

РЕКОНСТРУКЦИЯ ТРЕКОВ В ДЕТЕКТОРЕ НА ДРЕЙФОВЫХ КАМЕРАХ И ТРУБКАХ МОДИФИЦИРОВАННОЙ УСТАНОВКИ ФОДС НА УСКОРИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ У-70

© 2019 г. М. Ю. Боголюбский^а, А. А. Волков^а, Д. К. Елумахов^а, А. А. Иванчиков^а,
А. Ю. Калинин^а, А. Н. Криницын^а, В. И. Крышкин^а, Н. В. Кулагин^а, Д. И. Паталаха^а,
К. А. Романишин^а, В. В. Скворцов^а, В. В. Талов^а, Л. К. Турчанович^{а,*}

^а Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”
– Институт физики высоких энергий им. А.А. Логунова
Россия, 142281, Протвино, Московской обл., площадь Науки, 1

*e-mail: Leonid.Turchanovich@ihep.ru

Поступила в редакцию 05.12.2018 г.

После доработки 26.03.2019 г.

Принята к публикации 31.03.2019 г.

Описана процедура нахождения траекторий заряженных частиц на установке ФОДС (фокусирующий двухплечевой спектрометр), которая включает в себя калибровку каналов ($r(t)$ -зависимость) дрейфовых детекторов для вычисления координат частиц и реконструкции треков. Рассмотрена организация временных измерений и построения на их основе функционала метода наименьших квадратов. Обсуждаются критерии отбора кандидатов в треки. Разработана процедура получения геодезических поправок на физических событиях для дрейфовых камер и трубок. Получены точности измерения координат в дрейфовых камерах 600 мкм и камерах на дрейфовых трубках – 500 мкм. Приведено распределение траекторий частиц в мишень.

DOI: 10.1134/S0032816219050057

ВВЕДЕНИЕ

Установка ФОДС (фокусирующий двухплечевой поворотный спектрометр) [1, 2] была создана для исследования образования заряженных адронов с большими поперечными импульсами p_T в протон-протонных (pp) и протон-ядерных (pA) взаимодействиях на ускорительном комплексе У-70 НИЦ “Курчатовский институт”–ИФВЭ (Протвино). Каждое плечо установки имеет в своем составе анализирующий магнит, за которым расположена трековая система, два сцинтилляционных годоскопа, спектрометр колец черенковского излучения [3] и адронный калориметр [4] с последующим мюонным фильтром. Положение центра тяжести пучка на мишени измеряется с помощью ионизационных профилометров [5].

Для реализации программы исследования редких процессов с большими поперечными импульсами [6] апертура установки и скорость записи данных должны быть заметно увеличены. Для этого проведена модернизация установки: более чем в 3.5 раза увеличена апертура магнита и спектрометра колец черенковского излучения, задействована более современная регистрирующая электроника, созданы быстродействующая система сбора данных [7] и новая трековая система,

в состав которой включены камеры на дрейфовых трубках. Аппаратура установки ФОДС также используется в эксперименте по изучению образования адронов и ядерных фрагментов (в том числе и в кумулятивной области) в адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействиях [8].

Данная работа посвящена описанию методов реконструкции событий в модифицированной установке ФОДС. Рассматриваемые решения подходят и для других установок с дрейфовыми детекторами, в частности, они применялись в измерениях на мюонном томографе [9].

ПОСТАНОВКА ИЗМЕРЕНИЙ. ТРЕКОВЫЕ ДЕТЕКТОРЫ УСТАНОВКИ

Результаты, представленные в данной работе, получены в измерениях процессов с большими p_T , выполненных на протонном пучке с импульсом 50 ГэВ/с и интенсивностью 10^8 с⁻¹ ускорительного комплекса У-70. Пучок размером 1 см по горизонтали и 0.5 см по вертикали попал на ядерные мишени, установленные перед анализирующим магнитом ФОДС. Плечи спектрометра выставлены симметрично под углами $\pm 11.4^\circ$ в горизонтальной плоскости относительно направле-

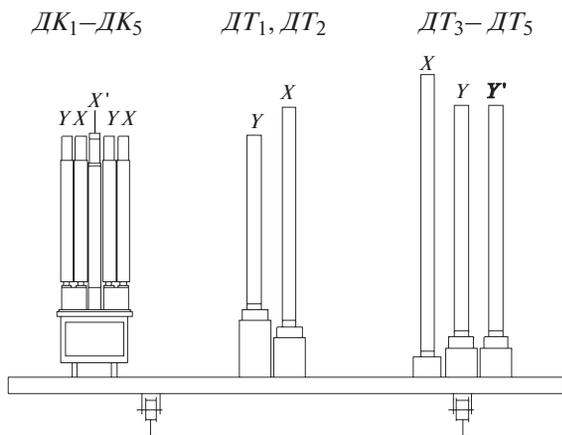


Рис. 1. Схема расположения трековых детекторов в плечах установки ФОДС. $ДК_1-ДК_5$ – дрейфовые камеры; $ДТ_1-ДТ_5$ – камеры из дрейфовых трубок. X, Y – измеряемые координаты, X' и Y' соответствуют наклонным плоскостям. Поток вторичных частиц падает слева направо.

ния распространения пучка, что соответствует углу вылета 90° вторичных π -мезонов в системе центра масс. Координатная точность детектора должна составлять 1 мм по горизонтали и 0.5 мм по вертикали, что обеспечит ошибку измерения поперечного импульса не хуже 1%. Статистическая ошибка в эксперименте равна $\sim 3\%$.

Трековая система одного плеча установки ФОДС (рис. 1) включает в себя 5 дрейфовых камер $ДК$ размером 500×500 мм (задается выходной апертурой магнита) и 5 дрейфовых камер $ДТ$ из алюминиевых трубок. Выходная $ДТ$ размером 900×1320 мм задает апертуру установки. $ДК$ состоят из двух плоскостей [10], а $ДТ$ – из трех [11, 12]. Общее число плоскостей $ДК$ спектрометра ФОДС равно 20, число каналов – 320. Общее число плоскостей $ДТ$ составляет 30, число каналов – 1200.

В измерениях используется правая ортогональная система координат X, Y, Z , начало которой расположено в центре мишени. Ось Y направлена вертикально вверх, ось Z – по оси плеча в направлении от мишени. Трековые детекторы определяют X -, Y -координату частиц и расположены на базе 3 м в каждом плече установки после анализирующего магнита. Третья дрейфовая камера и пятая камера из дрейфовых трубок повернуты в XY -плоскости на угол 6° и служат для сшивки проекций треков в пространстве. Детекторы каждого плеча установлены на подвижных платформах, обеспечивающих вращение по окружности с центром в мишени.

Конструкция $ДК$ и их характеристики детально описаны в работе [10]. Камеры с распределенным потенциалом имеют модульную структуру. Одна из двух плоскостей $ДК$ для решения левоправой неопределенности смещена на ширину

дрейфового промежутка. Диаметр сигнальных проволок $ДК$ равен 20 мкм, дрейфовый промежуток составляет 32 мм.

Дрейфовые трубки имеют диаметр 30 мм, длина их равна 1 и 1.3 м, толщина стенок – 0.4 мм. Количество трубок варьируется в зависимости от размера рабочей зоны камер. Диаметр анодной проволоки равен 50 мкм. Средняя плоскость смещена на 15 мм относительно двух других. Дрейфовые трубки были разработаны и изготовлены в НИЦ “Курчатовский институт” – ИФВЭ (Протвино) [11, 12]. Подобные трубки использовались ранее при изготовлении камер для эксперимента ATLAS на Большом адронном коллайдере (ЦЕРН, Швейцария) [13]. Они находят широкое применение не только на ускорителях, но и в других физических установках. В ИФВЭ на их основе разработаны мюонные томографы на космическом излучении [9, 14, 15].

Трековая система установки ФОДС работает в достаточно сложных фоновых условиях. Большая загрузка детекторов частицами возникает из-за высокой интенсивности пучка, падающего на мишень, и прямой видимости мишени детекторами плеч установки. Для определения рабочих параметров $ДТ$ (состав газа, пороги усилителей, высокое напряжение) проводились детальные исследования временных и амплитудных характеристик сигналов с трековых детекторов [16]. Изучались зависимость времени дрейфа электронов в дрейфовых трубках или ячейках дрейфовых камер, а также формы регистрируемых сигналов в зависимости от состава газа и напряжения на сигнальных проволочках. Кроме того, эффективность регистрации прохождения заряженных частиц зависела от величины порога на усилителях каждого канала детекторов. По результатам исследования для $ДТ$ была выбрана газовая смесь, состоящая из 93% Ag и 7% CO_2 , пороги усилителей приняты равными 1.1 мкА, напряжение – 2075 В. Такой же состав газовой смеси используется и для $ДК$. В работе [17] приведены данные по числу рожденных пар ионов на 1 см пути для частицы с минимальной ионизирующей способностью. Для указанных газов оно составляет соответственно 94 и 91 $см^{-1}$.

Сигналы с усилителей $ДТ$ [18] и $ДК$ [19] по витым парам длиной 50 м поступали соответственно на входы времяцифровых преобразователей ($ВЦП$) ЛЭ-95 [20] (стандарт LVDS) и ЛЭ-81 [21] (стандарт NIM). Дискретность измерения времени в обоих случаях равна 2 нс. Информация с установки вычитывалась со скоростью 10^4 событий в секунду при помощи программы [7], созданной на платформе MIDAS. Триггер для запуска каждого плеча установки вырабатывался совпадением сигналов с трех сцинтилляционных счетчиков и адронного калориметра [4].

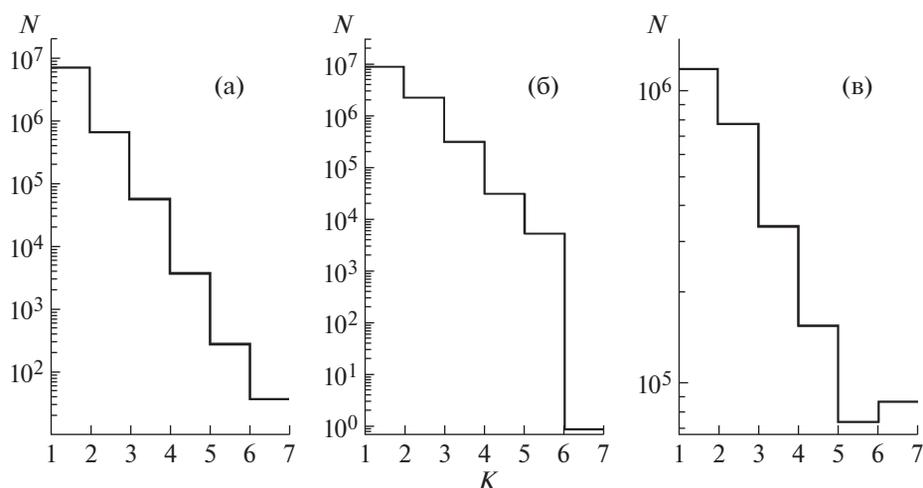


Рис. 2. Распределение количества зарегистрированных импульсов K в одном канале ВЦП: а – для дрейфовых камер; б – для дрейфовых трубок; в – для годоскопов.

В каждом плече ФОДС были установлены по два годоскопа, регистрирующие X - и Y -координату частиц и помогающие отбирать события при реконструкции треков.

ВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

В процессе измерений времени дрейфа в трековых детекторах ВЦП запоминают все поступающие с детекторов сигналы до момента прихода команды *Смон*. В качестве этой команды используется триггерный сигнал, задержанный на 750 нс. Все зарегистрированные импульсы оцифровываются с выдачей времени t_c , отсчитываемого от момента получения команды *Смон*. На рис. 2 показано распределение числа зарегистрированных импульсов в одном канале для дрейфовых камер, дрейфовых трубок и годоскопов.

После временной привязки к триггеру проводится калибровка детекторов, цель которой – определение временных задержек каналов, а для дрейфовых детекторов – нахождение полного времени дрейфа и функциональной зависимости времени дрейфа от координат прохождения частицы. Временная задержка каналов определяется началом роста гистограммы (с учетом подложки) распределения времени t в данном канале, а полное время дрейфа – шириной распределения. Типичные временные спектры сигналов с одного из каналов дрейфовых камер, дрейфовых трубок и годоскопа показаны соответственно на рис. 3а, 3б и 4.

Для определения времени задержки сигнала T_0 (с учетом времени пролета от мишени до детектора) на представленных временных спектрах передний склон распределения аппроксимировался функцией Вудса–Саксона с подложкой:

$$f(x) = p_0 / (1 + \exp(n(p_1 - x))) / p_2 + p_3, \quad (1)$$

где p_0, p_1, p_2 – подгоняемые параметры; $n = 1$ – фиксированный параметр. Величина T_0 определялась после нахождения параметров функции по формуле

$$T_0 = p_1 - nK_0p_2 \quad (2)$$

с коэффициентом K_0 , равным 0.01 и 1.1 соответственно для дрейфовых камер и трубок.

Значение K_0 находилось из требований наличия одного пика и его симметричности в распределениях отклонений измеренных координат точек, фиксированных в ДК и ДТ. Аналогично функцией (1) описывался задний склон распределения, но с другим значением фиксированного параметра, $n = -1$. В результате находилась величина T_1 – значение, соответствующее концу заднего склона временного спектра. Величина T_1 вычислялась по формуле (2), в левой части которой T_0 заменялось на T_1 . Время дрейфа определялось как разность

$$T_d = T_1 - T_0. \quad (3)$$

Калибровка каналов дрейфовых детекторов состояла в определении для каждого канала как задержки сигнала T_0 и времени дрейфа T_d , так и $t(r)$ -зависимости. Для определения последней использовалась полиномиальная аппроксимация 4-го порядка:

$$F(r) = c_1r + c_2r^2 + c_3r^3 + c_4r^4, \quad (4)$$

где r – расстояние от центра проволоки до траектории частицы.

Процедура калибровки основана на анализе временных спектров каждого канала по методу, взятому с некоторыми модификациями из работы G. Avilio и др. [22]. Метод основан на том, что засветка частицами плоскости детектора равно-

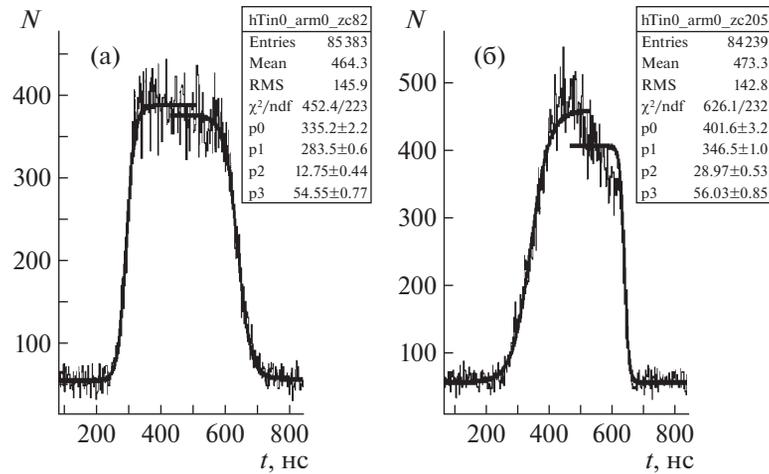


Рис. 3. Временные спектры сигналов с одного из каналов дрейфовых камер (а) и дрейфовых трубок (б); сплошные кривые – результат фита переднего и заднего склонов функцией Вудса–Саксона с подложкой в соответствии с выражением (1).

мерная – $dN/dr = \text{const}$, а скорость дрейфа v с временным спектром связана соотношением $dN/dt = v(dN/dr)$.

В программе реконструкции есть также второй метод калибровки $t(r)$ -зависимости каналов. В отличие от калибровки по временным спектрам, он требует режима реконструкции треков, в ходе которой накапливаются гистограммы распределений средних значений $\langle t(r) \rangle$, аппроксимируемых полиномом (4). Данная процедура должна быть повторена в виде итераций несколько раз. Указанный метод калибровки применялся нами в измерениях на мюонном томографе [9].

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТРАЕКТОРИИ ЧАСТИЦ

За исключением геодезических погрешностей, существуют четыре наиболее важных фактора, которые определяют точность восстановления параметров трека:

– погрешность измерения времени за счет его оцифровки в ВЦП:

$$\sigma_d = T\sqrt{2/12}, \quad (5)$$

где $T = 2$ нс – шаг оцифровки (множитель 2 под корнем обусловлен оцифровкой как времени срабатывания канала, так и временной метки триггера);

– отклонение траектории частицы за счет многократного рассеяния, вычисляемое по стандартной формуле [23, 24]

$$\sigma_m = \frac{13.6 \text{ МэВ}}{\beta p} \sqrt{d(1 + 0.038 \log(d))(L/\sqrt{3})}, \quad (6)$$

где $\beta = P/E$ (здесь P , МэВ и E , МэВ – соответственно импульс и энергия частицы), $d = \sum l_i/x_i$,

$L = \sum l_i$ (здесь l_i и x_i – соответственно длина и радиационная длина слоя вещества (сумма берется по всем слоям));

– временная погрешность σ_n за счет флуктуаций из-за пуассоновского распределения разрывов между кластерами ионизации [25]:

$$\sigma_n = \frac{l_0^2}{v(r + \sqrt{r^2 + l_0^2})}, \quad (7)$$

где l_0 – среднее расстояние между кластерами ионизации, r – расстояние от траектории до сигнальной проволоки ($l_0 = 400$ мкм [26]), v – скорость дрейфа; видно, что вклад данной компоненты падает с ростом r ;

– координатная погрешность за счет диффузии электронов:

$$\sigma_f = \sqrt{D_f r/v}, \quad (8)$$

где D_f – коэффициент диффузии; вклад диффузии увеличивается с ростом r .

ФУНКЦИОНАЛ МЕТОДА НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ ДЛЯ РЕКОНСТРУКЦИИ ТРЕКОВ ПО ВРЕМЕННЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ

Прямолинейные траектории частиц зададим в виде неявных функций $f(x, z)$ и $g(y, z)$ соответственно в плоскостях XZ и YZ . Потребуем, чтобы функции для DT принимали вид нормальных уравнений. Последнее выполнимо, если сумма квадратов коэффициентов функции $f(x, z)$ при переменных x и z , а также сумма квадратов коэффициентов функции $g(y, z)$ при переменных y и z равнялись единице [27]. В результате имеем:

$$\begin{aligned} f(x, z) &= (b_x + k_x(z - z_0) - x)d_x = 0, \\ g(y, z) &= (b_y + k_y(z - z_0) - y)d_y = 0, \end{aligned} \quad (9)$$

где коэффициенты b_x, b_y, k_x, k_y – параметры траектории; z_0 – координата 1-й плоскости сигнальных проволочек камер; $d_x = d_y = 1$ для ДК, а для ДТ

$$d_x = 1/\sqrt{1 + k_x^2}, \quad d_y = 1/\sqrt{1 + k_y^2}. \quad (10)$$

Уравнение прямой линии в нормальном виде замечательно тем, что при подстановке в функции $|f(x, z)|$ или $|g(y, z)|$ координат произвольной точки на плоскости получается величина r , которая фигурирует в $t(r)$ -зависимости канала (4).

Остановимся на процедуре вычисления величины χ^2 для траектории частицы. В общем случае в дрейфовых детекторах на треке имеем m координат, т.е. массив измерений состоит из m чисел t_1, t_2, \dots, t_m , характеризующих времена регистрации сигналов. Соответственно погрешности этих величин обозначим как $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_m$. Время взаимодействия t_0 определяется сцинтилляционными счетчиками. В триггерном режиме эта величина фиксируется как $t_0 = 0$, а в бестриггерном варианте – это фитируемый параметр. Функционал метода наименьших квадратов для определения параметров b_x, k_x, b_y, k_y траектории частицы имеет вид:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^m (t_i - t_0 - F(r_i))^2 / \sigma_i^2. \quad (11)$$

В бестриггерном режиме величину t_0 можно получить из требования экстремума функционала $d\chi^2/dt_0 = 0$:

$$t_0 = \frac{\sum_{i=1}^m (t_i - F(r_i)) / \sigma_i^2}{\sum_{i=1}^m 1 / \sigma_i^2}. \quad (12)$$

Далее удобно ввести 4-компонентный вектор $x = \{b_x, k_x, b_y, k_y\}$ и рассмотреть вектор малых поправок dx_j к x , где $j = 1, 2, 3, 4$. Проведем программно разложение функционала (11) по параметрам dx_j с точностью до членов 2-го порядка малости включительно. Приравнивая к нулю производные от функционала по компонентам вектора поправок, получим систему из четырех линейных уравнений для определения величин dx_i .

АЛГОРИТМ РЕКОНСТРУКЦИИ ТРЕКОВ ПО ДАННЫМ С ДРЕЙФОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ

Алгоритм реконструкции треков по данным с дрейфовых детекторов включает несколько ста-

дий: выделение временного кластера, выделение линейных кластеров-дорожек, нахождение кандидатов в треки, вычисление параметров треков. Отметим, что в рассматриваемом алгоритме мы не прибегаем к переборке каналов, так же как и к способу выделения множества коротких сегментов из сработавших каналов с последующей попыткой сшивки их в единый трек [28]. Это обусловлено тем, что в нашем эксперименте имеется большой вклад фоновой загрузки, а эффективность срабатывания отдельных каналов составляет ~90%.

Выделяемый временной кластер образуется набором таких данных t_i с детектора, что разности пар $t_i - t_j$ будут находиться в разрешенном временном окне. В триггерном режиме t_j представляет собой время отметки триггера. Ширина временного окна связана с полной длительностью дрейфа (около 400 нс).

Далее учитываются лишь каналы, сигналы с которых попадают в рассмотренный выше временной кластер. Используемый набор данных на этом этапе состоит только из множества координат центров каналов (анодных проволок), которые обозначим как x_i . Линейный кластер (фактически “дорожка”) образуется набором таких каналов, для которых отклонение координаты x_i от оси кластера не превышает половины размера ячейки. Ось кластера задается линейной функцией, параметры которой определяются методом наименьших квадратов. Далее поиск кандидатов в линейные кластеры проводится для каждой проекции перебором с шагом 5 мм точек на двух базовых плоскостях, соединяемых прямой линией. В качестве базовых плоскостей используются первая и последняя плоскости плеча, с которых сигналы попадают во временной кластер. Если на базовых плоскостях имеется только по одному сработавшему каналу, то переборки начинаются с дорожки, проходящей через эти каналы.

Каждый канал может попасть в произвольное число кандидатов в линейные кластеры. Последние вступают между собой в конкуренцию на основе общего количества точек, количества совпадающих точек, значения χ^2 , а также ряда обрезаний, таких как разрешенный наклон оси кластера (определяется апертурой магнита) и максимальное по модулю отклонение относительно мишени.

Из отобранных линейных кластеров определяются кандидаты в треки. На этом этапе учитывается как координата каждого канала x_i , так и множество временных сигналов t_j в нем. Поиск кандидатов в треки проводится перебором с шагом 1.5 мм крайних точек линейного кластера на двух базовых плоскостях, соединяемых затем прямой линией. Точка (x_i, t_j) причисляется к треку, если

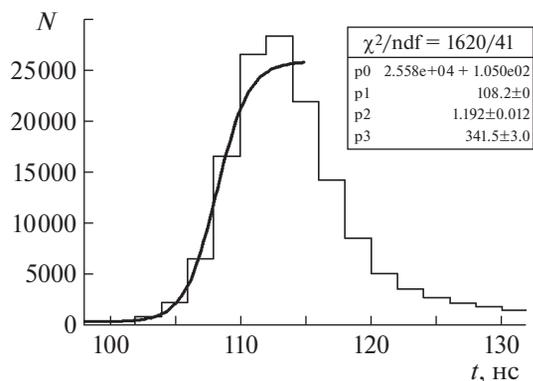


Рис. 4. Временные спектры сигналов с одного из каналов сцинтилляционного годоскопа; сплошная кривая — результат фита переднего склона функцией Вудса—Саксона с подложкой в соответствии с выражением (1).

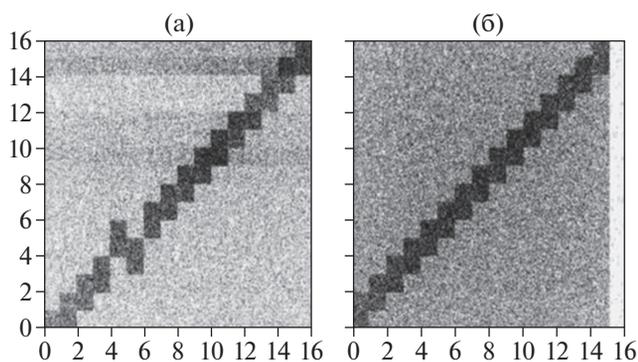


Рис. 5. 2D-корреляционный график каналов двух плоскостей (по осям абсцисс и ординат отложены локальные номера каналов данной плоскости): **а** — ошибка в подсоединении каналов № 4 и № 5; **б** — нет ошибок.

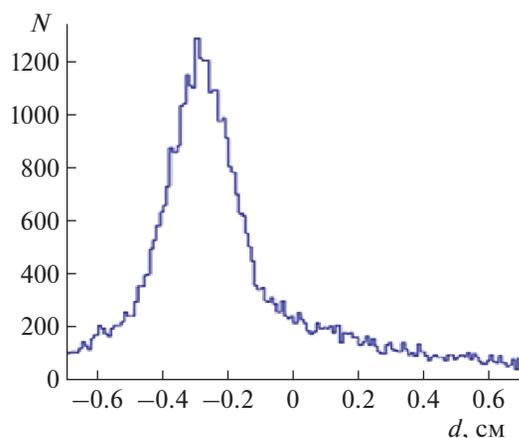


Рис. 6. Распределение отклонений d между фитированной координатой точки на треке и измеренной для плоскости дрейфового детектора, учтены все сравтававшие каналы на плоскости.

ее отклонение от трека не превышает размера дрейфового промежутка, а разность между x -координатой попадания трека в ячейку и аналогичной координатой, вычисляемой из времен дрейфа, не превышает заданной ширины дорожки. Ширина последней была выбрана равной 2 мм. Это несколько больше шага перебора, что обеспечивает перекрытие возможных кандидатов.

Для каждого кандидата вычислялся функционал χ^2 с учетом временных измерений. Кандидаты также вступали между собой в конкуренцию на основе количества точек, количества совпадающих точек, значения χ^2 , а также уже упомянутых обрезаний на разрешенный наклон трека и смещения относительно центра мишени. Заметим, что точки считаются совпадающими только при равенстве как координат x_i , так и глубины памяти, из которой извлекается временной отсчет.

Параметры кандидатов в треки определялись методом наименьших квадратов с минимизацией функционала (11), учитывающего временные измерения. Сначала такая процедура проводилась для вертикальной и горизонтальной проекций отдельно, а затем осуществлялась пространственная сшивка с учетом точек наклонных плоскостей.

Перечислим используемые критерии выделения треков:

- общее число точек на проекциях не менее четырех;
- на каждой проекции как в камерах, так и в трубках имеется не менее одной точки;
- число точек в наклонных плоскостях на пространственном треке не менее двух;
- время образования трека, вычисленное по формуле (12), отличается от времени триггера не более чем на 60 нс.

Заметим, что окончательное решение о величинах обрезаний на треке можно принять позже, при анализе реконструированных данных.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ПОПРАВК

Привязка дрейфовых детекторов установки ФОДС в пространстве проведена посредством специальных геодезических измерений. Точность измерения по вертикали равна 0.1 мм, она влияет на точность определения импульса частиц, с такой точностью изготовлены и сами ДК и ДТ. По осям x и z точность измерений составила 1 мм. Юстировка детекторов осуществлялась посредством специальных приспособлений.

Отклонения координат реальной геометрии установки от расчетной выявляются в процессе физического эксперимента. Это обуславливает необходимость определения по физическим дан-

ным соответствующих поправок к первоначальным геодезическим измерениям. Для позиционирования каждого детектора установки в пространстве необходимы шесть параметров: x , y , z — положение элемента характерной его точки (центра) и три угла Эйлера. Полное число геодезических параметров N_s в современных экспериментах может быть очень большим [29, 30]. Для уменьшения числа N_s можно выделить из геодезических значений те поправки, которые наиболее существенны для улучшения точности результатов, а для остальных принять геодезические измерения без изменений. На установке ФОДС, как и в работе [31], фиксируются геодезические измерения z -координат плоскостей детектора (вдоль оси плеча), а также принимается, что плоскости детекторов выставлены идеально вертикально, т.е. перпендикулярно направлению оси плеча. Поправки определяются для x - или y -координаты центра плоскости, а также для угла разворота $\Delta\phi$ детектора в вертикальной плоскости относительно штатного положения. В результате для установки ФОДС число корректируемых геодезических параметров равно $N_s = 104$.

Для определения геодезических поправок можно ввести функционал χ^2 метода наименьших квадратов, в который входят как параметры трека, так и N_s рассматриваемых поправок [32]. Известно, что при большом N_s данная процедура является неустойчивой [33, 34]. Неустойчивость исчезает при резком сокращении количества корректируемых геодезических параметров. Далее уберем поправки из функционала χ^2 . Как описано выше, в результате аппроксимации находим траекторию частицы. Строим распределение отклонений от траектории вычисленных координат для всех отобранных измерений в рассматриваемой плоскости. Под геодезической поправкой понимается разность между фитированным и измеренным положениями точки на траектории частицы. Отклонение положения пика этого распределения для рассматриваемой плоскости от нуля дает величину смещения центра плоскости от данных геодезических измерений.

Для определения угловых поправок $\Delta\phi$ анализировалась зависимость разности Δx фитированных и измеренных x -координат точек трека от координаты y (или Δy от x , если плоскость измеряет y -координату). Поправка $\Delta\phi$ определяется углом наклона прямой линии, аппроксимирующей данные в XU -плоскости.

Для определения геодезических поправок сначала устраняются грубые ошибки геометрии, возникающие из-за перепутывания выходов с сигнальных проволочек и каналов электроники. Для этого на физических данных рассматриваются 2D-распределения корреляции счета в двух, из-

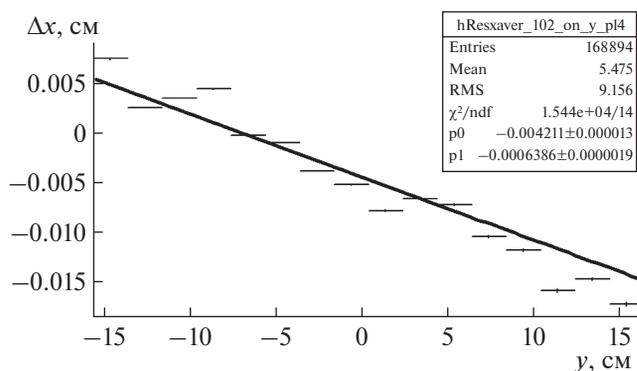


Рис. 7. Зависимость отклонений Δx вдоль оси x от координаты y для одной из плоскостей детектора.

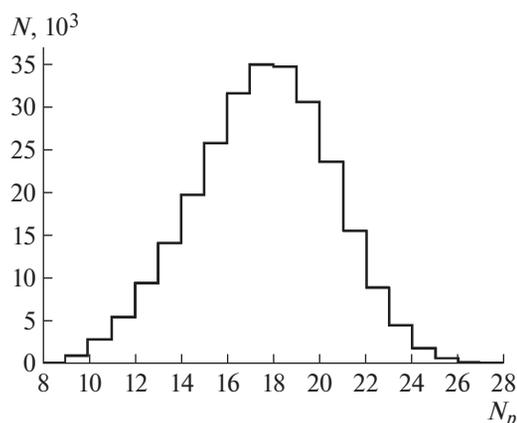


Рис. 8. Распределение событий по числу сработавших каналов N_p на реконструированной траектории частицы.

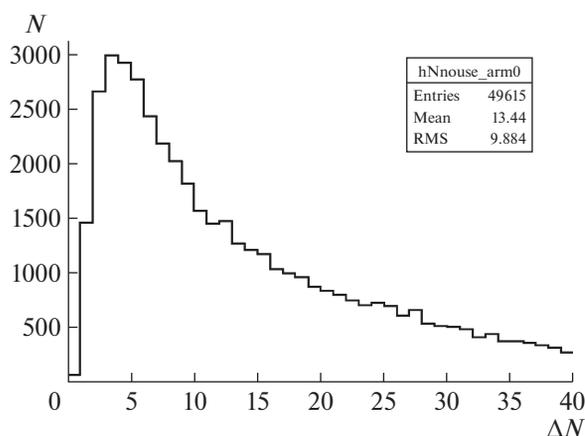


Рис. 9. Распределение разности ΔN между количеством зарегистрированных сигналов в одном плече установки и полным числом точек на треках.

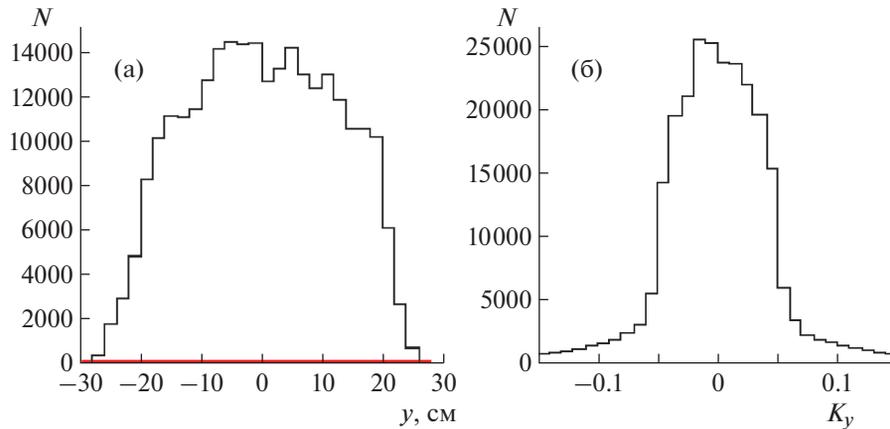


Рис. 10. Распределение событий: **а** – по y -координате попадания трека в первую плоскость установки; **б** – для реконструированных в пространстве треков в зависимости от тангенса угла K_y относительно оси канала в плоскости YZ .

меряющих одну и ту же координату, x или y , плоскостях детектора, в которых по осям абсцисс и ординат отложены локальные номера каналов. При отсутствии грубых ошибок эти распределения имеют регулярную структуру (рис. 5б), а при наличии ошибок видны сбои (рис. 5а).

После устранения ошибок в подсоединении каналов определяется величина геодезических поправок. На рис. 6 показано распределение отклонений d между фитированной координатой точки на треке и измеренной для центра одной из плоскостей установки.

Для нахождения поправки к углу наклона детекторов в плоскости XU анализировалась зависимость отклонений Δx от координаты y (рис. 7). Сплошная линия – результат фитирования данных прямой линией. Видно, что угловая коррекция равна 0.004 рад и ее вклад в координатную

точность составляет ≤ 150 мкм. Отметим, что процедура определения геодезических поправок выполнялась итерационно.

РЕЗУЛЬТАТЫ РЕКОНСТРУКЦИИ

Массовая параллельная обработка данных проводилась на компьютерном кластере ИФВЭ (Протвино), являющемся “воротами” в мировую сеть распределенных вычислений GRID. Схема обработки данных и их запуска на счет позволяет осуществлять параллельную обработку результатов измерений, разбитых на части, называемые массивами данных. Число одновременно обрабатываемых массивов данных ограничивается диспетчером задач системного программирования

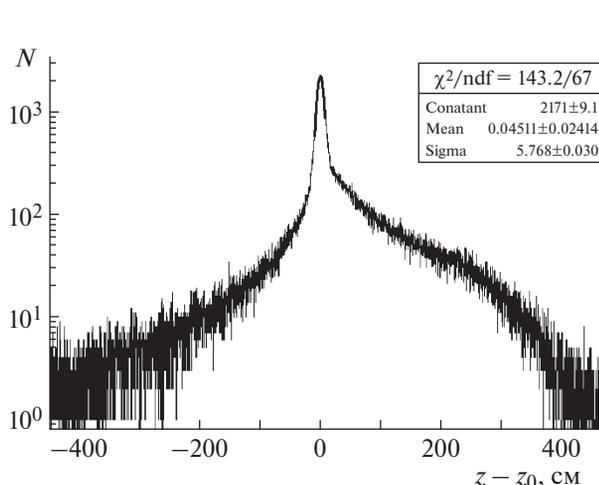


Рис. 11. Распределение траекторий частиц относительно мишени вдоль оси Z в отсутствие магнитного поля.

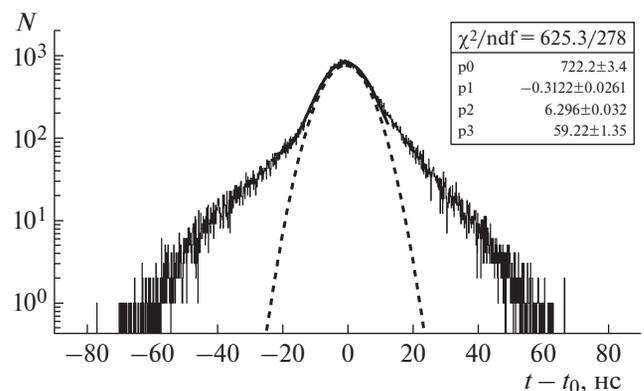


Рис. 12. Распределение временных меток t треков относительно времени триггера t_0 ; сплошная линия – фит данных функцией Гаусса с подложкой в области $|t - t_0| < 18$ нс, штриховая – вклад экстраполированной функции Гаусса на весь временной интервал для оценки вклада фона от наложений.

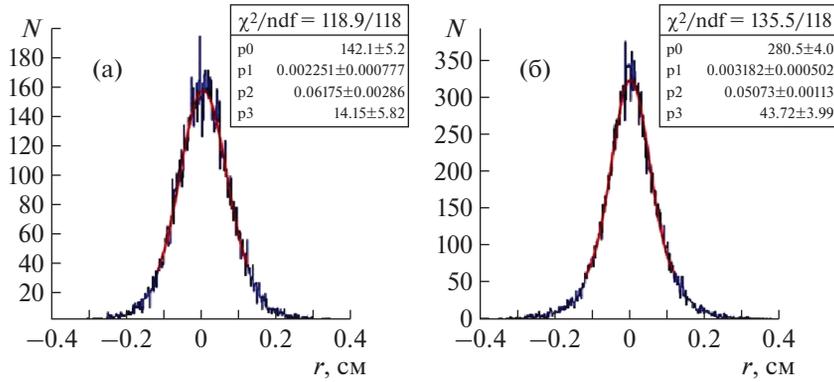


Рис. 13. Распределение отклонений измеренных координат от проекций найденных треков в дрейфовых камерах (а) и в камерах на трубках (б) (импульс >4 ГэВ/с).

компьютерного кластера ИФВЭ и в настоящее время достигает нескольких тысяч.

Для иллюстрации работы программы реконструкции треков на установке ФОДС приведем некоторые наиболее важные распределения событий. Типичное распределение по числу N_p сработавших каналов на реконструированной траектории частицы для одного из плеч ФОДС приведено на рис. 8. В среднем при введенных выше обрезаниях $N_p = 19$.

На рис. 9 приведено распределение сигналов по разности ΔN между числом всех сработавших точек и числом точек на реконструированном треке одного из плеч установки, т.е. по числу сигналов вне треков.

Пространственное и угловое распределение событий для реконструированных треков первой плоскости ДК в отсутствие магнитного поля показано на рис. 10.

Распределение траекторий частиц относительно мишени (вольфрам, 0.1λ , где λ — длина ядерного взаимодействия) вдоль оси Z в отсутствие магнитного поля приведены на рис. 11. Виден центральный пик от мишени и приливы от фоновых взаимодействий на веществе установки.

ОТКЛОНЕНИЕ ВРЕМЕНИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ТРЕКА ОТ ВРЕМЕНИ ТРИГГЕРА

Распределение времени t возникновения треков относительно заданного времени триггера $t_0 = 0$, определенное в соответствии с правой частью формулы (12), показано на рис. 12. Оно имеет гауссову компоненту только в узком временном интервале, не превышающем по модулю 20 нс. В дальних временных областях распределение падает экспоненциально, $e^{-7.3|t-t_0|}$, до максимально разрешенных нами 60 нс. Такое поведение объясняется тем, что частицы интенсивного пучка при-

ходят не только в короткий строб триггера, но и в значительно более широком интервале времени. Вероятность восстановления треков падает с увеличением отклонения временной метки от времени триггера. Из анализируемого распределения можно оценить фон от наложений, который составил 13%. Вклад его падает до 6% при использовании обрезания $|t - t_0| < 20$ нс, при этом теряется только 1% полезных событий. Другая независимая оценка вклада фона, которая дала такие же результаты, была получена принудительной сдвижкой времени триггера t_0 на 200 нс.

КООРДИНАТНАЯ ТОЧНОСТЬ

Пространственная точность геометрической реконструкции треков существенно зависит от оптимизации режимов работы дрейфовых детекторов и выбора рабочей точки по высокому напряжению [16], а также определяется поправками к геодезии элементов установки. Координатная точность оценивалась отдельно для дрейфовых камер и трубок. На рис. 13 показано распределение отклонений координат фитированного положения точек трека для ДК и ДТ. Отметим, что были приняты во внимание только частицы с импульсом >4 ГэВ/с. Оценка координатной точности, полученной в условиях физического эксперимента, для камер составила 600 мкм, для трубок — 500 мкм. Полученные координатные точности удовлетворяют требованиям экспериментов на установке ФОДС. Импульс заряженных частиц, проходящих через анализирующий магнит, определяется с использованием данных геометрической реконструкции по таблице решений с полиномиальной аппроксимацией [35].

При измерениях параметров камер на стенде были получены более точные результаты по координатам траекторий частиц в детекторах. Так для дрейфовых камер в компоновке из трех X-модулей, расположенных на равных расстояниях друг

от друга, пространственное разрешение составило 210 мкм [10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для модернизированной установки ФОДС создана новая трековая система, состоящая из 20-ти плоскостей дрейфовых камер (0.5×0.5 м) с распределенным потенциалом и 30-ти плоскостей дрейфовых трубок (1.0×1.0 м) и (1.3×0.9 м). С использованием данной системы проведены измерения процессов с большими p_T в pA -взаимодействиях. Создан комплекс программ для калибровки каналов ДК и ДТ и определения $t(r)$ -зависимостей. Разработан алгоритм реконструкции треков на основе метода наименьших квадратов с использованием временных измерений в ДК и ДТ, работающих в условиях большого фона (в среднем 6 частиц на плоскость) и высокой интенсивности частиц $\sim 10^6$ с⁻¹. Разработана процедура получения геодезических поправок на физических событиях для дрейфовых камер и трубок установки ФОДС. Пространственная точность реконструкции треков на установке составила 600 мкм для дрейфовых камер и 500 мкм для трубок. Эффективность регистрации треков составила около 40% и объясняется сложной топологией событий. Проведена массовая параллельная обработка данных на компьютерном кластере НИЦ “Курчатовский институт” – ИФВЭ.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы работы выражают благодарность А.А. Борисову, А.С. Кожину, Р.М. Фахрутдинову за разработку и изготовление дрейфовых трубок, используемых в нашем эксперименте.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Данная работа поддержана грантом РФФИ № 16-02-00215.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абрамов В.В., Алексеев А.В., Балдин Б.Ю., Битюков С.И., Бушин Ю.Б., Вражнов Ю.Н., Глебов В.Ю., Дунайцев А.Ф., Дышкант А.С., Евдокимов В.Н., Зеленукин С.А., Карпеков Ю.Д., Коноплянников А.К., Кренделев В.А., Криницын А.Н. и др.* Препринт ИФВЭ 81-46. Серпухов, 1981.
2. *Абрамов В.В., Балдин Б.Ю., Бузулуцков А.Ф., Волков А.А., Глебов В.Ю., Гончаров П.И., Гуржиев А.Н., Дышкант А.С., Евдокимов В.Н., Ефимов А.О., Корнеев Ю.П., Криницын А.Н., Крышкин В.И., Мутафян М.И., Подставков В.М., Ронжин А.И., Суляев Р.М., Турчанович Л.К.* // ПТЭ. 1992. № 6. С. 75.
3. *Abramov V.V., Alekseev A.V., Baldin B.Yu., Vasil'chenko V.G., Volkov A.A., Vrazhnov Yu.N., Efimov A.O., Korneev Yu.P., Kryshkin V.I., Rakhmatov V.E., Ronzhin A.I., Rykalin V.I., Sylyayev R.M.* // Nucl. Instrum. and Methods. 1985. V. A235. P. 497.
4. *Волков А.А., Калинин А.Ю., Кораблёв А.В., Криницын А.Н., Крышкин В.И., Скворцов В.В., Талов В.В., Турчанович Л.К.* // ПТЭ. 2010. № 4. С. 37.
5. *Волков А.А., Ефремов В.П., Иванова Н.С., Калинин А.Ю., Кораблёв А.В., Кошелев А.В., Криницын А.Н., Крышкин В.И., Кулагин Н.В., Лукьянцев А.Ф., Маконин С.В., Матюшин А.А., Милюткин В.П., Мишагин Ю.А., Селезнев В.С. и др.* // ПТЭ. 2012. № 2. С. 22.
6. *Балдин А.А., Бердников Я.А., Берлёв А.И., Бордановский А.Ю., Борзунов Ю.Т., Волков А.А., Еремов В.П., Иванов А.Е., Ким В.Т., Константинов А.В., Калинин А.Ю., Кораблёв А.В., Корешев В.И., Криницын А.Н., Крышкин В.И. и др.* Препринт ИФВЭ 2011-32 ОЭФ. Протвино 2011.
7. *Волков А.А., Ефремов В.П., Калинин А.Ю., Карпеков Ю.Д., Кораблёв А.В., Криницын А.Н., Крышкин В.И., Кулагин Н.В., Скворцов В.В., Солдатов М.М., Талов В.В., Турчанович Л.К., Шаланда Н.А., Якимчук В.И.* // ПТЭ. 2012. № 4. С. 35.
8. *Боголюбский М.Ю., Бордановский А.Ю., Волков А.А., Елумахов Д.И., Ефремов В.П., Иванюков А.А., Калинин А.Ю., Криницын А.Н., Крышкин В.И., Кулагин Н.В., Паталаха Д.И., Скворцов В.В., Талов В.В., Турчанович Л.К.* // ЯФ. 2017. Т. 80. № 3. С. 239
9. *Боголюбский М.Ю., Исаев А.Н., Кожин А.С., Козелов А.В., Плотников И.С., Сенько В.А., Солдатов М.М., Шаланда Н.А., Якимчук В.И., Кузьмин Н.А., Петухов Ю.А.* // ПТЭ. 2013. № 2. С. 39. <https://doi.org/10.7868/S0032816213010175>
10. *Алексеев А.В., Балдин Б.Ю., Битюков С.И., Бушин Ю.Б., Глебов В.Ю., Дунайцев А.Ф., Коноплянников А.К., Крышкин В.И., Кульман Н.Ю., Ланищев Г.И., Мяслицын В.К., Рыбаков В.В., Суляев Р.М., Сытин А.Н., Турчанович Л.К.* // ПТЭ. 1980. № 4. С. 27.
11. *Bensinger J., Bojko N., Borisov A., Fohroutdinov R., Goryathev S., Goryathev V., Gushin V., Hashemi K., Kojine A., Kononov A., Larionov A., Paramoshkina E., Pilaev A., Skvorodnev N., Thougouev A., Wellenstein H.* // Nucl. Instrum. and Methods. 2002. V. A494. P. 480. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(02\)01535-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(02)01535-8)
12. *Borisov A., Fahroutdinov R., Kojine A., Larionov A., Pilaev A., Rybathenko V., Salomatin Yu.* // Nucl. Instrum. and Methods. 2002. V. A494. P. 214. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(02\)01468-7](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(02)01468-7)
13. ATLAS Muonollaboration. Tehnial Design Report. CERN/LHC 97-22. Geneva, 1997.
14. *Борисов А.А., Боголюбский М.Ю., Божко Н.И., Исаев А.Н., Кожин А.С., Козелов А.В., Плотников И.С., Сенько В.А., Солдатов М.М., Фахрутдинов Р.М., Шаланда Н.А., Ющенко О.П., Якимчук В.И.* Патент RU 122191 U1 // Оpubл. 20.11.2012. Бюл. № 32.
15. *Борисов А.А., Боголюбский М.Ю., Божко Н.И., Исаев А.Н., Кожин А.С., Козелов А.В., Плотников И.С., Сенько В.А., Солдатов М.М., Фахрутдинов Р.М., Шаланда Н.А., Ющенко О.П., Якимчук В.И.* // ПТЭ. 2012. № 2. С. 5.
16. *Боголюбский М.Ю., Калинин А.Ю., Криницын А.Н., Морицонин А.А., Талов В.В., Турчанович Л.К.* // ПТЭ. 2015. № 6. С. 13. <https://doi.org/10.7868/S003281621506004X>

17. *Boyarski A., Briggs D., Burchat P.R.* SLAC-PUB-5745. February 1992 (1); <http://www.slac.stanford.edu/cgi-wrap/getdoc/slac-pub-5745.pdf>
18. *Дворников О.В., Солин А.В., Чеховский В.А., Литомин А.В.* Деп. рук. № Д199731. Минск: БелИСА, 1997.
19. *Бушин Ю.Б., Конопляников А.К.* Препринт ИФВЭ 92-105 ОЭА. Протвино, 1992.
20. *Шаланда Н.А.* ЛЭ-95 – 64-канальный ВЦП в системе МИСС. Техническое описание НИЦ “Курчатовский институт” – ИФВЭ.
21. *Шаланда Н.А.* ЛЭ-81 – 32-канальный ВЦП в системе МИСС. Техническое описание НИЦ “Курчатовский институт” – ИФВЭ.
22. *Avolio G., Bagnaia P., Baroncelli A., Beretta M., Bini C., Branchini P., Cirilli M., Iodice M., Lanza A., La Rotonda L., Meoni E., Orestano D., Pasqualucci E., Petrucci F., Pontecorvo L.* // Nucl. Instrum. and Methods. 2004. V. A 523. P. 309. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2003.11.425>
23. *Highland V.L.* // Nucl. Instrum. and Methods. 1975. V. 129. P. 497.
24. *Highland V.L.* // Nucl. Instrum. and Methods. 1979. V. 161. P. 171.
25. *Sauli F.* Lectures given in the Academic Training Programme of CERN 1975–1976. CERN, Geneva, 3 May 1977.
26. *Archana Sharma* Lectures given at the ICFA school on Instrumentation in High Energy Physics. Istanbul, Turkey, June 28–July 10, 1999. IIrd SERC School on ENEP. BARC, Mumbai, INDIA, Feb. 1–15, 2000. CERN 2000-131. Geneva, 31/05/2000.
27. *Беклемишев Д.В.* Курс аналитической геометрии и линейной алгебры. М.: Наука, 1987.
28. *Kisel I.* // Nucl. Instrum. and Methods. 2006. V. A 566. P. 85 <https://doi.org/10.1016/j.nima.2006.05.040>
29. *Alison J.* A dissertation in Physics and Astronomy Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy. University of Pennsylvania, 2012.
30. <http://www.hep.upenn.edu/johnda/presentations/AtlasInnerDetectorAlignmentACAT.pdf>
31. *Зинченко А.И., Иванченко З.И., Иванченко И.М., Карпенко Н.Н., Кекелидзе В.Д., Татишвили Т.Т.* Препринт ОИЯИ Р10-95-541. Дубна, 1995.
32. *Belotelov I., Lanyov A., Ososkov G.* // Письма в ЭЧАЯ. 2006. Т. 3. № 4 (133). С. 66. http://www1.jinr.ru/Peper_letters/panl_4_2006/08_bel.pdf
33. *Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.* Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979.
34. *Тихонов А.Н., Уфимцев М.В.* Статическая обработка результатов экспериментов. М.: Изд-во МГУ, 1988.
35. *Боголюбский М.Ю., Волков А.А., Елумахов Д.К., Иванюков А.А., Калинин А.Ю., Криницын А.Н., Крышкин В.И., Кулагин Н.В., Паталаха Д.И., Романюшин К.А., Скворцов В.В., Талов В.В., Турчанович Л.К.* Препринт НИЦ “Курчатовский институт” – ИФВЭ 2019-1. Протвино, 2019.