

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА “СТРЕЛА” ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ЗАРЯДОВО-ОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

© 2013 г. В. В. Глаголев\*, Д. А. Кириллов\*, G. Martinská\*\*,  
J. Mušínský\*, \*\*\*, Н. М. Пискунов\*, J. Urbán\*\*

\*Объединенный институт ядерных исследований, Лаборатория физики  
высоких энергий (ЛФВЭ)

Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6

\*\*Univerzita P.J. Šafárika

Slovensko, 04154 Košice, Šrobárova 2

E-mail: gabriela.martinska@upjs.sk

\*\*\*Ústav experimentálnej fyziky SAV

Slovensko, 04001 Košice, Watsonova 47

Поступила в редакцию 18.07.2012 г.

Описывается экспериментальная установка “Стрела”, предназначенная для исследования зарядово-обменных процессов в дейтрон-протонных столкновениях в области энергий выше 1 ГэВ. Установка представляет собой одноплечевой магнитный спектрометр, основными элементами которого являются дрейфовые камеры. Было проведено тестовое облучение в пучке дейтронов с импульсом 3.5 ГэВ/с на ускорительном комплексе “Нуклотрон” ЛФВЭ ОИЯИ. Разработаны и протестированы на реальных событиях алгоритмы для поиска и реконструкции треков в дрейфовых камерах. Полученное значение пространственного разрешения камер лежит в диапазоне 90–120 мкм, что позволяет осуществить изучение интересующего нас процесса.

DOI: 10.7868/S003281621304006X

### 1. ВВЕДЕНИЕ

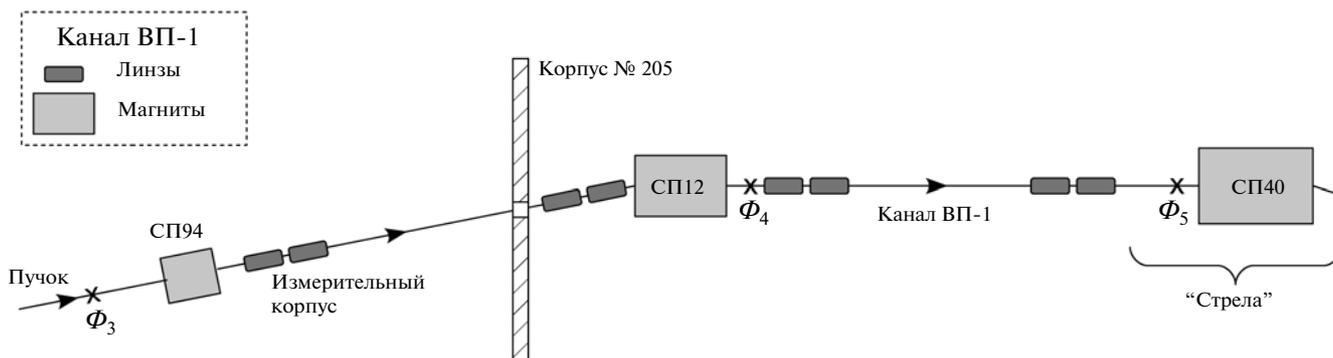
В теории нуклон-нуклонного рассеяния фундаментальное значение имеет извлечение комплексных амплитуд матрицы рассеяния. Для получения всех амплитуд необходим так называемый полный опыт, т.е. опыт с набором экспериментальных наблюдаемых величин, обеспечивающих полное, исчерпывающее описание процесса. Полный эксперимент включает в себя измерения как с поляризованными частицами-снарядами, так и с поляризованными мишенями. Это весьма большая и трудоемкая задача.

Однако в определенных экспериментальных условиях появляется возможность определения отдельных амплитуд матрицы рассеяния либо их совокупности. Одной из возможностей является реакция перезарядки на дейтроне  $dp \rightarrow (pp)n$  с использованием неполяризованных протонов и неполяризованных дейтронов, которая при некоторых условиях определяется только зависящими от спина компонентами амплитуд. При изучении дифференциального сечения этой реакции при малых передачах импульса оказалось возможным оценить спин-зависящую часть амплитуды  $np \rightarrow pn$ -рассеяния в рамках импульсного приближения. Эта идея была предложена и формализована математически в целом ряде теоретических работ

[1–3]. Экспериментально такую серию работ пытались решать, в основном, в пучках сепарированных нейтронов от стриппинга ускоренных дейтронов.

Однако с точки зрения анализа экспериментальных данных опыт с монохроматическими быстрыми дейтронами является более разумным: вторичные два протона – продукты перезарядки дейтрона на протоне, являются быстрыми и вылетают вперед под малыми углами и хорошо регистрируются. Такой эксперимент был выполнен нами на синхрофазотроне ЛФВЭ ОИЯИ с использованием водородной пузырьковой камеры в качестве детектора и мишени одновременно. До наших исследований других экспериментов с пучком быстрых дейтронов практически не было.

На основе анализа полученных в этих опытах экспериментальных данных было определено дифференциальное сечение реакции перезарядки  $(d\sigma/dt)_{dp \rightarrow (pp)n}|_{t=0} = 30.2 \pm 4.1$  мб/(ГэВ/с)<sup>2</sup>. В пучке дейтронов получено отношение  $R_{np \rightarrow pn}$  дифференциальных сечений перезарядки при нулевой передаче импульса ( $t=0$ ) в реакциях  $dp \rightarrow (pp)n$  и  $np \rightarrow pn$ . В рамках импульсного приближения полученное значение  $R_{np \rightarrow pn} = 0.55 \pm 0.08$  свидетельствует о преобладающем вкладе спин-завися-



**Рис. 1.** Канал ВП-1 выведенного пучка из ускорителя “Нуклотрон” с фокусами  $\Phi_3$ – $\Phi_5$ . Транспортировка дейтронного пучка до мишени установки “Стрела” обеспечивается отклоняющими дипольными магнитами и фокусирующими квадрупольными линзами.

шей части сечения  $np \rightarrow pn$ -рассеяния [4] и согласуется с данными других экспериментов в области близких энергий [5].

Изучение реакции перезарядки с помощью камерной методики позволило предложить схему электронного эксперимента для изучения реакции перезарядки на дейтроне в области энергий выше 1 ГэВ. В работе [6] было впервые предложено исследование зарядово-обменных процессов в дейтрон-протонных соударениях на ускорителе “Нуклотрон” с целью изучения спиновых эффектов в неполяризованных пучках дейтронов с помощью электронной методики для получения статистически обеспеченного результата по определению вклада спин-зависящей части амплитуды элементарного  $np$ -рассеяния.

Выбор конкретной геометрии эксперимента был выполнен на основе реальных событий и расчетов методом Монте-Карло с помощью программного пакета GEANT3. Используя в качестве входных данных реальные события  $dp$ -взаимодействий, полученные на водородной пузырьковой камере, был промоделирован вариант эксперимента для спектрометра. Для оценки фоновых условий были взяты все наблюдавшиеся каналы реакций, информация о которых содержится на DST (Data Summary Tape) камерного эксперимента. Фон от других реакций, имитирующих изучаемую реакцию  $dp \rightarrow (pp)n$  с двумя быстрыми вторичными протонами вперед (например,  $dp \rightarrow ppp\pi^0$ ), при ограниченной апертуре оказался пренебрежимо малым [7].

В результате моделирования была предложена схема установки “Стрела” [8] – электронного эксперимента для изучения реакции перезарядки на дейтроне  $dp \rightarrow (pp)n$  с целью определения спин-зависящей части амплитуды элементарной перезарядки  $np \rightarrow pn$ .

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА “СТРЕЛА”

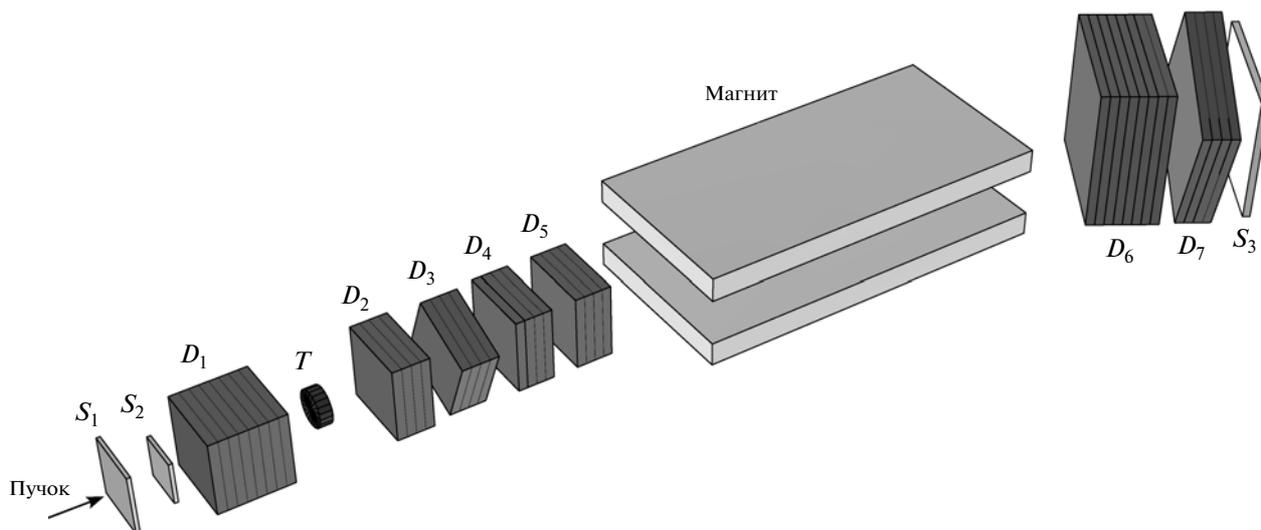
Установка представляет собой одноплечевой магнитный спектрометр. Она расположена в зале корпуса № 205 ЛФВЭ ОИЯИ. Пучок дейтронов, выведенный из ускорителя “Нуклотрон”, транспортируется и фокусируется магнитной оптикой канала ВП-1 на мишень установки, которая находится в области перед фокусом  $\Phi_5$ . Схема канала ВП-1 приведена на рис. 1.

Основными элементами установки “Стрела” являются:

- блоки дрейфовых камер в качестве координатных детекторов;
- электроника считывания информации;
- сцинтилляционные счетчики, используемые для запуска установки;
- анализирующий магнит.

Для определения координат траекторий первичной и вторичных частиц в эксперименте применяются дрейфовые камеры, которые объединяются в блоки. На рис. 2 приведена схема расположения всех блоков дрейфовых камер, анализирующего магнита, мишени и сцинтилляционных (триггерных) счетчиков на выведенном пучке дейтронов из ускорительного комплекса “Нуклотрон”.

В настоящее время используется 36 плоскостей дрейфовых камер, объединенных в 7 блоков. Каждый блок состоит из четырех или восьми объединенных плоскостей дрейфовых камер с различной ориентацией проволочек. Длина дрейфового промежутка во всех камерах равна 21 мм. Камеры в блоке располагаются таким образом, что сигнальные проволочки в соседних плоскостях сдвинуты относительно друг друга на 21 мм в направлении, перпендикулярном оси пучка. Такое расположение нитей позволяет устранить левостороннюю неоднозначность в определении пространственных координат треков частиц.



**Рис. 2.** Схема расположения дрейфовых камер и анализирующего магнита на экспериментальной установке «Стрела».  $D_1–D_5$  – блоки «маленьких» дрейфовых камер с размером рабочей области  $12.5 \times 12.5$  см,  $D_6, D_7$  – блоки «больших» камер с размером  $25.0 \times 25.0$  см;  $S_1–S_3$  – сцинтилляционные счетчики;  $T$  – мишень.

Координатная система дрейфовых камер выбрана следующим образом: ось  $z$  для блоков камер  $D_1–D_5$  направлена по пучку падающих дейтронов, а для блоков  $D_6, D_7$ , помещенных после магнита, – по направлению максимума вылета стриппинговых протонов; оси  $x$  и  $y$  лежат в плоскостях камер так, что вместе с осью  $z$  составляют правую тройку; координаты  $u$  и  $v$  используются для повернутых камер вместо  $x$  и  $y$ .

В таблице приведена структура всех блоков дрейфовых камер с их регистрируемыми координатами и количеством сигнальных проволочек в

каждой плоскости камеры, штриховая координата используется для сдвинутых проволочек.

До мишени располагается первый блок дрейфовых камер  $D_1$  с размером рабочей области  $12.5 \times 12.5$  см, имеющий по четыре плоскости  $x$ - и  $y$ -координат. Первый блок служит для определения треков пучковых дейтронов, падающих на мишень.

За мишенью располагаются четыре блока дрейфовых камер с такими же размерами («маленькие» камеры). Первый из них, блок  $D_2$ , имеет по две плоскости  $x$ - и  $y$ -координат, а второй блок ( $D_3$ ) – по две плоскости  $u$ - и  $v$ -координат. Коор-

Конфигурация блоков дрейфовых камер на установке «Стрела» ( $u, v$ -координаты повернуты относительно  $x, y$ -координат вокруг оси  $z$ ; координаты со штрихом означают сдвинутую плоскость камеры)

Расположение блока	До мишени															
Блок	$D_1$															
Координата	$y$	$y'$	$y$	$y'$	$x$	$x'$	$x$	$x'$								
Число проволочек	4	3	4	3	4	3	4	3								
Расположение блока	За мишенью															
Блок	$D_2$				$D_3$				$D_4$				$D_5$			
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															
Блок	$D_6$ $D_7$															
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				

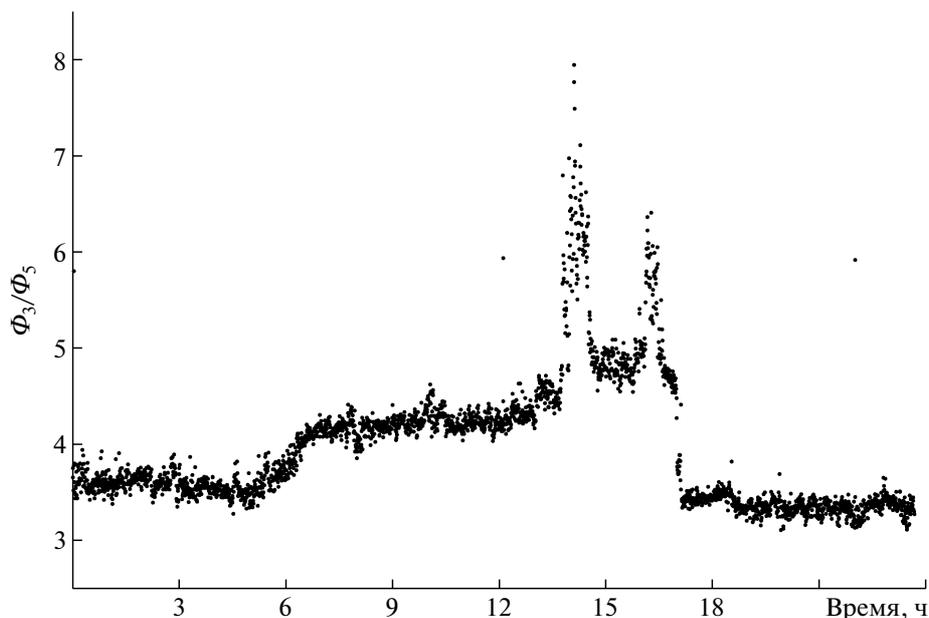


Рис. 3. Изменение интенсивности выведенного дейтронного пучка на канале ВП-1 в течение времени набора данных. Показано отношение счетов ионизационных камер, помещенных в фокусе  $\Phi_3$  и  $\Phi_5$ , в зависимости от времени.

динаты  $u$ ,  $v$  повернуты на  $22.5^\circ$  относительно  $x$ ,  $y$ -координат вокруг оси  $z$ , проходящей через центры блоков камер в направлении падающего пучка. Такой набор камер после мишени позволяет надежно идентифицировать два близко проходящих трека. Далее следует блок дрейфовых камер  $D_4$  с четырьмя плоскостями  $x$ -координат, и последний блок  $D_5$  имеет по две плоскости  $x$ - и  $y$ -координат. Расстояние между центрами двух крайних блоков  $D_2$  и  $D_5$  равно 65 см, между блоком  $D_1$  и  $D_2$ , расположенными до и после мишени, равно 90 см.

За анализирующим магнитом располагаются два блока дрейфовых камер с размерами рабочей области  $25.0 \times 25.0$  см (“большие” камеры). Ось  $z$  данных блоков ( $D_6$ ,  $D_7$ ) повернута на угол  $\sim 14^\circ$  относительно оси  $z$  блоков камер ( $D_1$ – $D_5$ ), которые расположены перед отклоняющим магнитом. Первый из них, блок  $D_6$ , имеет по четыре плоскости  $x$ - и  $y$ -координат, а второй блок ( $D_7$ ) – по две плоскости  $u$ - и  $v$ -координат (повернутых также на  $22.5^\circ$  относительно  $x$ ,  $y$ -координат). Расстояние между центрами блоков дрейфовых камер  $D_6$  и  $D_7$  равно 30 см.

Число всех регистрируемых сигналов с проводов составляет 162. На каждой камере установлены платы с микросхемами, в которых осуществляется усиление, формирование и дискриминация входных сигналов от сигнальных проводов дрейфовых камер. Сформированные сигналы поступают на входы ТДС-модулей (временцифровых преобразователей) для оцифровки. Полученная инфор-

мация передается по оптической линии в персональный компьютер для дальнейшей обработки.

На установке “Стрела” для организации системы сбора экспериментальных данных (DAQ) используется несколько модулей быстрой электроники в формате стандарта VMEbus [9]. Данный стандарт предполагает создание высокопроизводительных вычислительных систем модульного типа на основе унифицированной магистрали. Он обладает достаточной универсальностью и расширяемостью.

ТДС-модули применяются для преобразования (оцифровки) времени сформированных импульсных сигналов с дрейфовых камер. На данный момент используются три ТДС-модуля: один 64-канальный модуль (PhTDC) и два 96-канальных модуля (TDC-96). Данные модули разработаны на базе специализированной интегральной схемы НРТДС [10]. Это 32-канальный чип времяцифрового преобразования с разрешением до 25 пс и с оцифровкой фронта и спада импульсов.

Система запуска установки или отбора событий (триггерная система) должна обеспечить набор событий реакции развала дейтрона при нулевом (близком к нулю) угле рассеяния дейтрона на протоне. В нашем случае регистрируются два протона с близкими импульсами из реакции перезарядки дейтрона на протоне  $dp \rightarrow (pp)n$  (развал дейтрона с зарядовым обменом) и однопротонные события из реакции прямого развала дейтрона  $dp \rightarrow (pn)p$ . Запуск установки осуществлялся с помощью триггерных счетчиков – трех сцинтилля-

ционных счетчиков  $S_1-S_3$  (рис. 2), которые определяют аксептанс установки и вырабатывают сигнал для открытия временного окна регистрации сигналов с дрейфовых камер и запуска системы сбора данных.

Установка “Стрела” расположена в пучке дейтронов с импульсом 3.5 ГэВ/с. Система стабилизации интенсивности выведенного пучка из ускорителя обеспечивает равномерную интенсивность не ниже  $\sim 10^7$  частиц/с. Так как дрейфовые камеры могут работать при интенсивности не больше  $\sim 10^6$  частиц/с, то для уменьшения интенсивности использовался стальной коллиматор с отверстием прямоугольной формы размером  $4 \times 4$  мм и длиной 1.2 м, устанавливаемый в районе фокуса  $\Phi_3$  после поворотного магнита СП94 канала ВП-1 (рис. 1). Применение коллиматора позволило при интенсивности пучка в фокусе  $\Phi_3$  на уровне  $\sim 10^7$  частиц/с обеспечить интенсивность пучка дейтронов на мишени установки в районе фокуса  $\Phi_5$  на уровне не больше  $\sim 5 \cdot 10^5$  частиц/с.

Контроль интенсивности выведенного пучка осуществлялся с помощью ионизационных камер. В процессе набора экспериментальных данных выявилась нестабильность выведенного пучка дейтронов. На рис. 3 приведено отношение счетов с ионизационных камер, расположенных в фокусах  $\Phi_3$  и  $\Phi_5$ , в зависимости от времени набора статистики. Выбросы интенсивности пучка приводили иногда к сбоям работы источников высоковольтного питания дрейфовых камер. Использование коллиматора косвенно решает и задачу получения лучшей временной структуры пучка.

### 3. ВРЕМЯ ДРЕЙФА

Выбор дрейфовых камер в качестве координатных детекторов спектрометра обусловлен возможностью получения высокого пространственного разрешения и более надежного отбора двух близко проходящих треков частиц. Изучение характеристик блоков дрейфовых камер экспериментальной установки “Стрела” было проведено при облучении полиэтиленовой мишени  $\varnothing 5$  см коллимированным пучком дейтронов с импульсом 3.5 ГэВ/с на канале ВП-1 ускорительного комплекса “Нуклотрон” ЛФВЭ ОИЯИ. Аппаратура установки облучалась в течение почти двух суток. В результате облучения аппаратуры было набрано несколько миллионов триггеров для последующего анализа.

Все блоки дрейфовых камер продуваются одинаковой трехкомпонентной газовой смесью аргона (72%), изобутана (25%) и этилового спирта (3%), которая позволяет получить при напряженности электрического поля  $\sim 1.5$  кВ/см режим постоянной скорости дрейфа электронов и высокую

линейную зависимость времени дрейфа от координаты трека почти по всему объему камеры. Закрытая циркуляционная газовая система обеспечивает продув каждого блока камер и выдерживает с достаточной точностью стабильность газовых компонент в смеси. Средняя скорость потока смеси в системе  $\sim 100$  см<sup>3</sup>/мин [11]. С используемой трехкомпонентной смесью достигается стабильная работа камер и высокая эффективность регистрации трековых частиц.

Применение дрейфовых камер требует определения калибровочного 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.

Временной спектр TDC одного из каналов показан на рис. 4. Минимальное и максимальное время дрейфа ( $T_{\min}$ ,  $T_{\max}$ ) для каждого канала (проволоочки) определяется аппроксимацией его временного спектра функцией

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

отдельно для минимального времени —  $T_{\min} = p[0] + p[1]$ , и отдельно для максимального —  $T_{\max} = p[0]$ ; функция  $\operatorname{erfc}(x)$  — дополнительная функция ошибок [12]. Параметры  $p[2]$  и  $p[3]$  можно использовать для качественной проверки фита. Среднее полное время дрейфа составляет  $\sim 450$  нс.

Соотношение между измеренным временем дрейфа и минимальным расстоянием между анодной проволоочкой и треком частицы играет 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 [13].

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

$$v_d(t) = \frac{dr}{dt} = \frac{dr}{dN} \frac{dN}{dt} = \operatorname{const} \frac{dN}{dt}, \quad (2)$$

$$\operatorname{const} = \frac{dr}{dN} = \frac{R}{N_{\text{tot}}},$$

где  $R$  — длина дрейфового промежутка (21 мм);  $N_{\text{tot}}$  — полное число событий;  $dN/dt$  — временное распределение (рис. 4).

Интегрированное время дрейфа от  $T_{\min}$  до  $T_{\max}$  приведено на рис. 5а. Таким образом, функцию

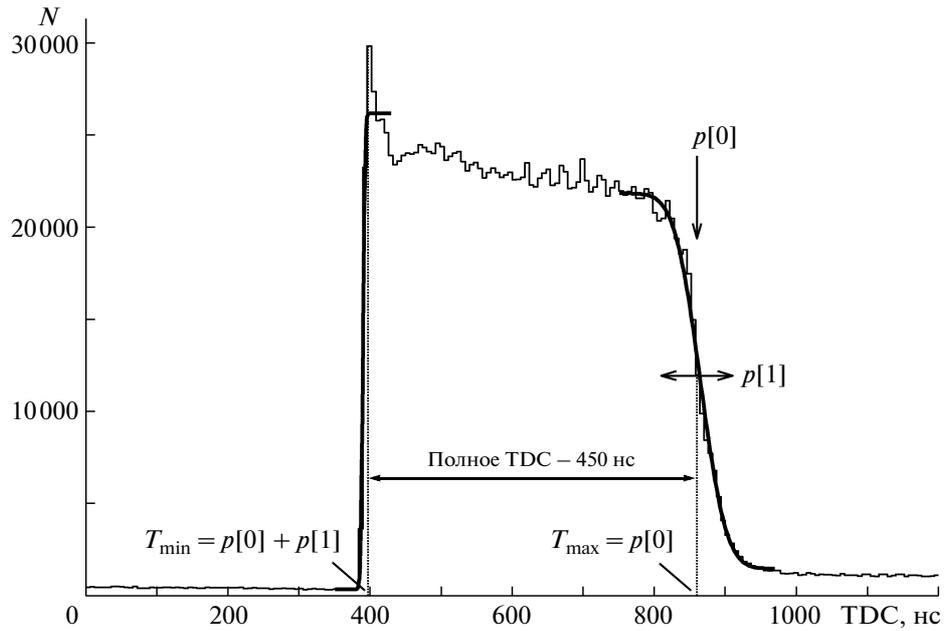


Рис. 4. Временной спектр TDC для одной из проволочек дрейфовой камеры. Полу жирными линиями проведена аппроксимация в области минимального  $T_{\min}$  и максимального  $T_{\max}$  времени функции (1).

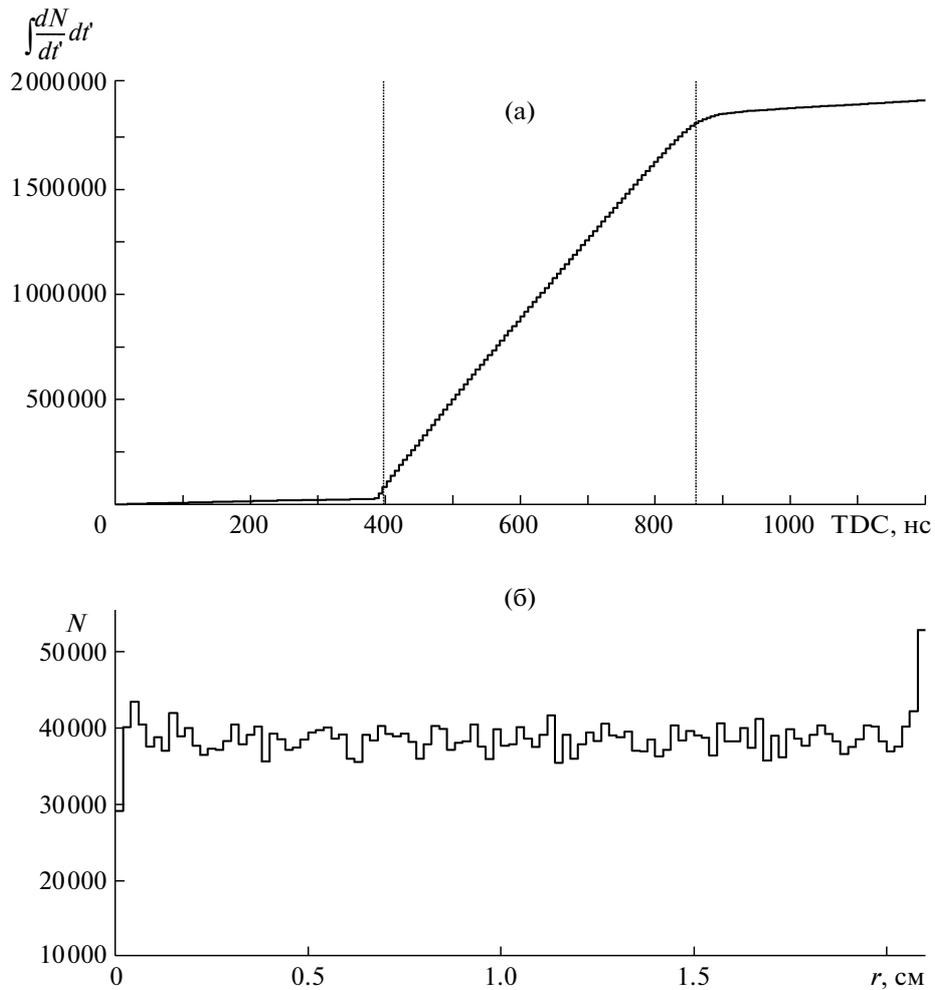
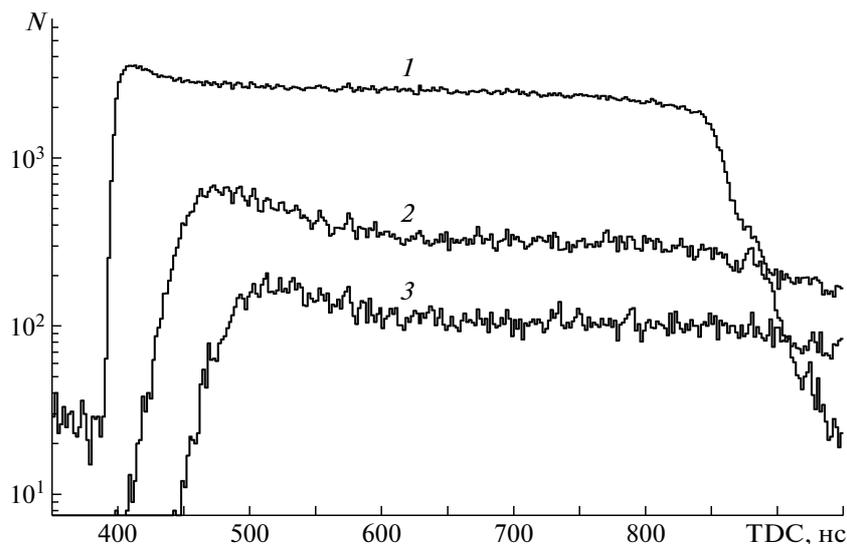


Рис. 5. а – интегрированное время дрейфа  $t$  для проволочки на рис. 4; б – преобразованное расстояние  $r$  между проволочкой и треком.



**Рис. 6.** Распределения TDC для одной из проволочек “маленькой” дрейфовой камеры после прохождения 1-й (1), 2-й (2) и 3-й (3) частицы через нее.

преобразования времени дрейфа  $t$  в расстояние  $r$  можно выразить как

$$r(t) = \int_{T_{\min}}^{T_{\max}} v_d(t') dt' = \frac{R}{N_{\text{tot}}} \int_{T_{\min}}^{T_{\max}} \frac{dN}{dt'} dt'. \quad (3)$$

Заметим, что полученное  $r(t)$ -отношение (рис. 5б) будет корректироваться (поправляться) в итеративном процессе автокалибровки [14].

В связи с тем, что вторичные частицы могли попасть в один и тот же самый дрейфовый промежуток камер, расположенных сразу после мишени, важно определить возможность регистрации двух (или более) временных сигналов с одной проволочки. На рис. 6 показаны распределения времени дрейфа для одной из проволочек “маленькой” камеры после прохождения через нее более чем одной частицы (трека). Видно, что минимальное временное разрешение между следующими друг за другом сигналами порядка 50 нс, что соответствует минимальному расстоянию между треками  $\sim 2$  мм. Такое разрешение удовлетворяет требованиям эксперимента “Стрела”.

#### 4. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ТРЕКОВ В ДРЕЙФОВЫХ КАМЕРАХ

Поиск и реконструкция трека происходит отдельно для каждого блока дрейфовых камер одной плоскости  $xz$ - или  $yz$ -координат. 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. На рис. 7 показан пример двух раз-

ных событий в одной плоскости камеры, состоящей из четырех слоев проволочек, — однострекового (рис. 7а) и двухтрекового (рис. 7б).

В упрощенном виде последовательность поиска трека можно изложить следующим образом:

1. Поиск пары сработавших проволочек из разных слоев камеры, имеющих наибольшее расстояние. Для пары окружностей, представляющих расстояние проекции трека от сигнальной нити, вычисляются параметры всех касательных (рис. 7).

2. Для каждой касательной вычисляются трековые остатки  $\Delta r_i$ , которые можно определить как  $\Delta r_i = r_i - |d_i|$ , где  $r_i$  — расстояние, полученное преобразованием ( $r(t)$ -отношение) времени дрейфа  $t_i$ , а  $d_i$  — расстояние трека (касательной) от  $i$ -й проволочки (рис. 8). Если такое расстояние больше заданного минимального  $|\Delta r_i| > \Delta r_{\min}$ , то сработавшая проволочка не учитывается;  $\Delta r_{\min}$  обычно на порядок больше, чем пространственное разрешение камеры.

3. Если число сработавших проволочек  $N_{\text{hits}}$  камеры, удовлетворяющих предыдущему условию для касательной, не менее заданного  $N_{\text{hits}} \geq N_{\min}$ , то касательная переходит в разряд кандидатов на трек. Для нашего примера  $N_{\min}$  равно 4 (рис. 7а). Если кандидатов несколько, то оставляется тот, у которого сумма расстояний  $\Delta r_i$  минимальна (рис. 7б).

4. Производится реконструкция трека и возвращение к первому пункту, т.е. поиску последующей пары в данном блоке дрейфовой камеры. Сработавшие проволочки, которые вошли в восстановленный трек, не удаляются, и их можно использовать для поиска и реконструкции следующего трека.

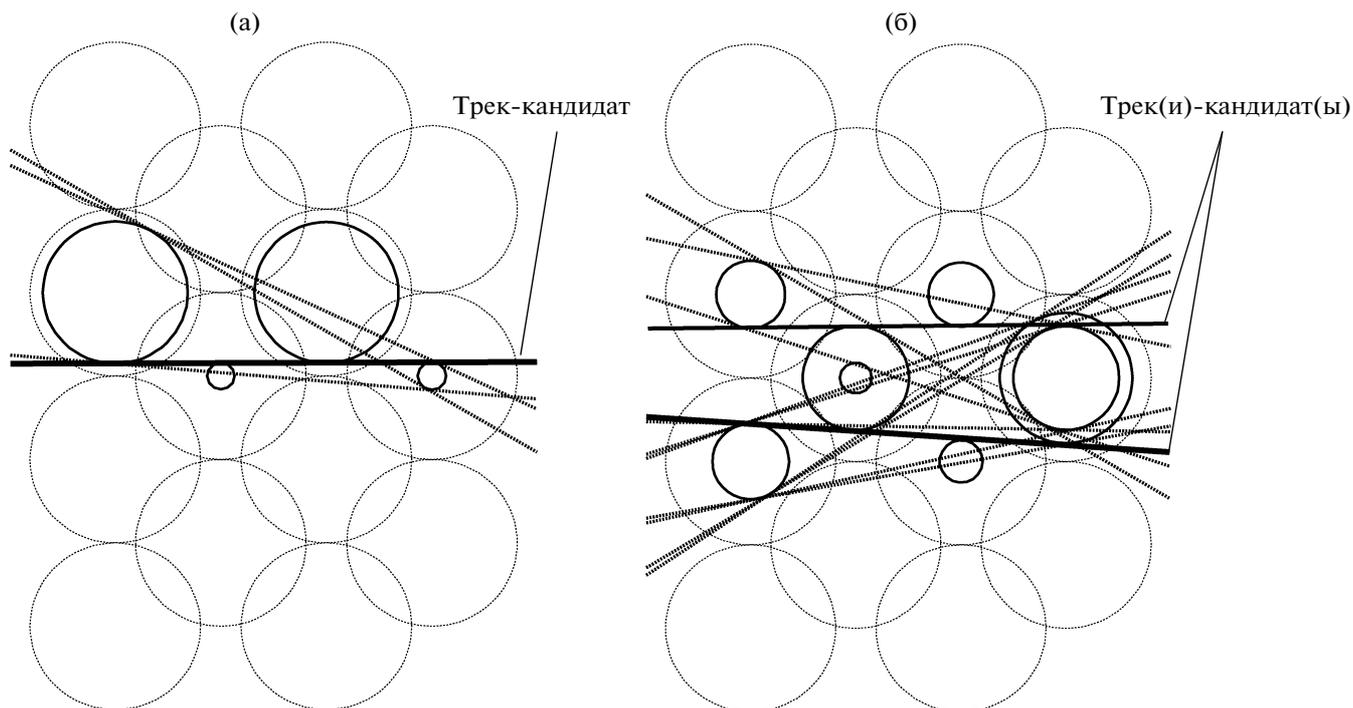


Рис. 7. Пример проекции однотрекового (а) и двухтрекового (б) событий (сплошные прямые линии) в одной плоскости блока первой дрейфовой камеры, состоящей из четырех слоев проволочек. Для визуального изображения дрейфового промежутка используются окружности, центры которых проходят через сигнальные проволочки. “Пунктирные” окружности представляют максимальную длину дрейфового промежутка, “сплошные” – расстояние трека от сигнальной нити. Пунктирные прямые линии – касательные, не удовлетворяющие критериям отбора.

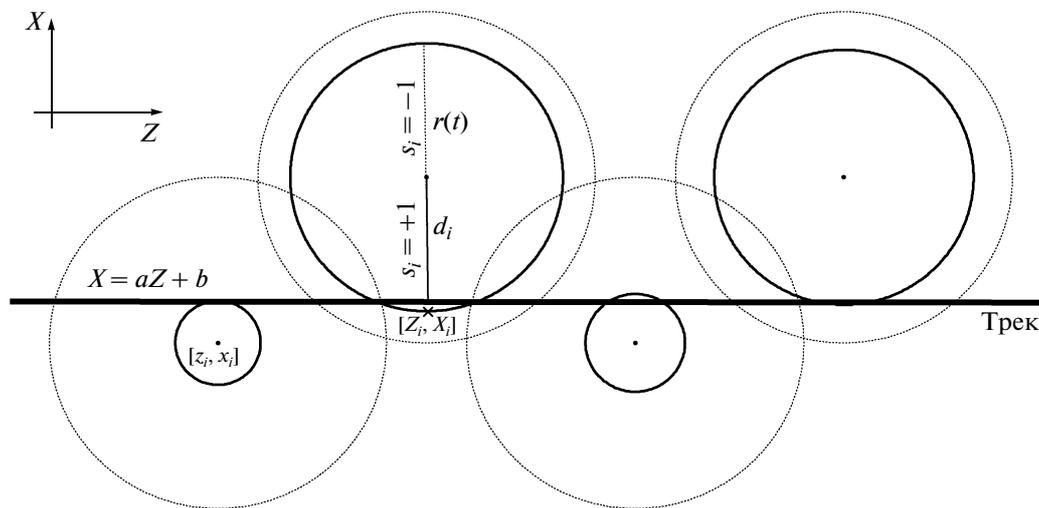


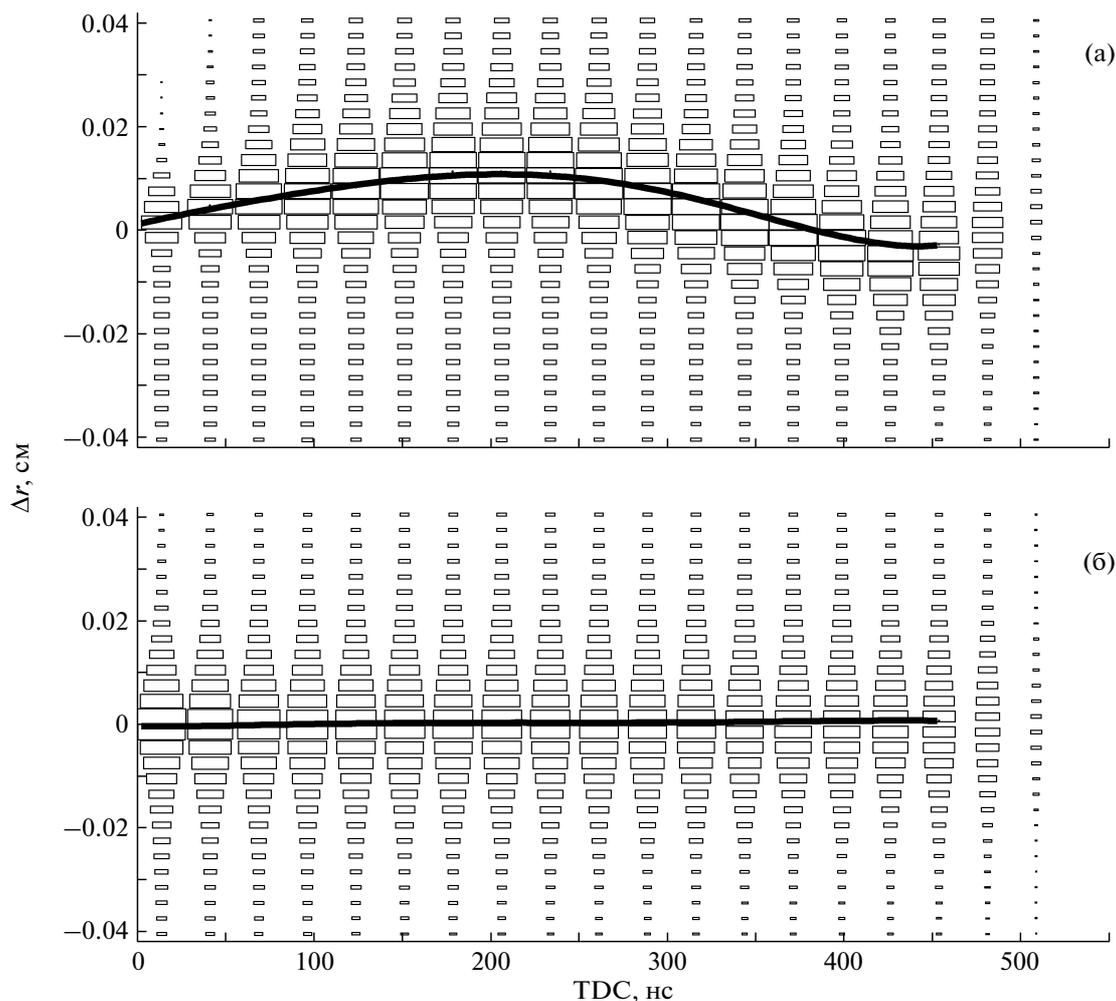
Рис. 8. Определение параметров, используемых при реконструкции трека в блоке дрейфовой камеры.

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

$$X = aZ + b \tag{4}$$

с параметрами  $a$  и  $b$  (рис. 8).

Предположим, что трек имеет  $N$  сработавших проволочек с координатами  $(z_i, x_i)$  для  $i = 1, \dots, N$ .



**Рис. 9.** Зависимость распределения трекового остатка  $\Delta r$  от времени дрейфа  $t$  в одной плоскости блока больших дрейфовых камер: **а** – исходное  $r(t)$ -отношение (интегральное преобразование времени в расстояние); **б** – после окончательной, четвертой, итерации автокалибровки. Размер прямоугольника пропорционален числу треков. Сплошная линия – аппроксимация средних значений трекового остатка для каждого временного интервала.

Тогда расстояние между треком и  $i$ -й проволочкой можно выразить как

$$d_i = \frac{az_i - x_i + b}{\sqrt{1+a^2}}. \quad (5)$$

Задача реконструкции трека состоит в получении параметров прямой  $a$  и  $b$  путем минимизации  $\chi^2$ -функции

$$\begin{aligned} \chi^2 &= \frac{1}{N-2} \sum_{i=1}^N [d_i - s_i r_i]^2 = \\ &= \frac{1}{N-2} \sum_{i=1}^N \left[ \left| \frac{az_i - x_i + b}{\sqrt{1+a^2}} - s_i r_i \right|^2 \right], \end{aligned} \quad (6)$$

где  $s_i$  имеет в зависимости от положения трека относительно проволочки значение  $\pm 1$  (рис. 8),  $r_i$  – расстояние между треком и  $i$ -й проволочкой, полученное из функции преобразования времени

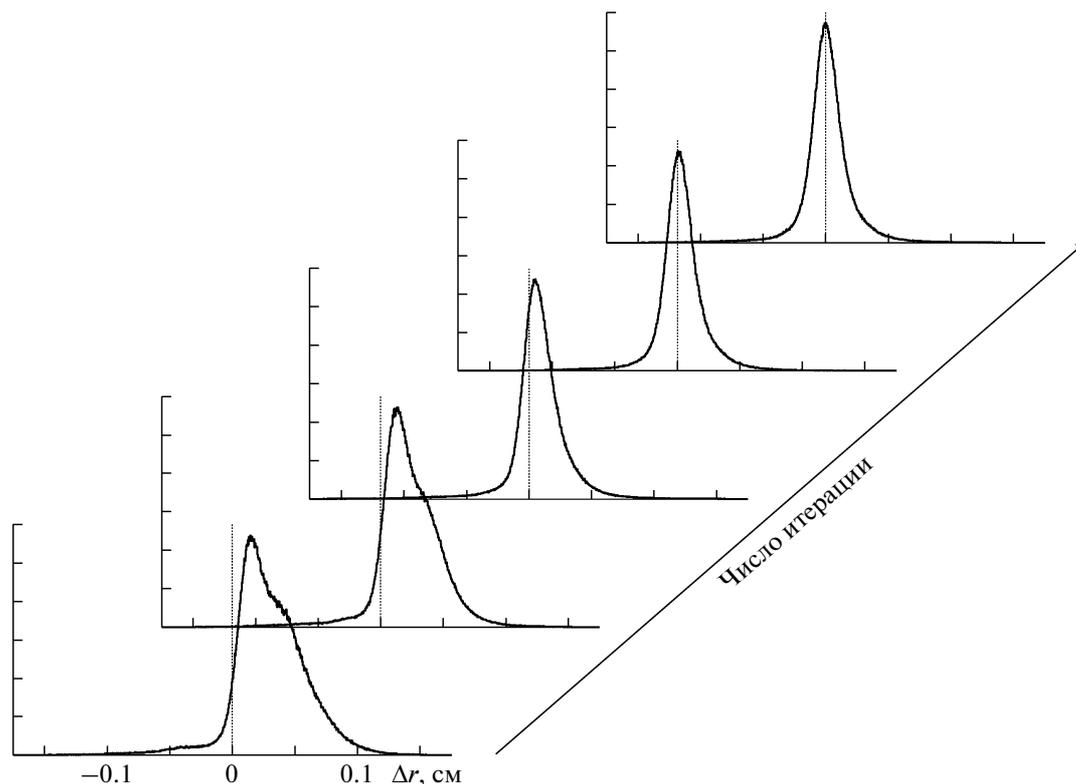
дрейфа  $t$  в расстояние  $r$ . Величины параметров  $a$  и  $b$  получаем итеративным решением двух дифференциальных уравнений  $\partial\chi^2/\partial a = 0$  и  $\partial\chi^2/\partial b = 0$ . Уравнение (6) можно переписать следующим образом:

$$\chi^2 = \frac{1}{N-2} \sum_{i=1}^N \left[ \frac{aZ_i - X_i + b}{\sqrt{1+a^2}} \right]^2, \quad (7)$$

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

$$Z_i = z_i - s_i r_i \frac{a_0}{\sqrt{1+a_0^2}}, \quad X_i = x_i + s_i r_i \frac{1}{\sqrt{1+a_0^2}}. \quad (8)$$

Минимизируя  $\chi^2$ -функцию (7) методом наименьших квадратов, получаем значения трековых параметров  $a$  и  $b$ . Величина  $a_0$  в итеративном процессе последовательно заменяется новым значением  $a$ . В качестве начального значения  $a_0$  в урав-



**Рис. 10.** Изменение распределения трекового остатка  $\Delta r$  в зависимости от номера итерации, начиная с нулевой, в блоке “больших” дрейфовых камер.

нении (8) 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  $\chi^2/ndf$  ( $ndf$  – число степеней свободы) меньше заданного, то трек считаем восстановленным.

### 5. АВТОКАЛИБРОВКА

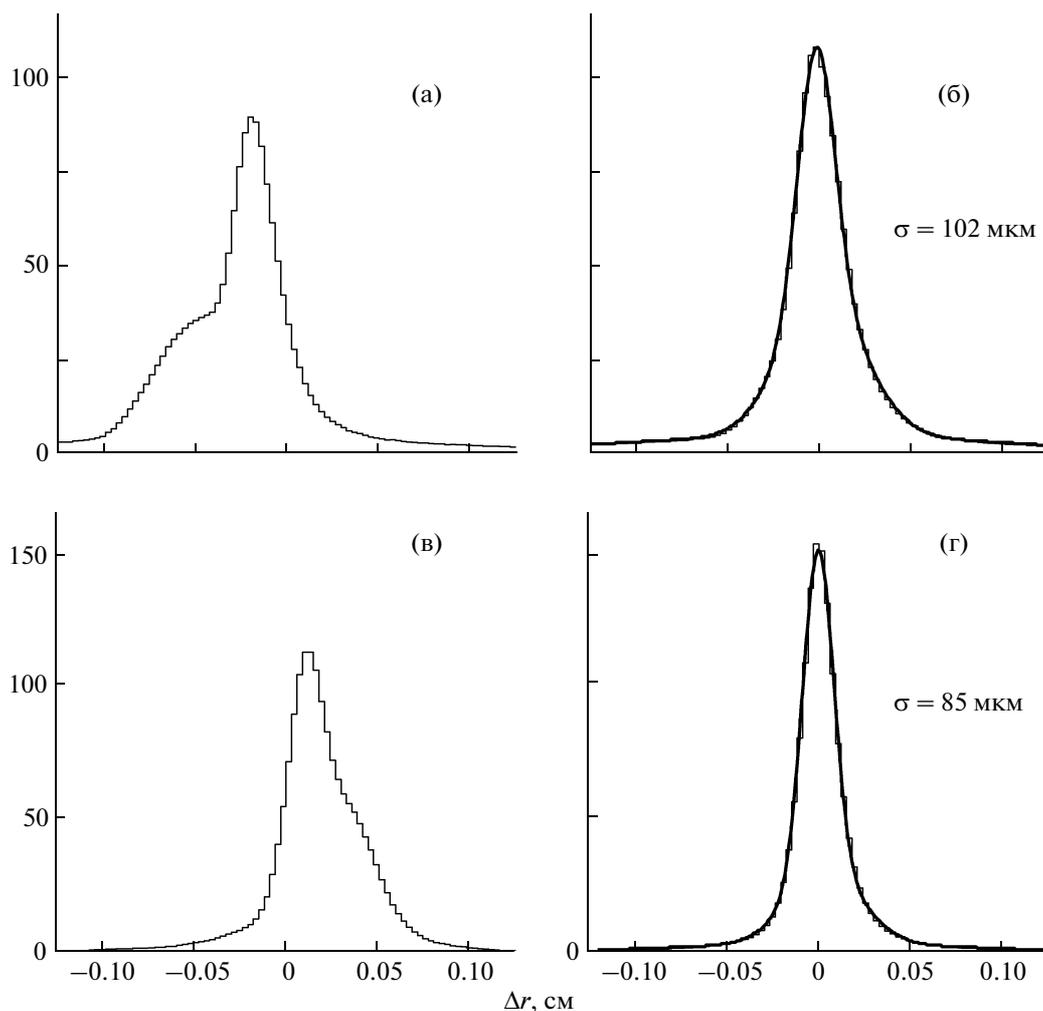
Для реконструкции треков необходимо знать отношение между измеренным временем дрейфа и соответствующим расстоянием, и поэтому получение правильного  $r(t)$ -отношения является одной из важнейших задач. Итеративную процедуру определения  $r(t)$ -отношения с использованием трековой информации называем автокалибровкой [15, 16].

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 траек-

тории 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 предполагаются те же самые условия. Иногда поиск и реконструкция трека происходят в одном блоке (мультиблоке) камер, но процедура автокалибровки выполняется для каждой камеры отдельно.

На рис. 9 показана зависимость трекового остатка  $\Delta r$  от времени дрейфа в большой дрейфовой камере – исходное  $r(t)$ -отношение (рис. 9а) и после окончательной, четвертой, итерации автокалибровки (рис. 9б). Распределение трекового остатка (его ширина) в основном определяется пространственным разрешением дрейфовой камеры. Тем не менее,  $\Delta r$  можно использовать при решении таких задач, как юстировка проволочек в блоках (мультиблоках) камер относительно друг друга или для дополнительной оценки минимального и максимального времени дрейфа ( $T_{\min}$ ,  $T_{\max}$ ). Ожидаемое среднее значение трекового остатка  $\Delta r \cong 0$ .



**Рис. 11.** Распределения трекового остатка  $\Delta r$  в  $xz$ -плоскости дрейфовых камер  $D_1$  (а, б) и  $D_6$  (в, г): а и в — с исходным интегральным  $r(t)$ -отношением; б и г — после окончательной, четвертой, итерации автокалибровки, аппроксимированные двумя гауссианами.

По горизонтальной оси двумерной зависимости распределения  $\Delta r$  от  $t$  на рис. 9 отложено время дрейфа с шагом гистограммы 27.5 нс. Шаг выбран таким, чтобы получить необходимое число временных интервалов. В нашем примере оно равно 20. Для каждого временного интервала создается проекция трекового остатка  $\Delta r$ . Полученные распределения остатков аппроксимируются распределением Гаусса, среднее значение которого представляет поправку  $\delta_i$  к текущему  $r(t)$ -отношению в каждом  $i$ -м временном интервале. Таким образом, получается новая, скорректированная, функция преобразования времени дрейфа  $t$  в расстояние  $r$ , с которой вновь выполняется реконструкция трека.

В каждом следующем шаге процедуры автокалибровки  $r(t)$ -отношение корректируется в зависимости от предыдущей итерации. Поиск и реконструкция треков проводится повторно до тех пор, пока значения поправок  $\delta_i$  для всех времен-

ных интервалов стабилизируются (приблизятся к нулевым значениям). Для получения удовлетворительной точности обычно хватает 4–5 итераций. В нашем примере число итераций равно 4. Как меняется распределение трекового остатка в зависимости от номера итерации показано на рис. 10. 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 в камере не превышал  $\sim 100$  мрад. Если диапазон наклонов треков, проходящих через камеру, большой, то итеративная процедура автокалибровки выполняется отдельно для разных диапазонов углов наклона. Область изменения угла наклона не должна превышать  $\sim 100$ – $150$  мрад.

Пространственное разрешение дрейфовой камеры определяется шириной распределения треко-

вого остатка данной камеры. Для вычисления разрешения  $\sigma$  использовалась аппроксимация двумя гауссианами (рис. 11). Пространственное разрешение дрейфовых камер, используемых на установке “Стрела”, лежит в диапазоне  $\sim 90$ – $120$  мкм для больших (рис. 11б) и маленьких камер (рис. 11г) соответственно. Влиянием многократного рассеяния (дейтроны с импульсом 3.5 ГэВ/с) на разрешение можно пренебречь.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На базе установки “Стрела” создан спектральный комплекс для изучения реакции перезарядки в пучках дейтронов. Применение дрейфовых камер и их пространственное разрешение позволяют идентифицировать два протона из реакции с обменом заряда на дейтроне. Полученные характеристики трековых детекторов позволяют осуществить исследование зарядово-обменных процессов во взаимодействиях дейтронов с протонами на установке “Стрела”. Описанная в работе установка эксплуатируется с 2007 года.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Померанчук И. // Докл. АН СССР. 1951. № 78. С. 249.
2. Chew G.F. // Phys. Rev. 1950. V. 80. P. 196.
3. Dean N.W. // Phys. Rev. D. 1972. V. 5. P. 2832.
4. Glagolev V.V., Martinská G., Mušinský J. et al. // Cent. Eur. J. of Phys. 2008. V. 6. P. 781.
5. Sharov V.I., Morozov A.A., Shindin R.A. et al. // Eur. Phys. J. A. 2009. V. 39. P. 267.
6. Glagolev V.V., Hlaváčová J., Kacharava A.K. et al. // Proc. of the XIII Intern. Seminar on HEP Problems. Dubna, 2–7 September 1996. V. 1. P. 179.
7. Bazylev S.N., Glagolev V.V., Hlaváčová J. et al. // Proc. of the Intern. Workshop Relativistic Nuclear Physics: From Hundreds MeV to TeV. Slovak Republic, Stara Lesna, 14–18 June 1999. V. 2. P. 51.
8. <http://strela.jinr.ru>
9. Parkman C.F. // VMEbus at CERN – A brief review. 1985.
10. Christiansen J. // Tech. Rep. CERN/EP–MIC. 2004.
11. Filatova N.A., Turgun S.N., Nigmanov V.P. et al. // Nucl. Instrum. and Methods. 1977. V. 143. P. 17.
12. <http://root.cern.ch/root/html/TMath.html#TMath: Erfc>
13. Пешехонов В.Д. // ЭЧАЯ. 1986. Т. 17. С. 1030.
14. Glagolev V.V., Martinská G., Mušinský J. et al. // Proc. of the Intern. Workshop Relativistic Nuclear Physics: From Hundreds MeV to TeV. Slovak Republic, Stara Lesna, 5–11 June 2009. 2010. P. 164.
15. Bacci C., Bini C., Ciapetti G. et al. // Nucl. Phys. 1997. V. 54. P. 311.
16. Petrucci F. // Nucl. Science Symp. Conf. Record. IEEE. 2005. V. 1. P. 153.