

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 539.1.074.3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИМПУЛЬСА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ПО ТАБЛИЦЕ РЕШЕНИЙ С ПОЛИНОМИАЛЬНОЙ АППРОКСИМАЦИЕЙ НА УСТАНОВКЕ ФОДС

© 2019 г. М. Ю. Боголюбский^а, А. А. Волков^а, Д. К. Елумахов^а, А. А. Иванилов^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. Логанова

Россия, 142281, Протвино Московской обл., площадь Науки, 1

*e-mail: Vladimir.Talov@ihep.ru

Поступила в редакцию 26.02.2019 г.

После доработки 09.04.2019 г.

Принята к публикации 22.04.2019 г.

Обсуждаются вопросы определения импульса заряженных частиц на фокусирующем двухплечевом спектрометре (ФОДС). Координатные детекторы расположены на выходе анализирующего магнита, на его входе установлен профилометр положения центра тяжести пучка на мишени за цикл ускорителя. Для получения регулярной сетки значений вектора магнитного поля, измеренного датчиком Холла в части магнита, применена программа конечно-элементного анализа ANSYS. Импульс заряженных частиц определяется на основе алгоритма таблиц решений с полиномиальной аппроксимацией. Таблицы получают методом Монте-Карло путем трассировки движения частицы с заданным импульсом через магнитное поле. Приведены точности определения импульса частицы и углов ее рождения с учетом вкладов многократного рассеяния, ошибок измерений и погрешности аппроксимации. Показаны распределения восстановленных траекторий в мишень и импульсный спектр частиц.

DOI: 10.1134/S003281621905015X

ВВЕДЕНИЕ

Для изучения процессов одиночного и парного рождения адронов в жестких процессах на ускорительном комплексе У-70 создан двухплечевой поворотный спектрометр ФОДС [1]. В настоящее время с целью исследования редких процессов [2] проведена глубокая модернизация спектрометра ФОДС [3–6]. В частности, трековая система, построенная ранее из дрейфовых камер [3], дополнена камерами из дрейфовых алюминиевых трубок, которые были разработаны и изготовлены в НИЦ “Курчатовский институт”–ИФВЭ (Протвино) [4, 5] для экспериментов на Большом адронном коллайдере (ЦЕРН, Швейцария) [6]. Оборудование установки ФОДС также задействовано в эксперименте по изучению рождения вперед адронов и ядерных фрагментов (в том числе в куммулятивной области) в адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействиях. Канал 22 ускорителя У-70 работает в этом случае спектрометром вторичных частиц и ядер [7]. Импульс заряженной частицы на установке ФОДС определялся по величине поля в спектрометрическом магните СП12М и значе-

ниям ее координат в трековых детекторах [8] и ионизационных профилометрах [9]. Поле измерялось при помощи датчиков Холла только в части магнита. Значения поля в узлах сетки измерений аппроксимировались на весь объем магнита на основе свойств симметрии. Данная работа посвящена процедуре определения импульса заряженной частицы на установке ФОДС.

УСТАНОВКА ФОДС

Анализирующий магнит установки является модернизацией магнита СП-12А. Размеры его входного окна в горизонтальной плоскости увеличены в 2 раза, а центральная часть заложена вставку, состоящей из вольфрама длиной 75 см и железа длиной 3.5 м. В результате модернизации более чем в 3.5 раза увеличен аксептанс установки, который достигает сейчас для каждого плеча 7.4 мср. На рис. 1 показан магнит в глобальной системе координат установки.

Новая трековая система ФОДС состоит из 20-ти плоскостей дрейфовых камер [3] размером 0.5 ×

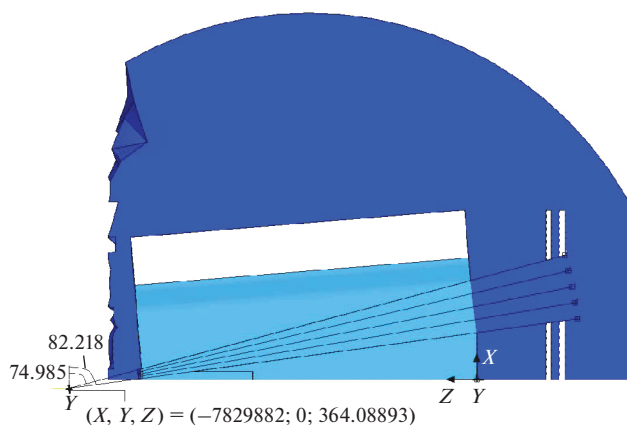


Рис. 1. Магнит в глобальной системе координат установки.

$\times 0.5$ м, число каналов составляет 320, а также из 30-ти плоскостей дрейфовых алюминиевых трубок диаметром 30 мм [4, 5]. Общее число трубок равно 1200, их длина — 1 и 1.3 м, толщина стенок — 0.4 мм, диаметр анодной проволоки — 50 мкм. Трубки сгруппированы в дрейфовые станции, каждая из которых состоит из трех плоскостей, образующих сотовую структуру. Характеристики трубок ФОДС подробно изучены в работе [10]. Использованы дрейфовые камеры с распределенным потенциалом. Они состоят из двух идентичных плоскостей толщиной 8 мм, смещенных для устранения право-левой неопределенности на 16 мм — полуширину дрейфового промежутка. Диаметр сигнальных проволок равен 20 мкм.

Трековые детекторы установлены за магнитом на базе 3 м. В работе [8] детально описана процедура получения координат в трековых детекторах и проведения траекторий на модифицированном спектрометре ФОДС, разработана также процедура определения поправок к его геодезии. Точность измерения траектории частицы на установке ФОДС составляет 500 мкм.

Координата центра тяжести пучка за цикл ускорителя на установке определяется ионизационными профилометрами, расположенными перед мишенью.

В каждом плече ФОДС установлено по две плоскости выполненных из полос сцинтиллятора годоскопических счетчиков, спектрометр колец черенковского излучения *СКОЧ* [11], адронный калориметр *АК* [12] и мюонный фильтр.

СИСТЕМЫ КООРДИНАТ

На установке ФОДС (рис. 2) используется глобальная система координат, ось Z которой направлена по пучку, а также локальные системы координат, связанные с ее плечами (южным — ле-

вое плечо по пучку и северным — правое плечо по пучку). Оси Z последних проходят по центру плеча в направлении от мишени. Все системы координат — правые, и во всех ось YZ направлена вертикально вверх. В глобальной системе задается положение центра мишени и центра профилометра. Оси Z локальных систем координат повернуты относительно оси Z глобальной (в горизонтальной плоскости XZ) на углы плеч.

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ УСТАНОВКИ ФОДС

Как было сказано выше, поле, измеренное в части магнита, на основе свойств симметрии распространено на весь его объем. Для этого данные измерений анализировались в рамках программы конечно-элементного анализа ANSYS [13] для статических решений уравнения Максвелла с учетом граничных условий на разделе сред. Интерполяция значений компонент поля осуществлялась по формуле для трехмерного пространства [14]. Величина поля $f(x, y, z)$ в объеме куба единичных размеров находилась по значениям f_{ijk} в его вершинах. На рис. 3 представлена аппроксимация компонент поля B_x, B_y, B_z магнита ФОДС (южное плечо) в системе координат плеча как функций расстояния R от начала координат при фиксированной вертикальной координате $y = 0$ см. Аппроксимация поля представлена для трех лучей с углом φ в глобальной системе координат, равным: 13.5° (рис. 3а–3в), 11.5° (рис. 3г–3е) и 9.0° (рис. 3ж–3и). Ось плеча магнита повернута в горизонтальной плоскости относительно глобальной оси OZ на угол 11.4° .

Таблицы поля заданы только в северном плече ФОДС для части магнита при $y > 0$. Исходя из симметрии поля по y координате, компоненты его (B_x, B_y, B_z) для всего магнита можно записать в виде:

$$\begin{cases} B_x(y) = B_x(-y); \\ B_y(y) = -B_y(-y); \\ B_z(y) = B_z(-y). \end{cases} \quad (1)$$

Из свойств этой же симметрии компоненты поля ($B_x^{(i)}, B_y^{(i)}, B_z^{(i)}$) в системе координат своего плеча в точке (x, y, z) , где индекс $i = 0, 1$ — номер плеча (южное, северное), соотносятся как:

$$\begin{cases} B_x^{(0)}(x, y, z) = B_x^{(1)}(-x, y, z); \\ B_y^{(0)}(x, y, z) = -B_y^{(1)}(-x, y, z); \\ B_z^{(0)}(x, y, z) = -B_z^{(1)}(-x, y, z). \end{cases} \quad (2)$$

По результатам работы программы ANSYS получена регулярная трехмерная сетка компонент поля в анализирующем магните установки.

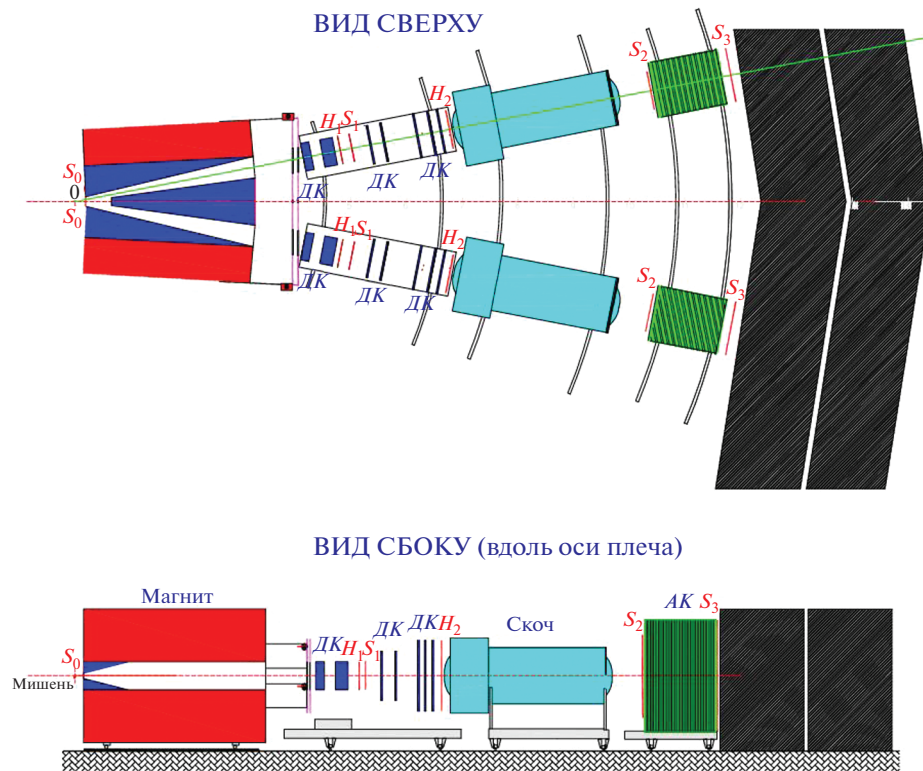


Рис. 2. Схема экспериментальной установки. S_i — сцинтилляционные счетчики; ДК — дрейфовые камеры и камеры на дрейфовых трубках; H_i — годоскопы; СКОЧ — спектрометры колец черенковского излучения; АК — адронные калориметры.

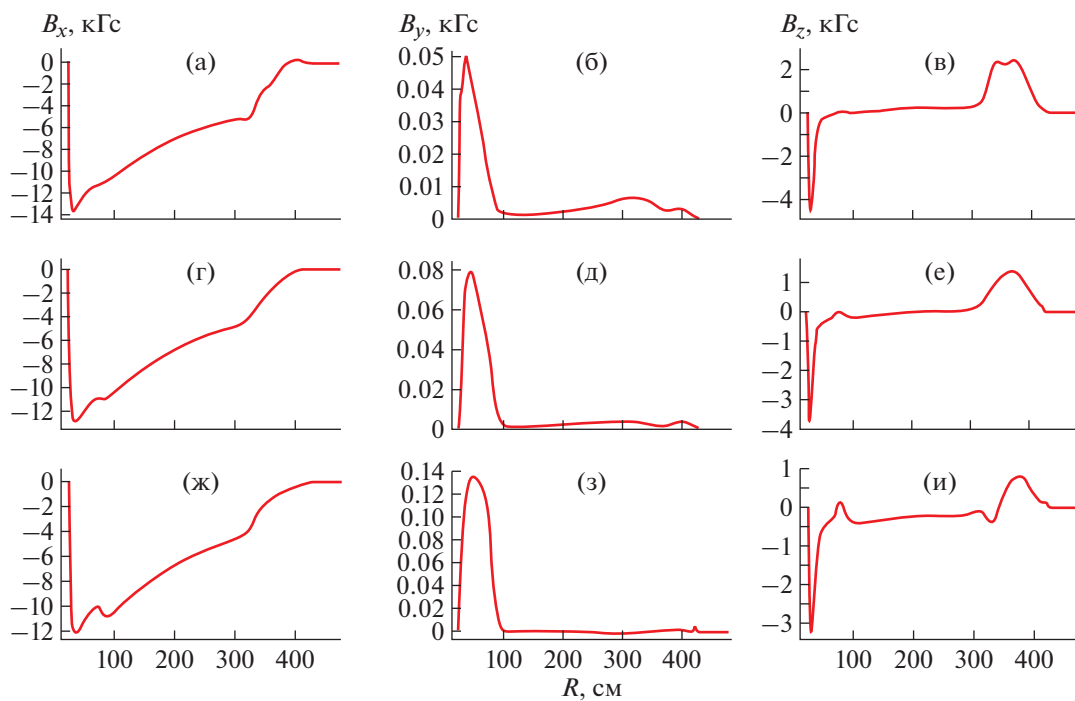


Рис. 3. Аппроксимации компонент поля B_x , B_y , B_z анализирующего магнита ФОДС (южное плечо) как функции расстояния от начала координат R при фиксированной вертикальной координате $y = 0$ для трех углов φ в глобальной системе координат: 13.5° (а–в); 11.5° (г–е) и 9.0° (ж–и).

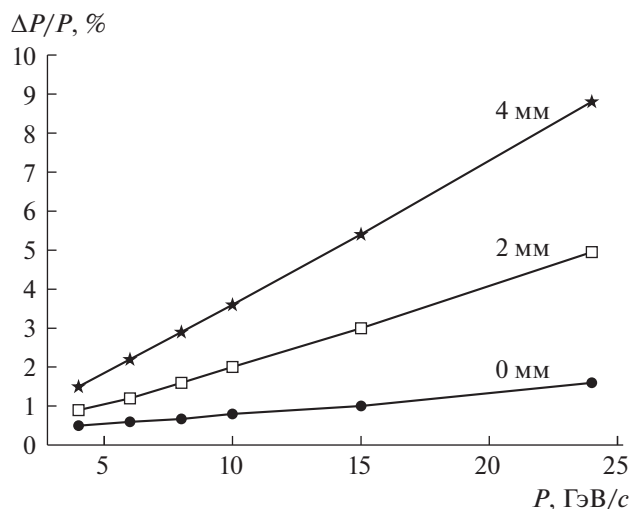


Рис. 4. Полная относительная ошибка $\Delta P/P$ определения импульса частицы P в зависимости от P при пространственной точности трекового детектора 500 мкм и поперечной ширине пучка от 0 до 4 мм (цифры у кривых). Моделирование методом Монте-Карло.

Трассировка частиц через магнитное поле осуществлялась программой из пакета GEANT [15]. По ней также был рассчитан аксептанс установки ФОДС.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИМПУЛЬСА ЗАРЯЖЕННОЙ ЧАСТИЦЫ

Обычно импульс заряженной частицы определяется по измерению кривизны ее траектории в магнитном поле. На установке ФОДС координатные детекторы расположены перед входом в анализирующий магнит и на его выходе. В этом случае может быть использован метод работы [16], в котором задается импульс частицы и некоторый набор измеряемых исходных ее параметров. Затем рассчитывается движение частицы через магнит и выдаются соответствующие ее параметры на выходе из магнита. Далее находится функция решения, которая связывает импульс частицы с измеряемыми параметрами траектории. В качестве такой функции предлагается использовать полиномы Чебышева [16, 17] или полилинейную интерполяцию [17].

Другой, примененный нами подход состоит в том, что искомая функция решения значений наблюдаемых величин представляется в виде таблиц. Для аппроксимации решений используется полиномиальное разложение по этим величинам, коэффициенты которого находятся методом наименьших квадратов [18]. Процедуру определения коэффициентов, проводимую методом Монте-

Карло, можно рассматривать как обучение алгоритма. Проверка его проводится на независимо сгенерированных событиях. Функция решения – векторная величина, так как определяются все компоненты импульса.

Кратко остановимся на процедуре определения исходных параметров частицы на установке ФОДС. Для возможности выделения фоновых событий розыгрыш продольной координаты точки взаимодействия проводился равномерно на интервале, значительно превышающем толщину мишени. Поперечные координаты центра пучка разыгрывались равномерно по площади мишени диаметром 4 см, среднеквадратичная ширина пучка принималась равной 4 мм. Углы рожденной частицы Θ_x и Θ_y разыгрывались равномерно в интервалах $|\Theta_x| < \Theta_x^{\max}$ и $|\Theta_y| < \Theta_y^{\max}$, где $\tan \Theta_x = P_x/P_z$ и $\tan \Theta_y = P_y/P_z$, а P_x , P_y , P_z – компоненты импульса частицы в глобальной системе координат, $\Theta_x^{\max}$ и $\Theta_y^{\max}$ – максимальные угловые апертуры магнита. Количество событий N разыгрывалось в зависимости от импульса P в соответствии с распределением $dN/dP \sim \exp(-\alpha P)$ на интервале 1.5–70 ГэВ/с при $\alpha = 0.05$.

В алгоритме аппроксимации функции решений использовался полином 4-й степени от шести измеренных переменных:

$$(K_x, B_x, K_y, B_y, X_p, Y_p), \quad (3)$$

где X_p , Y_p – поперечная координата центра тяжести пучка по данным профилометра в глобальной системе; K_x , B_x , K_y , B_y – параметры прямолинейной траектории частицы в системе плеча, определяемые трековой системой установки за магнитом:

$$\begin{cases} x = B_x + K_x z; \\ y = B_y + K_y z. \end{cases} \quad (4)$$

Вектор-функция решения f_k выбрана состоящей из 4-х компонент:

$$(1/P_{yz}, k_x, k_y, z - z_0), \quad (5)$$

где P_{yz} – импульс частицы в вертикальной плоскости YZ в системе плеча; k_x , k_y – тангенсы углов наклона трека в точке рождения в системе плеча в плоскостях XZ и YZ ; z – продольная координата точки рождения в глобальной системе; z_0 – фиксированный параметр, задающий центр мишени.

Реализация алгоритма обучения проводилась методом Монте-Карло с розыгрышем параметров рожденной частицы с известным зарядом, как указано выше, с последующей ее трассировкой через

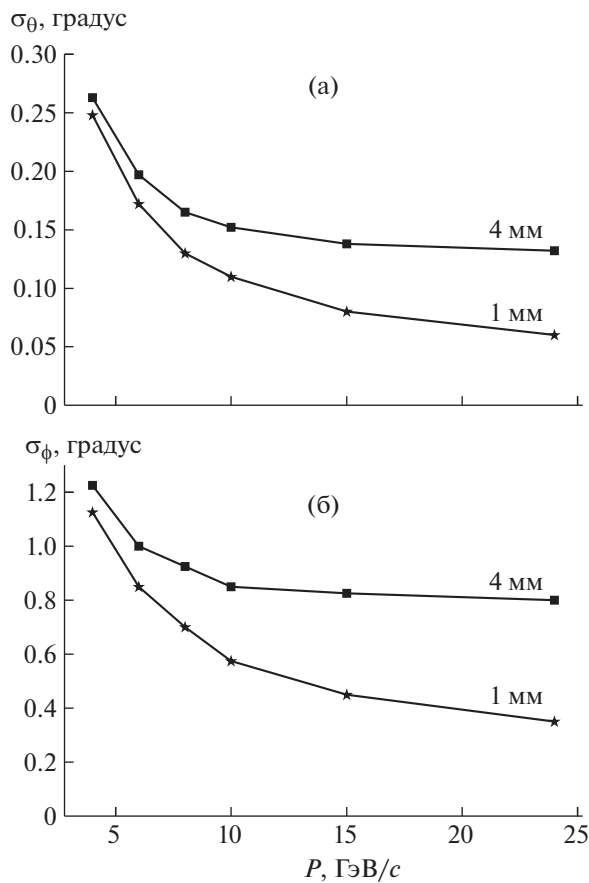


Рис. 5. Зависимости ошибки определения полярного угла трека (а) и азимутального угла трека (б) в точке рождения от импульса P при пространственной точности детекторов 500 мкм и поперечной ширине пучка 1 и 4 мм (цифры у кривых). Моделирование методом Монте-Карло.

магнит и определением параметров траектории на выходе магнита. Таким образом, при обучении являются заданными как вектор решений, так и вектор исходных данных. Методом наименьших квадратов находятся коэффициенты полиномиальной аппроксимации компонент вектора решения (5) по компонентам вектора исходных данных (3) из требования минимальности отклонения полинома от известного решения.

Полная ошибка ΔP определения импульса частицы состоит из вкладов от многократного рассеяния, неопределенностей задания магнитного поля, положения пучка по данным профилометров, ошибок определения параметров траектории частицы в трековой системе и погрешности аппроксимации.

Соответствующие оценки ΔP , полученные методом Монте-Карло на независимо сгенерированных событиях, не участвующих в обучении,

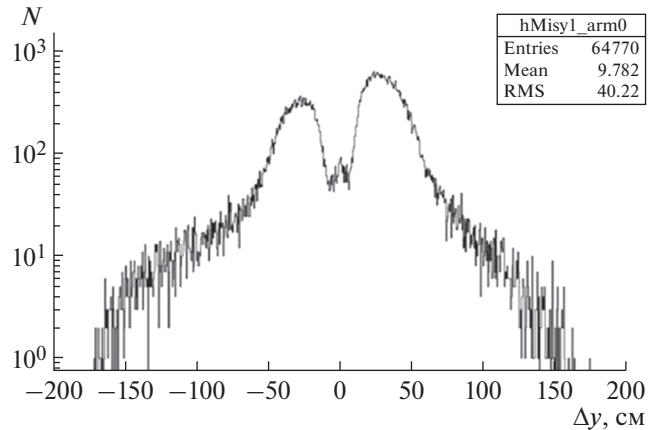


Рис. 6. Распределение траекторий частиц вдоль оси Y в системе плеча ФОДС в центре мишени с магнитным полем.

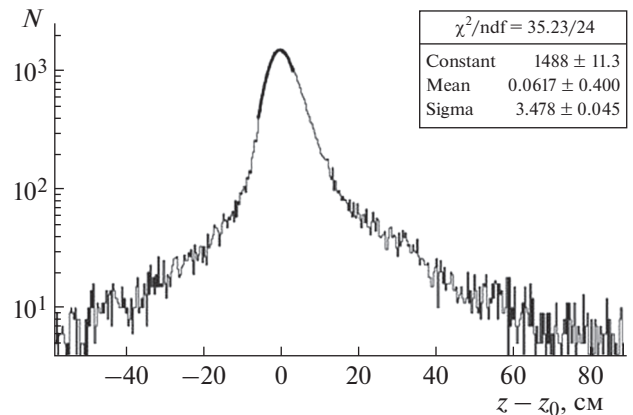


Рис. 7. Распределение траекторий частиц относительно мишени вдоль оси Z .

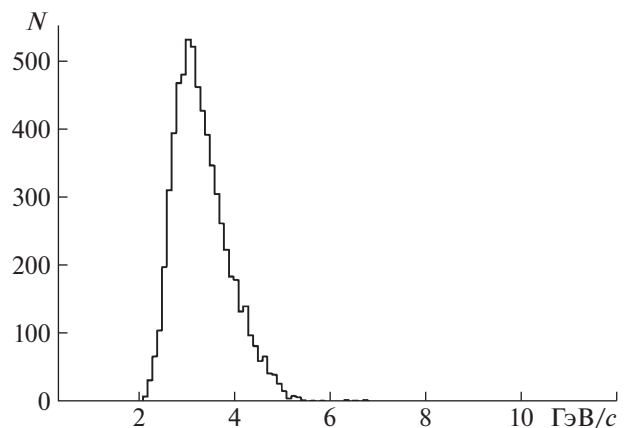


Рис. 8. Импульсный спектр частиц на установке ФОДС.

при варьировании поперечной ширины пучка от 0 до 4 мм представлены на рис. 4. Видно, что основной вклад в ошибку вносит неопределенность в размерах пучка.

Аналогичные оценки ошибок определения полярного и азимутального углов трека в точке рождения в зависимости от импульса P показаны на рис. 5.

Для иллюстрации работы трековой системы ФОДС и программы реконструкции траекторий частиц, падающих на мишень, на рис. 6 приведено распределение частиц вдоль оси Y в плоскости плеча YZ . Мишень толщиной 0.1λ выполнена из вольфрама, магнитное поле включено. Видны два пика, больший из них относится к частицам с положительным зарядом (их всегда больше), меньший — к отрицательным. Небольшой прилив в центре связан с конверсией γ -квантов в веществе спектрометра.

Полученное в тех же условиях распределение реконструированных траекторий частиц вдоль оси Z в глобальной системе координат приведено на рис. 7, а типичный импульсный спектр частиц на установке ФОДС показан на рис. 8.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для модернизированной установки ФОДС (переделан анализирующий магнит, созданы новая трековая система и регистрирующая электроника) разработан комплекс программ для определения импульса частиц. Траектория частицы измеряется с использованием дрейфовых детекторов, расположенных на выходе магнита, и профилометров, определяющих координату центра тяжести пучка на мишени. Поле, измеренное датчиками Холла в части магнита, экстраполировано на весь его объем по программе конечно-элементного анализа ANSIS. Для уменьшения объема измерений использовались свойства симметрии поля.

Импульс заряженных частиц в магнитном поле установки ФОДС определялся на основе алгоритма таблицы решений с полиномиальной аппроксимацией. Для получения таблиц в рамках метода Монте-Карло трассировалось движение частиц заранее заданного импульса через магнитное поле. Проверка алгоритма проводилась на независимо сгенерированных событиях. Показаны точности определения импульса частицы и ее углов рождения с учетом вкладов погрешности алгоритма таблицы решений и ошибок измерений.

Приведены распределения реконструированных траекторий частиц, падающих на мишень, и импульсный спектр.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

БЛАГОДАРНОСТИ

Мы выражаем благодарность А.Д. Рябову и Т.Д. Рябовой за анализ результатов магнитных измерений в рамках программы конечно-элементного анализа ANSIS [13] и получение регулярной сетки значений вектора магнитного поля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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. и др. // ПТЭ. 1992. № 6. С. 75.
2. Балдин А.А., Бердников Я.А., Берлев А.И., Бордановский А.Ю., Борзунов Ю.Т., Волков А.А., Ефремов В.П., Иванов А.Е., Ким В.Т., Константинов А.В., Калинин А.Ю., Кораблев А.В., Корешев В.И., Криницын А.Н., Крышкин В.И. и др. Препринт ИФВЭ 2011-32 ОЭФ. Протвино, 2011.
3. Алексеев А.В., Балдин Б.Ю., Битюков С.И., Бушин Ю.Б., Глебов В.Ю., Дунайцев А.Ф., Конопляников А.К., Крышкин В.И., Кузьман Н.Ю., Ланчиков Г.И., Мяслицын В.К., Рыбаков В.Г., Суляев Р.М., Сытин А.Н., Турчанович Л.К. // ПТЭ. 1980. № 4. С. 27.
4. Bensinger J., Bojko N., Borisov A., Fachroutdinov R., Goryatchev R., Goryatchev V., Guschin V., Hashemi K., Kojine A., Kononov A., Larionov A., Paramoshkina E., Pilaev A., Skvorodnev N., Tchougouev 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)
5. Borisov A., Fachroutdinov R., Kojine A., Larionov A., Pilaev A., Rybatchenko V., Salomatina 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)
6. ATLAS Muon collaboration. Technical Design Report. CERN/LHC 97-22. Geneva, 1997.
7. Боголюбовский М.Ю., Бордановский А.Ю., Волков А.А., Елумахов Д.К., Ефремов В.П., Иванчиков 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. <https://doi.org/10.7868/S004400271702009X>
8. Боголюбовский М.Ю., Волков А.А., Елумахов Д.И., Ефремов В.П., Иванчиков 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. Препринт НИЦ “Курчатовский институт”—ИФВЭ № 2018-12. Протвино, 2018.
9. Волков А.А., Ефремов В.П., Иванова Н.С., Калинин А.Ю., Кораблев А.В., Кошелев А.В., Криницын А.Н., Крышкин В.И., Кулагин Н.В., Лукьянцев А.Ф., Маконин С.В., Матюшин А.А., Милоткин В.П., Мишагин Ю.А., Селезнев В.С. и др. // ПТЭ. 2012. № 2. С. 22.
10. Боголюбовский М.Ю., Калинин А.Ю., Криницын А.Н., Морщинов А.А., Талов В.В., Турчанович Л.К. // ПТЭ.

2015. № 6. С. 13.
<https://doi.org/10.7868/S003281621506004X>
11. 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., Sylyaev R.M. // Nucl. Instrum. and Methods. 1985. V. A235. P. 497.
[https://doi.org/10.1016/0168-9002\(85\)90099-3](https://doi.org/10.1016/0168-9002(85)90099-3)
 12. 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.
 13. <http://ru.wikipedia.org/wiki/ANSYS>
 14. https://ru.wikipedia.org/wiki/Трилинейная_интерполяция
 15. <https://geant4.web.cern.ch/geant4/support/download.shtml>
 16. Lechanoine C., Martin M., Wind H. // Nucl. Instrum. and Methods. 1969. V. 69. P. 122.
 17. Соколов А.М. Препринт КИЯ-04-4. Киев, 2004.
 18. Волков А. А. Дисс. ...докт. физ.-мат. наук. Протвино: ИФВЭ, 2006.