), *б*) с восемью детектирующими слоями (4–2–2)

3.2. Эффективности алгоритмов поиска траекторий частиц. Эффективности алгоритмов поиска треков частиц в зависимости от их импульса для стандартной геометрии TRD представлены на рис. 12. При вычислении эффективности учитывалась степень соответствия найденного трека модельным трекам. Она оценивалась по числу хитов из модельных треков, внесших вклад в восстановленный трек. При этом полагалось, что модельный трек, давший максимальное количество хитов, отвечает найденному треку. Трек считался правильно восстановленным, если более 70 % его хитов совпадали с хитами ассоциированного с ним модельного трека.

Эффективности алгоритмов поиска траекторий частиц для различных вариантов геометрии TRD представлены в табл. 1 и 2. Они даны в процентах по отношению к общему числу смоделированных треков. В таблицах приве-

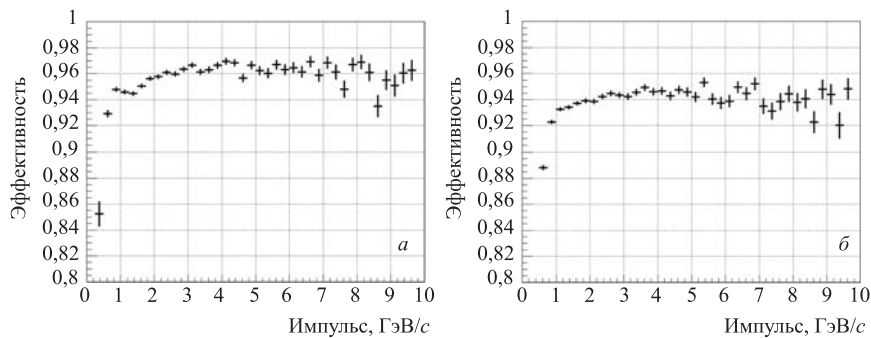


Рис. 12. Эффективности поиска треков частиц в зависимости от их импульса для *а*) «STS based» подхода, *б*) подхода «stand-alone»

Таблица 1. Эффективности поиска траекторий частиц для разных вариантов геометрии TRD в случае подхода «STS based»

Тип трека	Геометрия				
	2-2-2	3-3-3	4-4-4	4-2-2	4-3-3
All	95,7	95,2	95,5	95,5	95,5
Vertex	95,9	95,4	95,6	95,7	95,7
Reference	96,3	95,7	95,8	96,0	95,9
Non vertex	94,1	93,4	93,9	93,8	93,9
Ghost	5,8	5,2	3,7	4,1	3,2

Таблица 2. Эффективности поиска траекторий частиц для разных вариантов геометрии TRD в случае алгоритма автономного поиска

Тип трека	Геометрия		
	4-4-4	4-2-2	4-3-3
All	89,1	88,8	88,9
Vertex	94,3	94,6	94,3
Reference	94,4	94,7	94,4
Non vertex	77,1	75,8	76,6
Ghost	6,2	7,1	5,9

дены следующие типы треков: All — полностью реконструированные треки (проходящие через все детектирующие слои TRD); Vertex — треки, образовавшиеся в области мишени; Non vertex — треки, образовавшиеся не в области мишени; Reference — это Vertex-треки частиц с импульсом более 1 ГэВ/с; Ghost — ложные треки, у которых менее 70 % хитов принадлежат одному модельному треку.

Из табл. 1 видно, что для подхода «STS based» алгоритм обеспечивает практически одинаковые эффективности для всех рассмотренных вариантов геометрии TRD. Следует только заметить, что при уменьшении числа слоев растет доля ложных треков.

В испытаниях алгоритма автономного поиска были рассмотрены только три варианта геометрии TRD (см. табл. 2). Так как в TRD нет магнитного поля, то траектория заряженной частицы здесь имеет вид прямой линии, для задания направления которой требуются минимум две точки. Таким образом, в первой TRD станции необходимо иметь два хита с хорошим разрешением по каждой из x -, y -координат. А так как из-за прямоугольной формы ячеек в каждом детектирующем слое мы имеем хорошее разрешение только по одной из x - или y -координат, то первая станция должна содержать минимум четыре слоя.

Из табл. 2 видно, что алгоритм автономного поиска обеспечивает близкие эффективности для всех рассмотренных вариантов геометрии TRD. Таким образом, с учетом эффективности алгоритмов поиска треков оптимальным по стоимости детектора является вариант геометрии 4–2–2.

Для окончательного выбора оптимальной геометрии детектора необходимо исследовать эффективность идентификации частиц с помощью ИНС для различных вариантов геометрии TRD.

3.3. Результаты работы алгоритма идентификации. Результаты работы алгоритма идентификации частиц для стандартной геометрии детектора (4–4–4) приведены на рис. 13. Здесь в логарифмическом масштабе представлены выходные значения ИНС для пионов (сплошная линия) и электронов (пунктирная линия), обученной по методу обратного распространения ошибки [6].

Порог на выходное значение ИНС выбирался исходя из заданного уровня значимости $\alpha = 10\%$ — допустимого уровня потери электронов. На рис. 14 приведены зависимости накопленной вероятности для пионов (сплошная линия) и электронов (пунктирная линия) от величины выходного сигнала сети. Из этих зависимостей можно получить искомое значение порога, которое в нашем случае равняется 0,855. При этом ошибка второго рода $\beta = 0,314\%$, а уровень подавления пионов составляет 318.

На рис. 15 и 16 представлены аналогичные распределения и зависимости для геометрии TRD с шестью детектирующими плоскостями (см. рис. 10, б). Пороговое значение для этого случая равняется 0,3, а фактор подавления пионов составляет только 23.

Результаты тестирования алгоритма идентификации частиц для всех рассмотренных выше вариантов геометрии TRD представлены в табл. 3.

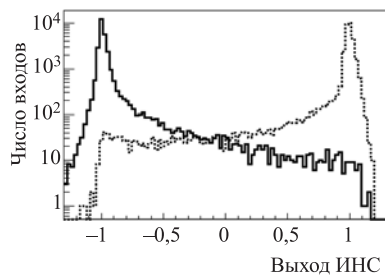


Рис. 13. Гистограмма выходных значений ИНС для пионов (сплошная линия) и электронов (пунктирная линия) для стандартного варианта геометрии (4–4–4) TRD

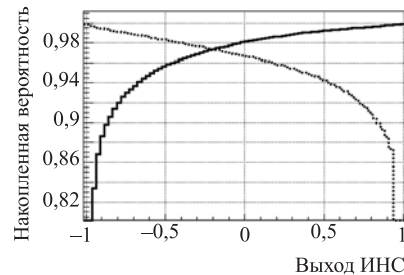


Рис. 14. Зависимости накопленных вероятностей для пионов (сплошная линия) и электронов (пунктирная линия) от величины выходного сигнала ИНС для стандартного варианта геометрии

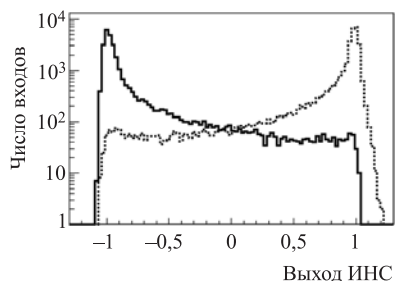


Рис. 15. Гистограмма выходных значений ИНС для пионов (сплошная линия) и электронов (пунктирная линия) для TRD с шестью детектирующими слоями

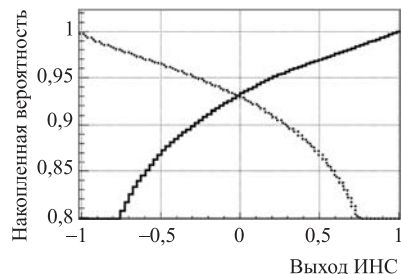


Рис. 16. Зависимости накопленных вероятностей для пионов (сплошная линия) и электронов (пунктирная линия) от величины выходного сигнала ИНС для TRD с шестью детектирующими слоями

Таблица 3. Результаты тестирования алгоритма идентификации частиц для различного количества детектирующих слоев TRD при 10 %-м уровне потерь электронов

Количество детектирующих слоев	12	11	10	9	8	7	6
Подавление пионов	318	250	148	94	57	34	23

Из таблицы видно, что приемлемый уровень подавления пионов (около 100) сохраняется вплоть до девяти детектирующих слоев, что позволяет сэкономить около 25 % от стоимости стандартного варианта TRD.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены первые результаты по оптимизации геометрии детектора переходного излучения для эксперимента CBM. Оптимизация TRD проводилась по пути минимизации числа детектирующих слоев и их расположения в пространстве с целью сокращения финансовых затрат на изготовление детектора. При этом необходимо было обеспечить требуемые эффективности для алгоритмов реконструкции треков, идентификации электронов и подавления пионов.

Были исследованы пять различных вариантов геометрии TRD. С учетом эффективности распознавания треков (для алгоритмов на основе STS-based и автономного подходов) оптимальным по количеству детектирующих слоев и их расположению оказался вариант геометрии 4–2–2. Он позволяет сэкономить примерно 33 % от стоимости стандартного варианта TRD. Однако, как

показал последующий анализ с помощью алгоритма идентификации частиц, такого количества слоев недостаточно для обеспечения требуемого уровня подавления пионов.

Алгоритм идентификации частиц тестировался на электронах и пионах с импульсом 1,5 ГэВ/с, испущенных из первичной вершины. Было показано, что при потере около 10 % электронов приемлемый уровень подавления пионов (около 100) достигается уже при девяти детектирующих слоях, что позволяет сэкономить около 25 % от стоимости стандартного варианта геометрии TRD. В дальнейшем следует выполнить аналогичное исследование для электронов и пионов с импульсами от 1 до 15 ГэВ/с.

Разработанные алгоритмы и программы включены в программную среду эксперимента CBM ROOT [8].

ЛИТЕРАТУРА

1. CBM Collaboration. Compressed Baryonic Matter Experiment. Technical Status Report, GSI, Darmstadt, 2005.
<http://www.gsi.de/documents/DOC-2005-Feb-447-1.pdf>
2. *Lebedev A., Ososkov G.* Track Reconstruction in the CBM TRD. JINR Communication E10-2008-3. Dubna, 2008.
3. GEANT — Detector Description and Simulation Tool, CERN Program Library Long Writeup W5013.
4. *Fruhwirth R.* Application of Kalman Filtering to Track and Vertex Fitting // Nucl. Instrum. Meth. A. 1987. V. 262. P. 444.
5. *Akishina E. P., Akishina T. P., Ivanov V. V., Maevskaya A. I., Afanas'ev O. A.* Electron/Pion Identification in the CBM TRD Using a Multilayer Perceptron. JINR Communication E10-2007-17. Dubna, 2007.
6. *Peterson C., Rognvaldsson Th., Lonndblad L.* JETNET 3.0 — A Versatile Artificial Neural Network Package // Comput. Phys. Commun. 1994. V. 81. P. 185.
7. ROOT — An Object-Oriented Data Analysis Framework, User's Guide V.5.08, December 2005;
<http://root.cern.ch>
8. <http://cbmroot.gsi.de>
9. *Koelberg K. S.* CERN Computer Centre Program Library, G110.

Получено 5 ноября 2008 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 10.12.2008.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,06. Уч.-изд. л. 1,24. Тираж 290 экз. Заказ № 56432.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/