

P13-2008-165

В. В. Глаголев¹, Д. А. Кириллов¹, Г. Мартинска²,
Я. Мушински^{1,2,*}, Н. М. Пискунов¹, Й. Урбан²

**ПОИСК И РЕКОНСТРУКЦИЯ ТРЕКА
В ДРЕЙФОВЫХ КАМЕРАХ НА УСТАНОВКЕ СТРЕЛА**

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

²Университет им. П. Й. Шафарика, Кошице, Словакия

*E-mail: mucha@sunhe.jinr.ru

Глаголев В. В. и др.

P13-2008-165

Поиск и реконструкция трека в дрейфовых камерах
на установке СТРЕЛА

Изучение характеристик дрейфовых камер на экспериментальной установке СТРЕЛА было проведено на пучке ускорительного комплекса нуклотрона ЛФВЭ ОИЯИ. Приводится описание метода поиска и реконструкции трека. Применение дрейфовых камер требует корректного определения $r(t)$ -соотношения с помощью итеративной процедуры автокалибровки. Знание характеристик времякоординатной зависимости позволило улучшить точность пространственного разрешения дрейфовых камер установки СТРЕЛА.

Работа выполнена в Лаборатории физики высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2008

Glagolev V. V. et al.

P13-2008-165

Searching and Reconstruction of the Track in the Drift Chambers
of the STRELA Setup

Investigation of the drift chambers of the STRELA setup was performed in the beam of the Nuclotron accelerator complex of the JINR Laboratory of High Energy Physics. The descriptions of track-finding and reconstruction methods are given. Using of a drift chamber in the experiment needs correct determination of the distance-to-drift time relation $r(t)$. This relation is auto-calibrated by an iterative procedure. Knowledge of the correct relation between the time and space scales allows improving the accuracy of coordinate resolution of the STRELA drift chambers.

The investigation has been performed at the Veksler and Baldin Laboratory of High Energy Physics, JINR.

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

ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальная установка СТРЕЛА предназначена для исследования зарядово-обменных процессов во взаимодействиях дейтронов с протонами [1]. Выбор дрейфовых камер в качестве координатных детекторов спектрометра обусловлен возможностью получения высокого пространственного разрешения и более надежного отбора двух близко проходящих треков.

Применение дрейфовых камер требуется для нахождения соотношения между измеренным временем дрейфа проходящей частицы и его преобразованием в расстояние относительно данной сигнальной проволоочки. Сначала используется «интегральное» преобразование, после чего происходит поиск и реконструкция трека. Для получения более корректного соотношения между временем дрейфа и расстоянием используется итеративная процедура автокалибровки.

Установка СТРЕЛА [2] представляет собой одноплечевой спектрометр, основными элементами которого являются сцинтилляционные счетчики, дрейфовые камеры и анализирующий магнит. На рис. 1 приведена схема расположения дрейфовых камер на выведенном из ускорительного комплекса нуклотрона пучке дейтронов.

В настоящее время используется семь блоков дрейфовых камер. Конструкция и характеристики дрейфовых камер описаны в работах [3–5]. Сигнальные проволоочки (нити) в соседних слоях сдвинуты друг относительно друга на 21 мм. Такое расположение нитей позволяет устранить лево-правую

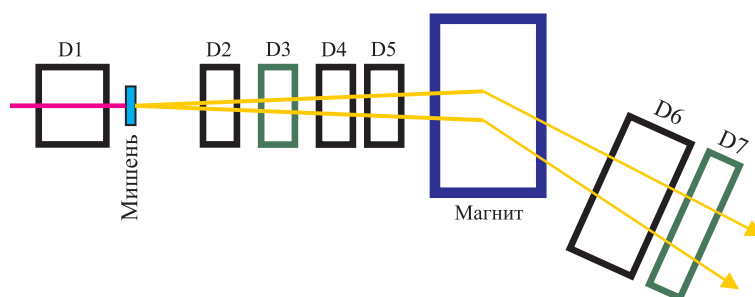


Рис. 1. Схема блоков дрейфовых камер на установке СТРЕЛА

неоднозначность в определении пространственных координат треков частиц. Длина дрейфового промежутка во всех камерах равна 21 мм.

В таблице приведена структура блоков дрейфовых камер, регистрируемая координата (ось z совпадает с направлением пучка дейтронов), количество сигнальных проволочек в каждой плоскости (штриховая координата используется для сдвинутых проволочек).

Конфигурация дрейфовых камер на установке СТРЕЛА

Расположение блока	До мишени															
Номер блока	1															
Координата	y	y'	x	x'	y	y'	x	x'	x	x'	x	x'				
Число проволочек	4	3	4	3	4	3	4	3	4	3	4	3				
Расположение блока	За мишенью															
Номер блока	2			3				4			5					
Координата	y	y'	x	x'	u	u'	v	v'	x	x'	x	x'	y	y'	x	x'
Число проволочек	4	3	4	3	4	3	4	3	4	4	3	3	4	3	4	3
Расположение блока	За магнитом															
Номер блока	6						7									
Координата	y	y'	y	y'	x	x'	x	x'	u	u'	v	v'				
Число проволочек	7	6	7	6	7	6	7	6	7	6	7	6				

До мишени располагается первый блок дрейфовых камер (D1) с размером рабочей области 125×125 мм, имеющий четыре плоскости y -координат и четыре плоскости x -координат. Количество вещества в этом блоке равно $0,141 \text{ г/см}^2$ ($0,008$ радиационной длины) [3]. Первый блок служит для определения треков пучковых дейтронов, падающих на мишень.

За мишенью располагаются четыре блока дрейфовых камер с такими же размерами. Первый блок (D2) имеет две плоскости y -координат и две плоскости x -координат, блок (D3) — из двух плоскостей u -координат и двух плоскостей v -координат. uv -координаты повернуты на $22,5^\circ$ относительно xu -координат вокруг оси z , проходящей через центры блоков камер в направлении падающего пучка. Далее следует блок дрейфовых камер (D4) с четырьмя плоскостями x -координат, и последний блок (D5) имеет две плоскости y -координат и две плоскости x -координат. Такой набор камер после мишени позволяет надежно идентифицировать два близко проходящих трека.

За анализирующим магнитом располагаются два блока дрейфовых камер размером 250×250 мм, первый (D6) имеет четыре плоскости y -координат и четыре плоскости x -координат, а второй блок (D7) — две плоскости u -координат и две плоскости v -координат (повернутых тоже на $22,5^\circ$).

Число всех регистрируемых сигналов с проволочек составляет 162, они поступают на входы модулей TDC с временным разрешением 100 пс. На

камере установлены платы с двумя микросхемами ASD-8, в которых осуществляется усиление, формирование и дискриминация входных сигналов от сигнальных проволочек дрейфовых камер. Такие же платы использовались в системе дрейфовых камер в детекторе Outer Tracker установки HERA-B [6].

ВРЕМЯ ДРЕЙФА

Изучение характеристик дрейфовых камер было проведено при облучении полиэтиленовой мишени пучком дейтронов с импульсом 3,5 ГэВ/с на канале 4В ускорительного комплекса нуклотрона ЛФВЭ ОИЯИ. Интенсивность пучка была порядка $\sim 5 \times 10^5 \text{ с}^{-1}$. Для получения пучка дейтронов интенсивностью не более $10^5 - 10^6 \text{ с}^{-1}$ использовался стальной коллиматор сечением $4 \times 4 \text{ мм}$ и длиной 1,2 м, устанавливаемый в фокусе Ф3 перед поворотным магнитом канала ВП-1.

Блоки камер продувались газовой смесью аргон (72 %) + изобутан (25 %) + этиловый спирт (3 %). Потенциал катодов распределен равномерно от -3 кВ до 0 и обеспечивает напряженность поля $\sim 1,5 \text{ кВ/см}$ вдоль дрейфа электронов. На сигнальную проволочку подается положительный потенциал $+1,65 \text{ кВ}$, на потенциальную $-3,0 \text{ кВ}$.

Временной спектр TDC одного из каналов показан на рис. 2. Минимальное и максимальное время дрейфа (T_{\min} , T_{\max}) для каждого канала (проволочки) определяется фитированием его временного спектра функцией

$$N(t) = p[2] + p[3] \operatorname{erfc} \left[\frac{(t - p[0])}{p[1]\sqrt{2}} \right]$$

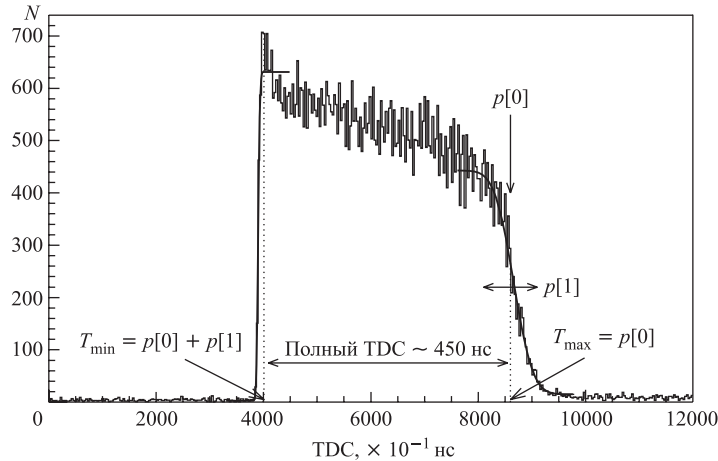


Рис. 2. Временной спектр TDC одной проволочки дрейфовой камеры

отдельно для минимального времени, $T_{\min} = p[0] + p[1]$, и для максимального, $T_{\max} = p[0]$. $\text{Erfc}(x)$ — комплементарная функция ошибки [7]. Параметры $p[2]$ и $p[3]$ можно использовать для качественной проверки фита. Среднее полное время дрейфа составляет ~ 450 нс.

Соотношение между измеренным временем дрейфа и минимальным расстоянием между анодной проволочкой и треком частицы имеет важнейшую роль при реконструкции трека в дрейфовых камерах. Задача состоит в определении функции преобразования времени дрейфа t в расстояние r , так называемое $r(t)$ -отношение, зависящее от многих параметров: напряженности электрического поля, состава газовой смеси, давления, температуры, геометрии дрейфовой камеры [8].

Если предположить, что поток падающих частиц является равномерным, а эффективность во всей области чувствительности проволочки постоянна, то скорость дрейфа можно выразить как

$$v_d(t) = \frac{dr}{dt} = \frac{dr}{dn} \frac{dn}{dt} = \text{const} \frac{dn}{dt}, \quad \text{const} = \frac{dr}{dn} = \frac{R}{N_{\text{tot}}},$$

где R — длина дрейфового промежутка (21 мм), N_{tot} — полное число событий.

Таким образом, функцию преобразования времени дрейфа t в расстояние r можно выразить как

$$r(t) = \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} v_d(t') dt' = \frac{R}{N_{\text{tot}}} \int \frac{dn}{dt'} dt'.$$

Заметим, что $r(t)$ -отношение будет корректироваться (поправляться) в итеративном процессе автокалибровки.

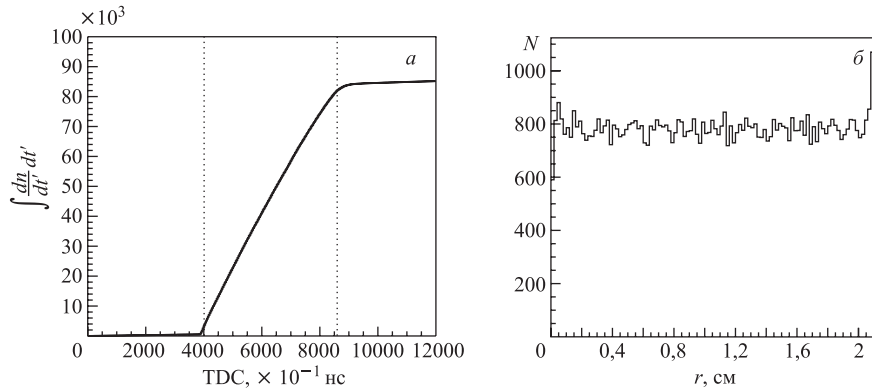


Рис. 3. а) Интегрированное время дрейфа t проволочки из рис.2; б) преобразованное расстояние r между сигнальной нитью и треком

ПОИСК И РЕКОНСТРУКЦИЯ ТРЕКА

Поиск и реконструкция проекции трека происходит отдельно для каждого блока одной плоскости дрейфовых камер. В зависимости от конкретной задачи можно программным путем соединять (или разделять) блоки камер в один мультиблок. В одном блоке (или мультиблоке) должно быть не менее трех слоев сигнальных проволочек для возможности однозначного определения трека.

Последовательность поиска трека в упрощенном виде можно изложить следующим образом:

- а) Поиск пары сработавших проволочек из разных слоев, имеющих наибольшее расстояние. Для пары окружностей, представляющих расстояние проекции трека от сигнальной нити, вычисляются параметры всех четырех касательных, рис.4, а.
- б) Для каждой касательной вычисляется ее расстояние d от окружности сработавших проволочек. Если расстояние больше, чем заданное минимальное $d > d_{\min}$, то сработавшая проволочка отбрасывается (не считается). d_{\min} обычно на порядок больше, чем пространственное разрешение камеры.
- в) Если число сработавших проволочек N_{hits} , удовлетворяющих предыдущему условию, для касательной — не менее заданного N_{\min} , $N_{\text{hits}} \geq N_{\min}$, то касательная переходит в разряд кандидатов в трек. N_{\min} для нашего примера равно 4. Если кандидатов несколько, то оставляется тот, у которого сумма расстояний d минимальна.
- г) Производится реконструкция трека и возвращение к пункту а), поиску последующей пары. Сработавшие проволочки, которые входят в восстановленный трек, не удаляются, и их можно использовать для поиска и реконструкции следующего трека, рис.4, б.

Трек-кандидат используется в процедуре реконструкции трека. Проекцию прямого трека в плоскости, перпендикулярной проволочкам дрейфовой камеры, можно параметризовать как уравнение прямой:

$$z = ax + b$$

с трековыми параметрами a и b , рис.5.

Предположим, что трек имеет N сработавших проволочек с координатами (z_i, x_i) для $i = 1, \dots, N$. Тогда расстояние между треком и i -й проволочкой можно выразить как

$$D_i = \frac{|az_i - x_i + b|}{\sqrt{1 + a^2}}.$$

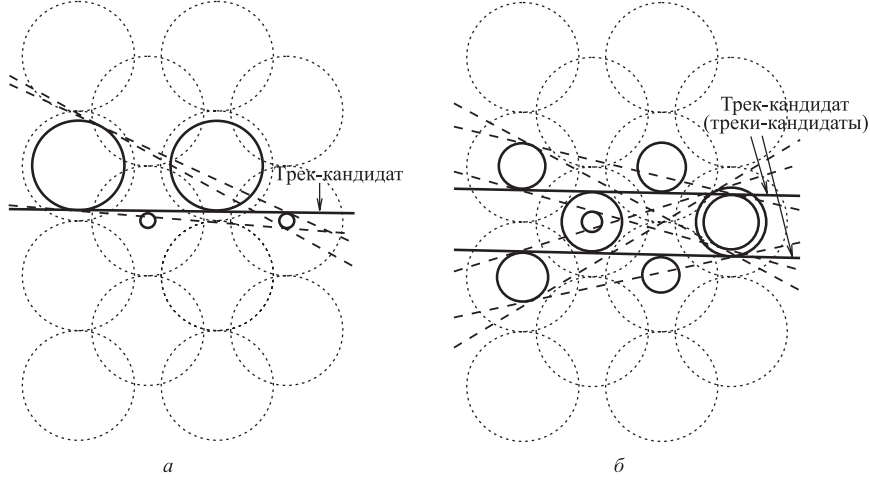


Рис. 4. Пример проекции событий однотрекового (а) и двухтрекового (б) в одной плоскости блока первой дрейфовой камеры, состоящей из четырех слоев проволочек. Штриховые окружности представляют максимальную длину дрейфового промежутка, сплошные — расстояние трека от сигнальной нити. Для визуального изображения дрейфового промежутка используем окружности, центры которых проходят через сигнальные проволочки

Задача реконструкции трека состоит в получении параметров прямой a и b путем минимизации χ^2 -функции:

$$\chi^2 = \frac{1}{N-2} \sum_{i=1}^N [|D_i| - S_i r_i]^2 = \frac{1}{N-2} \sum_{i=1}^N \left[\left| \frac{az_i - x_i + b}{\sqrt{1+a^2}} \right| - S_i r_i \right]^2, \quad (1)$$

где S_i имеет в зависимости от положения трека относительно проволочки значение ± 1 (рис. 5), r_i — расстояние между треком и i -й проволочкой, полученное из функции преобразования времени дрейфа t в расстояние r . Величины параметров a и b получаем решением двух дифференциальных уравнений $\frac{\partial \chi^2}{\partial a} = 0$ и $\frac{\partial \chi^2}{\partial b} = 0$, которые можно решить итеративно. Уравнение (1) можно переписать следующим образом:

$$\chi^2 = \frac{1}{N-2} \sum_{i=1}^N \left[\frac{aZ_i - X_i + b}{\sqrt{1+a^2}} \right]^2, \quad (2)$$

где координаты проволочек (z_i, x_i) заменяем координатами (Z_i, X_i) , которые вычисляются как

$$Z_i = z_i - S_i r_i \frac{a_0}{\sqrt{1+a_0^2}}, \quad X_i = x_i - S_i r_i \frac{1}{\sqrt{1+a_0^2}}. \quad (3)$$

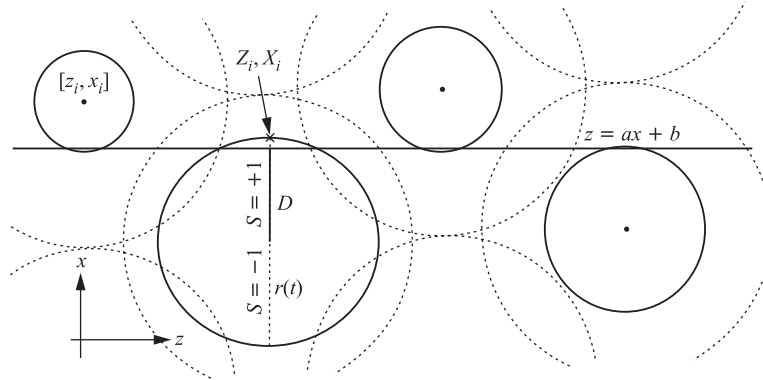


Рис. 5. Определение параметров, используемых при реконструкции трека

Минимизируя χ^2 -функцию (уравнение (2)) методом наименьших квадратов, получаем значения трековых параметров a и b . Величину a_0 в итеративном процессе последовательно заменяем новым значением a . В качестве начального значения a_0 в уравнении (3) используем параметр a из трека-кандидата (касательной). Для частиц, падающих на камеру под небольшими углами, можно принять $a_0 = 0$.

В среднем после двух-трех итераций параметры a и b практически не меняются, и если значение χ^2/ndf меньше заданного, то трек считаем восстановленным.

АВТОКАЛИБРОВКА

Для реконструкции треков необходимо знать отношение между измеренным временем дрейфа и его преобразованием в расстояние, поэтому получение правильного $r(t)$ -отношения является одной из важнейших задач. Итеративную процедуру определения $r(t)$ -отношения с использованием трековой информации называем автокалибровкой [9].

Отметим, что $r(t)$ -отношение, полученное в процессе равномерного облучения частицами дрейфового промежутка, не учитывает неравномерность напряженности электрического поля вдоль траектории дрейфа электронов, а это, в свою очередь, приводит к изменению величины скорости дрейфа и, соответственно, к дифференциальной нелинейности $r(t)$ -отношения. Это возможно в конструкции используемых дрейфовых камер, где напряженность

электрического поля вдоль траектории дрейфа задается резистивной сборкой, резисторы которой имеют разброс в несколько процентов.

Однако можно предположить приблизительно одинаковые условия в камере, для которой выполняется автокалибровка. При необходимости можно программным путем разделить камеры на меньшие или на группы проволочек, для которых предполагаем те же самые условия. Иногда поиск и реконструкция трека происходит в одном блоке (мультиблоке) камер, но процедура автокалибровки прodelывается для каждой камеры отдельно.

На рис. 6 показана зависимость трекового остатка Δr (residual) от времени дрейфа в большой дрейфовой камере. Трековый остаток — это разница

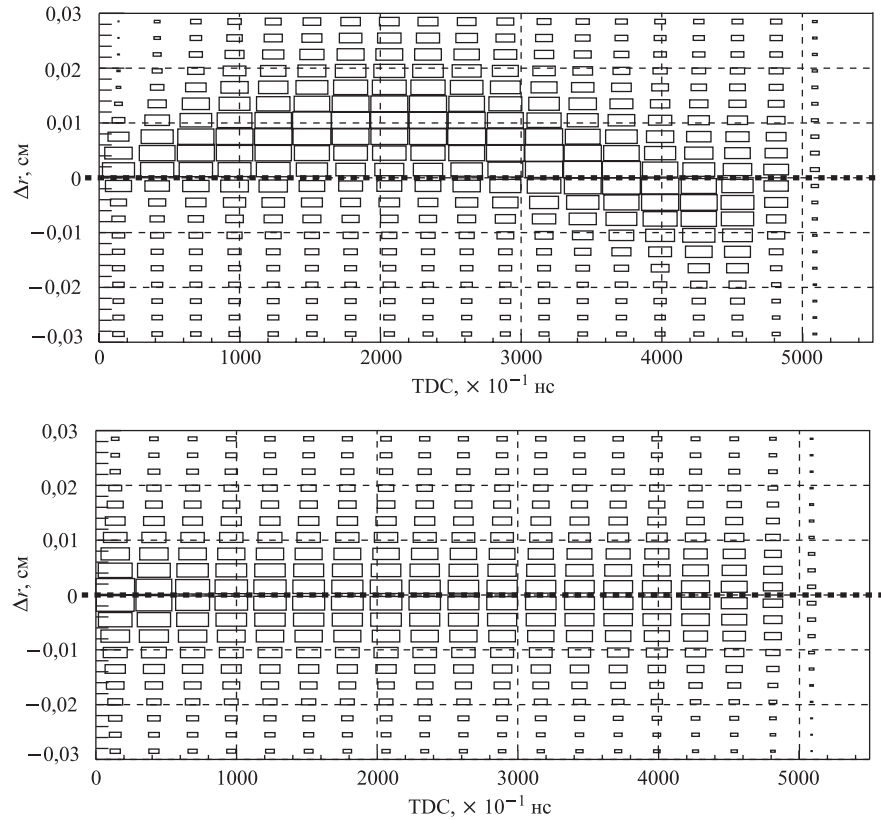


Рис. 6. Зависимость распределения трекового остатка Δr от времени дрейфа t в плоскости xz блока больших дрейфовых камер: *a*) для исходного $r(t)$ отношения (интегральное преобразование времени в расстояние), *б*) после окончательной, четвертой итерации автокалибровки. Размер прямоугольника пропорционален числу событий

между r , полученным преобразованием времени дрейфа t в расстояние, и D — расстоянием восстановленного трека от проволоочки:

$$\Delta r = r - |D|.$$

Распределение трекового остатка (его ширина) в основном определяется разрешением дрейфовой камеры. Тем не менее, Δr можно использовать при решении таких задач, как юстирование, сбалансирование проволочек в блоках (мультиблоках) камер друг относительно друга или для дополнительной оценки минимального и максимального времени дрейфа (T_{\min} , T_{\max}). Ожидаемое среднее значение остатка $\Delta r = 0$.

По горизонтальной оси двумерной зависимости распределения Δr от t рис. 6 отложено время дрейфа с шагом гистограммы 27,5 нс. Шаг выбран так, чтобы получить необходимое число временных интервалов. В нашем примере оно равно 20. Для каждого временного интервала создается проекция трекового остатка Δr . Полученные распределения остатков аппроксимируются распределением Гаусса, среднее значение которого представляет поправку δ_i к текущему $r(t)$ -отношению в каждом i -м временном интервале. Таким

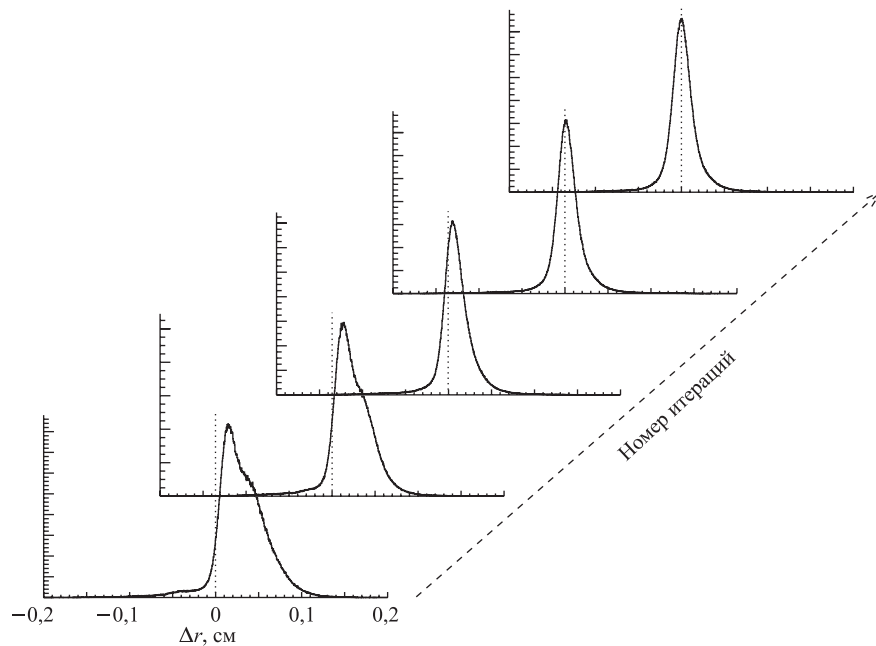


Рис. 7. Изменение распределения трекового остатка Δr в зависимости от номера итерации

образом, получается новая, подправленная функция преобразования времени дрейфа t в расстояние r , с которой вновь выполняется реконструкция трека.

В каждом следующем шаге процедуры автокалибровки $r(t)$ -отношение поправляется в зависимости от предыдущей итерации. Поиск и реконструкция треков проводятся повторно до тех пор, пока значения поправок δ_i для всех временных интервалов стабилизируются (приблизятся к нулевым значениям). В нашем примере число итераций равно 4–5. Как меняется распределение трекового остатка в зависимости от номера итерации, показано на рис.7. Видно, что с ростом номера итерации трековый остаток стремится к нулю, а ширина распределения уменьшается.

Процесс автокалибровки выполняется только с одотрековыми событиями. Желательно, чтобы угловой разброс треков не превышал ~ 100 мрад. Если диапазон наклонов треков, проходящих через камеру, большой, то итеративную процедуру автокалибровки делаем отдельно для разных диапазонов углов наклона, не больше ~ 100 – 150 мрад.

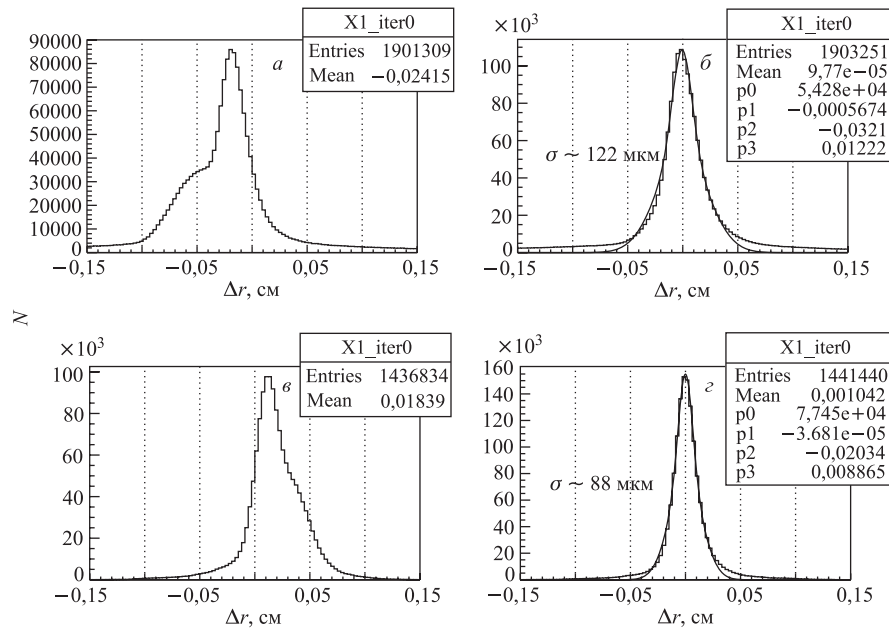


Рис. 8. Распределения трекового остатка Δr в xz -плоскости дрейфовой камеры D1 (а, б) и камеры D6 (в, г). Слева — распределения с исходным интегральным $r(t)$ -отношением, справа — после финальной (четвертой) итерации автокалибровки, фитированные двойным распределением Гаусса

Пространственное разрешение дрейфовой камеры определяется шириной распределения трекового остатка данной камеры. Для вычисления разрешения σ использовалась аппроксимация двойным распределением Гаусса, рис.8. Пространственное разрешение σ дрейфовых камер, используемых на установке СТРЕЛА, лежит в диапазоне $\sim 90-120$ мкм.

Влиянием многократного рассеяния (дейтроны с импульсом 3,5 ГэВ/с) на разрешение можно пренебречь.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты работы можно сформулировать следующим образом:

- Проверена работа всех блоков дрейфовых камер экспериментальной установки СТРЕЛА.
- Создан и протестирован алгоритм для поиска и реконструкции треков в дрейфовых камерах (или трубках).
- Исходный код программы написан полностью в С++ с использованием ROOT-библиотек (универсальность, модульность программы).
- Итеративная процедура автокалибровки улучшает величину пространственного разрешения камер.
- Полученные характеристики трековых детекторов позволяют осуществить исследования зарядово-обменных процессов во взаимодействиях дейтронов с протонами на установке СТРЕЛА.

Данная работа выполнена при поддержке гранта Словакии № 1/4010/07.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Glagolev V. V. et al.* // Cent. Eur. J. Phys. 2008. V. 6(4). P. 781–785.
2. <http://strela.jinr.ru>
3. *Filatova N. A. et al.* // Nucl. Instr. Meth. 1977. V. 143. P. 17–28
4. *Водопьянов А. С. и др.* Препринт ОИЯИ Р13-9351. Дубна, 1975.
5. *Водопьянов А. С. и др.* Препринт ОИЯИ Р1-83-12. Дубна, 1983.
6. <http://www-hera-b.desy.de/subgroup/detector/tracker/outer/>
7. <http://root.cern.ch/root/html/TMath.html#TMath:Erfc>
8. *Пешехонов В.* // ЭЧАЯ. 1986. Т. 17(5). С. 1030–1078.
9. *Amelung Ch.* ATLAS Muon Note, ATL-MUON-2004-020, 2004.

Получено 20 ноября 2008 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 22.01.2009.

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

Усл. печ. л. 0,87. Уч.-изд. л. 1,04. Тираж 310 экз. Заказ № 56468.

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

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/