

РЕКОНСТРУКЦИЯ ТРАЕКТОРИЙ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В СИСТЕМЕ МНОГОПРОВОЛОЧНЫХ ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫХ КАМЕР ЭКСПЕРИМЕНТА ВМ@N

В. В. Ленивенко¹, В. В. Пальчик

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Описывается алгоритм реконструкции треков в системе многопроволочных пропорциональных камер в эксперименте ВМ@N (Baryonic Matter at Nuclotron) на нуклотроне. С его помощью на экспериментальных данных с бомбардировкой дейтронными и углеродными пучками углеродной и медной мишеней реконструировались пучковые треки до мишени и траектории заряженных частиц после мишени. Получена оценка эффективности работы многопроволочных камер. Измерены параметры пучка (поперечные размеры, угловой разброс).

The algorithm for track reconstruction in the multiwire proportional chambers (MWPC) of the ВМ@N experiment is described. Beam tracks before the interaction with the target and trajectories of charged particles after the interaction are reconstructed using the Nuclotron experimental data with deuteron and carbon beams colliding with the carbon and copper targets. Trajectories are extrapolated to the interaction point and to the drift chambers. Efficiencies of MWPCs have been obtained. Beam parameters (transverse dimensions, the angular spread) have been measured.

PACS: 29.85.Fj; 29.40.Cs; 29.40.Gx

ВВЕДЕНИЕ

Процессы взаимодействия тяжелых ионов высоких энергий предоставляют возможность исследовать ядерную материю при экстремальной температуре и плотности. При достаточно большой плотности ядерной материи, образованной в результате взаимодействия, можно наблюдать кварк-глюонную структуру нуклонов. В настоящее время теоретические модели прогнозируют различные сценарии для описания структуры сильно взаимодействующего вещества. Новые экспериментальные данные с высоким разрешением и статистикой требуются для проверки различных теоретических предсказаний [1, 2]. Отношение выходов мезонов к выходам барионов в результате взаимодействий растет с увеличением энергии столкновения. В продуктах ядро-ядерных столкновений при кинетической энергии пучка нуклотрона в диапазоне от 1 до 4,5 ГэВ/нуклон преобладают барионы, в отличие от взаимодействий при более высоких энергиях на RHIC или

¹E-mail: vasilisa@jinr.ru

SPS. Изучение процессов рождения гиперъядер даст более глубокое понимание свойств гиперон-нуклонных и гиперон-гиперонных взаимодействий. Максимальная вероятность рождения гиперъядер прогнозируется при $\sqrt{s_{NN}} \sim 4\text{--}5$ ГэВ, что в интервале энергий нуклотрона. Ожидается, что в таких экстремальных условиях может произойти частичное восстановление киральной симметрии [3,4].

BM@N (Baryonic Matter at Nuclotron) — первый эксперимент на ускорительном комплексе NICA–нуклотрон. Целью эксперимента является изучение взаимодействия релятивистских пучков тяжелых ионов с фиксированными мишенями.

В начале 2015 г. на нуклотроне ОИЯИ были проведены стартовые технические сеансы эксперимента BM@N. В первой конфигурации установки эксперимента многопроволочные пропорциональные камеры (MWPC) стояли до и после магнита. В последних сеансах набора данных MWPC располагаются до магнита с целью определения параметров пучка. О первой конфигурации и пойдет речь в данной работе. Во втором (Run2) и третьем (Run3) сеансах использовались три шестислойные MWPC [5]. Для того чтобы решать задачи, предназначенные для эксперимента, необходимо восстанавливать треки частиц, прошедших через рабочую установку. Существует обширный мировой опыт использования пропорциональных камер в реконструкции заряженных частиц в физике высоких энергий (см., например, [6] и многочисленные ссылки там же). В каждой из камер строились пространственные трек-сегменты, с помощью которых реконструировались прямолинейные траектории заряженных частиц.

Пропорциональные камеры выравнивались относительно оси пучка, геометрические параметры прямолинейных треков до и после магнита оценивались методом наименьших квадратов.

1. ДЕТЕКТОР BM@N

Нуклотрон предоставит эксперименту пучки частиц от протонов до ионов золота с кинетической энергией в диапазоне от 1 до 6 ГэВ/нуклон. Максимальная кинетическая энергия для ионов с отношением заряда к атомному весу (Z/A), равным 1/2, составляет 6 ГэВ/нуклон. Максимальная кинетическая энергия протонов равна 13 ГэВ. Длина канала транспортировки пучка от нуклотрона к месту проведения эксперимента BM@N составляет 160 м. В его состав входит 26 элементов магнитной оптики: 8 дипольных магнитов и 18 квадрупольных линз. Магнитное поле может достигать до максимальной величины 1,2 Тл, что позволяет оптимизировать для детектора BM@N геометрическую эффективность и импульсное разрешение для различных процессов и энергий пучка.

1.1. Экспериментальная установка. Схематичный вид экспериментальной установки BM@N представлен на рис. 1. Эксперимент включает в себя возможность измерения параметров треков с высокой точностью с времяпролетной информацией для идентификации частиц, а также позволяет проводить измерение полной энергии для анализа центральности соударений. Импульс и множественность заряженных треков будут измеряться с помощью двухкоординатных детекторов GEM (Gaseous Electron Multipliers), расположенных внутри анализирующего магнита, а также дрейфовых камер (DCH, Straw), расположенных за пределами магнитного поля. Времяпролетные детекторы на основе технологии mRPC (multi-gap Resistive Plate Chambers) со стрипповым считыванием позволяют

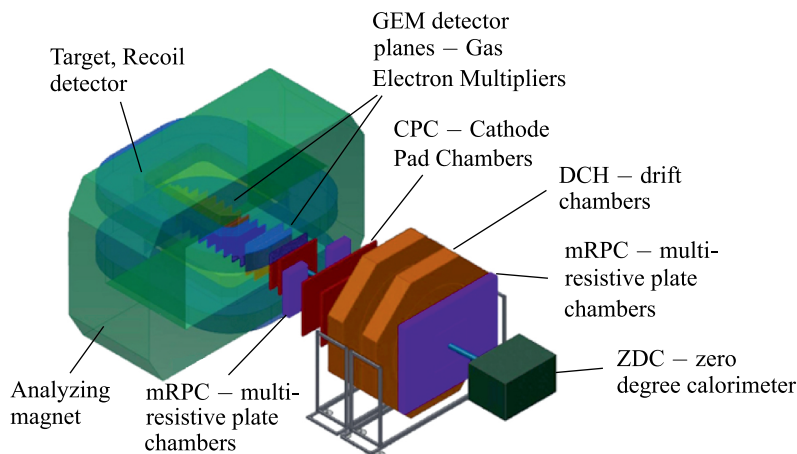


Рис. 1. Схематичный вид установки BM@N

разделять адроны (π , K , P), а также легкие ядра с импульсом до нескольких ГэВ/с. Калориметр ZDC (Zero Degree Calorimeter) предназначен для определения прицельного параметра столкновения (центральности) путем измерения энергии частиц-фрагментов пучка. Детектор T0, частично перекрывающий заднюю полусферу вокруг мишени, используется для измерения центральности столкновения тяжелых ионов, формирования триггера и стартового сигнала (T0) для детекторов mRPC-1,2. Электромагнитный калориметр будет установлен позади дрейфовых камер и детектора mRPC-2 для изучения процессов с образованием γ , e^\pm в конечном состоянии [7].

1.2. Геометрия MWPC в сеансах эксперимента. В Run2 (без мишени) две камеры располагались по оси Z до магнита, третья после него, с координатами относительно переднего края полюса магнита для MWPC1 $z = -317$, для MWPC2 $z = -180$ и для MWPC3 $z = 436$ см соответственно (рис. 2). В Run3 (с углеродной и медной мишенями) камеры располагались вдоль оси Z с координатами относительно мишени для MWPC1 $z = -150$, для MWPC2 $z = 453$ и для MWPC3 $z = 486$ см соответственно (рис. 3).

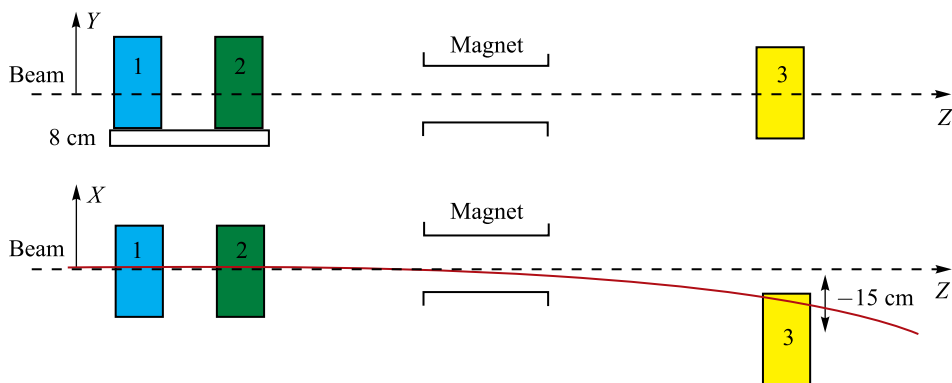


Рис. 2. Геометрия системы детекторов MWPC в Run2

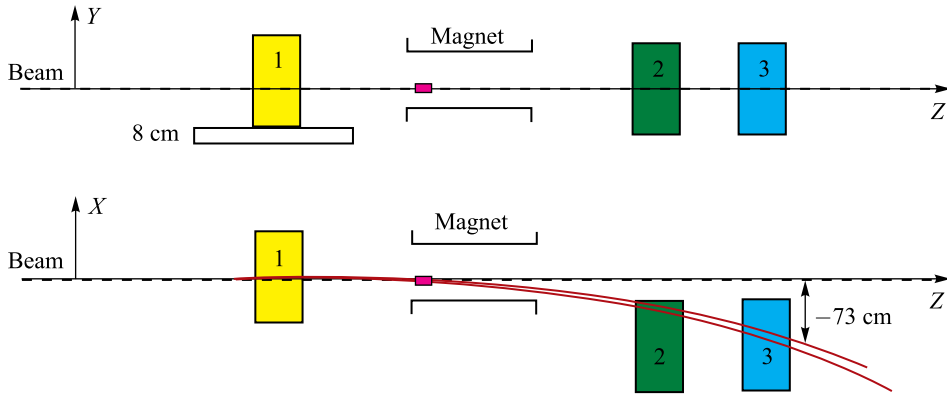


Рис. 3. Геометрия системы детекторов MWPC в Run3

По горизонтальной оси X камеры, стоящие после магнита в Run3, были сдвинуты на 73 см, а в Run2 — на 15 см для наилучшего совмещения MWPC-треков с рабочей областью дрейфовых камер (DCH).

1.3. Принцип работы камер MWPC. Камера заполнена газовой смесью (Ar — 70 %, CO₂ — 30 %) таким образом, чтобы заряженная частица, проходящая через рабочую область, вызвала ионизацию атомов газа. Координатная информация в камерах MWPC считывается с эквидистантных анодных проволок высокого напряжения, разделенных потенциальными сетками. Между считывающими плоскостями располагаются катодные плоскости, на которые приходят положительно заряженные ионы газа [8] (рис. 4).

Рожденные электроны ускоряются в электрическом поле камеры, в результате чего вокруг проволок возникает каскад ионизации. Это приводит к срабатыванию проволоки, ближайшей к траектории пролетевшей заряженной частицы.

Каждая камера MWPC состоит из шести плоскостей, располагающихся последовательно друг за другом на расстоянии 1 см вдоль оси Z перпендикулярно к ней. Координатные оси X , U , V расположены под углом 60° друг относительно друга (рис. 5).

В зависимости от порядка считывания проволок плоскости имеют знак «+» (возрастание номеров проволок идет вдоль оси координат) или «-» (возрастание в противополо-

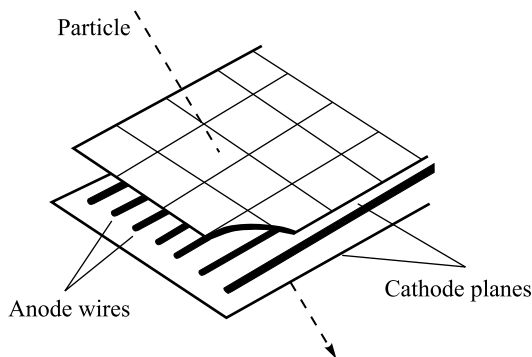


Рис. 4. Устройство многопроволочной камеры

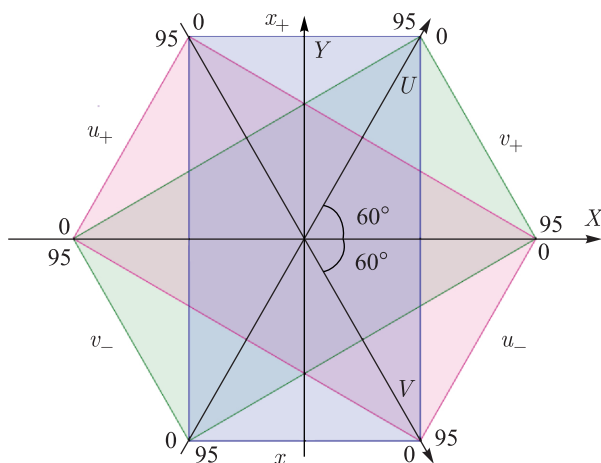


Рис. 5. Расположение координатных осей камер MWPC и порядок считывания проволок

ложном направлении). Каждая плоскость содержит 96 проволок (от 0-й до 95-й) с шагом $dw = 0,25$ см [9]. Координаты связаны между собой соотношениями

$$u = \frac{x + \sqrt{3}y}{2}, \quad v = \frac{x - \sqrt{3}y}{2}, \quad (1)$$

откуда следует

$$x = u + v. \quad (2)$$

2. АЛГОРИТМ ПОИСКА ТРЕКОВ

2.1. Построение трек-сегментов в MWPC. По совокупности сработавших проволок (измерений) в камере ищутся сегменты треков прошедших через нее заряженных частиц. Для построения сегмента вначале ищется пространственная точка, где необходимым условием является срабатывание трех координат $(x1, u1, v1)$ в трех из шести плоскостей, удовлетворяющих условию (2), — возможный кандидат в сегмент (рис. 6).

Для того чтобы отсеять «ложные» трехкоординатные комбинации и выбрать подходящие кандидаты в точечные сегменты, требуется, чтобы в соответствии с соотношением (2) выполнялись условия

$$|u1 + v1 - x1| < 3 dw \quad (3)$$

— для камер до магнита,

$$|u1 + v1 - x1| < 5 dw \quad (4)$$

— для камер после магнита, где треки отклоняются на большие углы магнитным полем.

Далее, к каждой из найденных трех комбинаций координат $(x1, u1, v1)$ подбирается сопряженное измерение по координате в других плоскостях.

В соответствии с рис. 6 сумма номеров сработавших проволок w_i в сопряженных плоскостях одной координаты проверяется на выполнение условия:

$$93 < w_+ + w_- < 97. \quad (5)$$

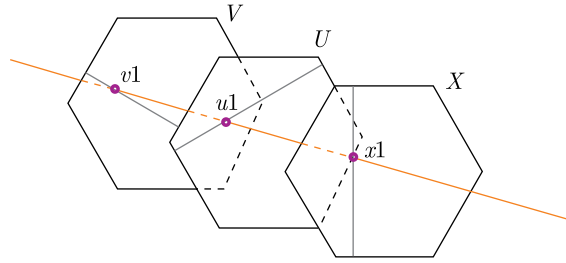


Рис. 6. Пример срабатывания проволок с координатами x_1, u_1, v_1 , составляющих пространственную точку в MWPC

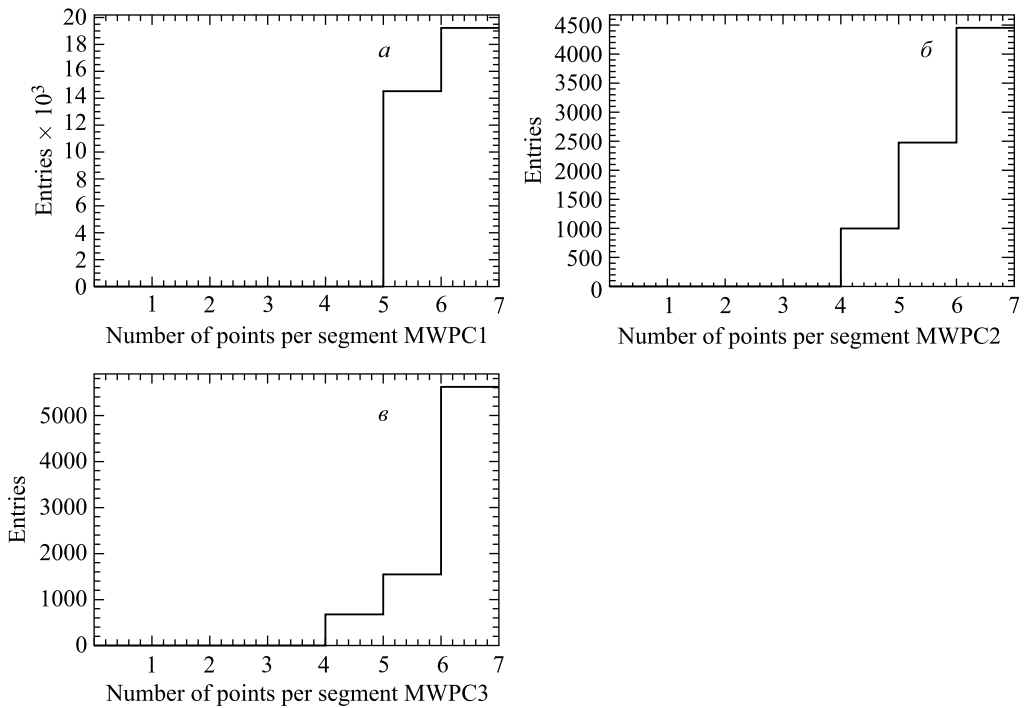


Рис. 7. Число точек в сегменте MWPC на данных Run3 с магнитным полем (β, ϵ) (для камеры до мишени строились пяти- и шеститочечные сегменты (a))

При этом для камер после магнита проверка по x -координате производится в более широких пределах с учетом отклонения треков частиц в магнитном поле ($B \neq 0$):

$$93 < w_{x+} + w_{x-} < 99. \tag{6}$$

Таким образом, собираются максимально возможные шеститочечные сегменты, после чего из оставшихся кандидатов собираются пяти-, затем и четырехточечные сегменты (рис. 7).

Если на этапе построения, например, шеститочечных сегментов имеются общие точки, то отбирается лучший из них по критерию χ^2 (см. ниже). Принадлежащие сегменту точки исключаются из дальнейшего рассмотрения.

2.2. Кластеризация групп смежных сигналов. При прохождении заряженной частицы через камеру свободные электроны, образовавшиеся вдоль следа частицы, дают начало лавинам, приходящим на анодные проволоки, ближайšie к пролетевшей частице. Электроника регистрирует сигнал с каждой сработавшей проволоки. Таким образом, приходящие сигналы указывают положение (координату) частицы в камере. Но лавины могут приходить не только на ближайшую, но и на соседние проволоки. Для более точного определения координаты трека в алгоритме заложена возможность кластеризации групп смежных сигналов с проволок.

Рассмотрим такой пример.

Лавина электронов может вызвать срабатывание в плоскости одной или двух соседних проволок (рис. 8). В алгоритме учитываются даже маловероятные процессы срабатывания трех проволок подряд для треков с большим наклоном.

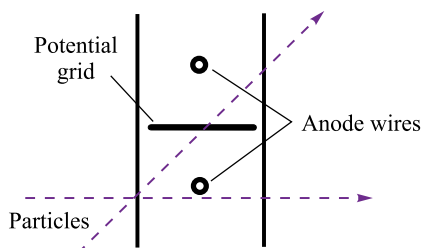


Рис. 8. Пример прохождения заряженных частиц через газовый объем MWPC. Анодные проволоки направлены перпендикулярно плоскости рисунка и разделены между собой потенциальной сеткой

Наличие кластеров в камере до мишени объясняется присутствием гало вокруг пучка. Ширина кластеров различна в зависимости от сеанса и качества работы камеры. Ее средние показатели соответствуют изображенным на рис. 9.

Наличие кластеров в собираемом кандидате трек-сегмента увеличивает время работы алгоритма и требует специальных условий проверки. Если в какой-то из плоскостей в кандидат трек-сегмента собралось две проволоки, рассматриваются три возможные комбинации: с первой или со второй из проволок или с кластером из двух проволок; в последнем случае используется координата между ними. Лучшая комбинация отбирается по критерию χ^2 сегмента.

2.3. Отбор трек-сегментов по критерию χ^2 . Множество собранных в сегменты кандидатов может содержать различное число измерений (от шести до четырех), причем допускается возможность их пересечения по общим точкам. Поэтому выделяется подмножество сегментов с максимальным числом точек, которые фитируются прямой линией методом наименьших квадратов (МНК), а затем отбирается «лучший» сегмент по критерию χ^2 [10]. После этого общие точки в остальных сегментах вычеркиваются. В МНК параметры положения (b_x , b_y) и наклона (a_x , a_y) сегмента в пространстве вычисляются минимизацией функционала

$$\sum \frac{d_i^2}{\sigma_i^2} \rightarrow \min, \quad (7)$$

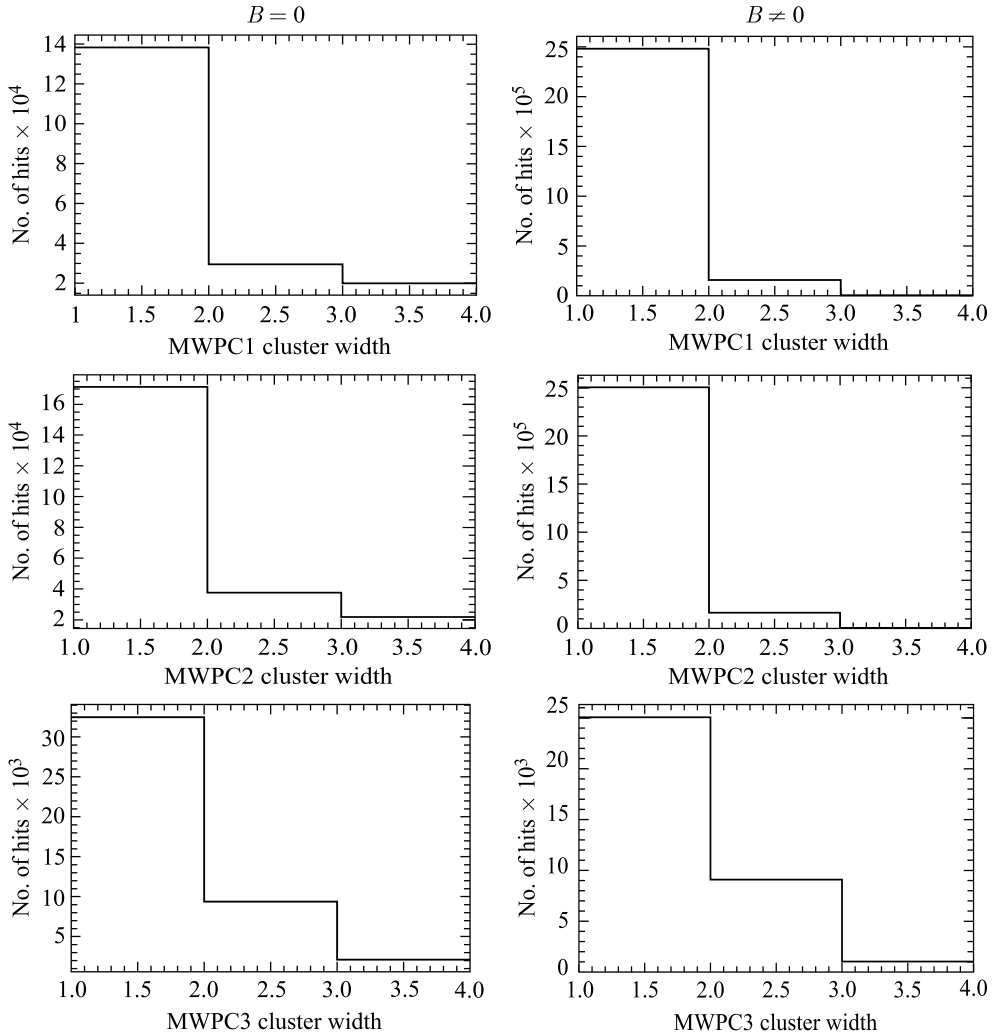


Рис. 9. Ширина кластеров в MWPC на данных Run3: слева — без магнитного поля, справа — в поле

где d_i — разность между измерениями (x_i, u_i, v_i) и фитированными по МНК координатами в i -й плоскости:

$$\begin{aligned}
 d_i &= x_i - a_x z_x - b_x, \\
 d_i &= u_i - \frac{(a_x + \sqrt{3}a_y)}{2} z_u - \frac{(b_x + \sqrt{3}b_y)}{2}, \\
 d_i &= v_i - \frac{(a_x - \sqrt{3}a_y)}{2} z_v - \frac{(b_x - \sqrt{3}b_y)}{2},
 \end{aligned}
 \tag{7'}$$

$\sigma_i = \frac{dw}{\sqrt{12}} = 0,072$ см — стандартные отклонения.

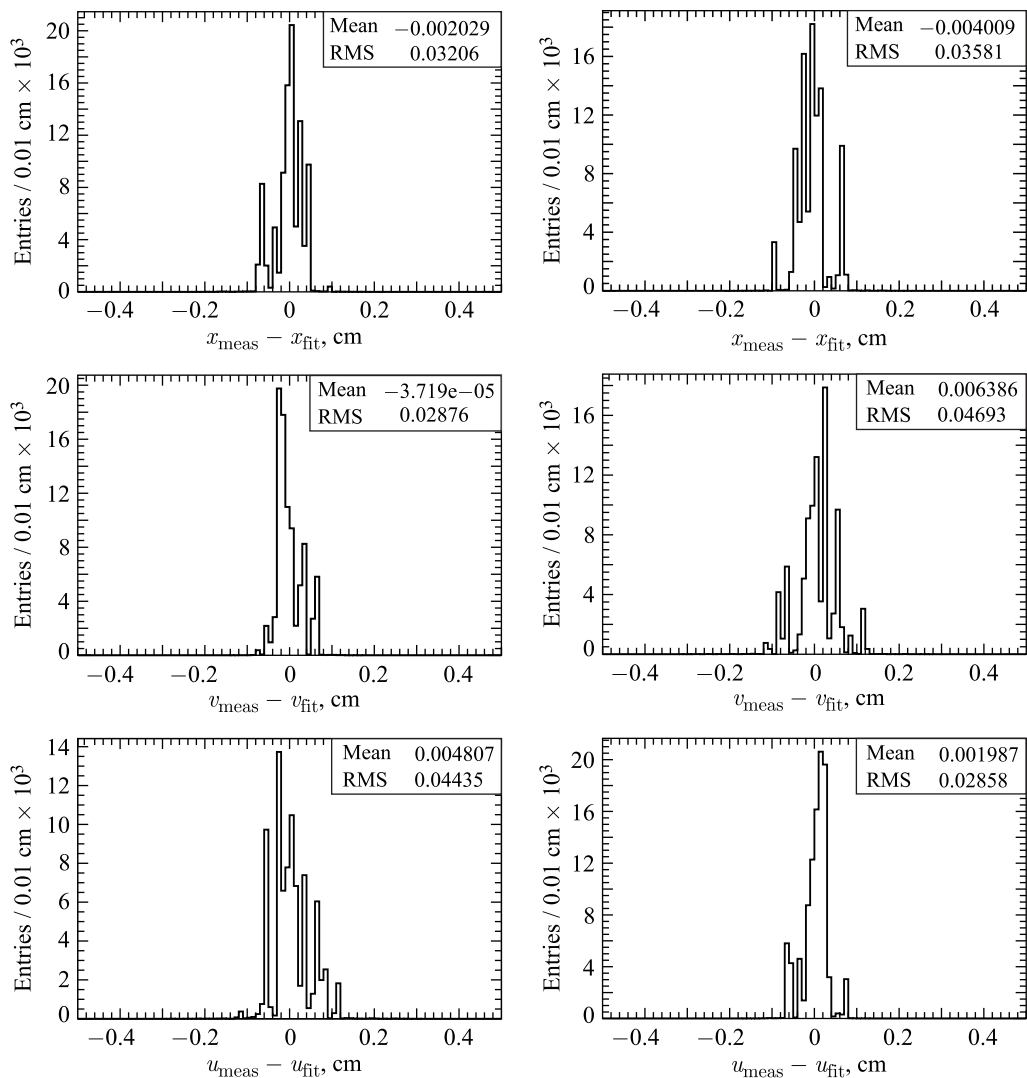


Рис. 10. Распределения, отражающие разницу между измеренными и фитированными координатами в плоскостях x , v , и u камеры MWPC2 на данных Run2

Разница между реальными измерениями и фитированными координатами показана на рис. 10 для каждой плоскости.

Лучший трек-сегмент отбирается по критерию χ^2 с учетом числа степеней свободы ($N - 4$) для шести- и пятиточечных сегментов:

$$\chi^2 = \frac{1}{N - 4} \sum \frac{d_i^2}{\sigma_i^2}, \quad (8)$$

где N — число измерений в сегменте.

Для четырехточечных сегментов используется выражение

$$\chi_4^2 = \sum \frac{d_i^2}{\sigma_i^2}. \quad (9)$$

2.4. Сшивка трек-сегментов в системе камер MWPC. После того как сегменты реконструированы в каждой из камер, необходимо соединить их между собой. Для этого лучшие трек-сегменты стоящих близко камер экстраполируются в среднюю плоскость $z_{\text{mid}} = (z_{\text{ch1}} + z_{\text{ch2}})/2$ между этими камерами. Оценкой сшивки трек-сегментов между камерами может служить разница между координатами их проекций в средней плоскости и между параметрами наклона соединяемых сегментов (рис. 11).

Лучшие сшивки пар трек-сегментов отбираются с помощью критерия χ_{match}^2 (рис. 12):

$$\chi_{\text{match}}^2 = \frac{\text{min_Dist } X^2}{\sigma_x^2} + \frac{\text{min_Dist } Y^2}{\sigma_y^2} + \frac{d\alpha_x^2}{\sigma_{d\alpha_x}^2} + \frac{d\alpha_y^2}{\sigma_{d\alpha_y}^2}, \quad (10)$$

где $\text{min_Dist } X$ — минимальное расстояние между треками по координате x ; $\text{min_Dist } Y$ — минимальное расстояние между треками по координате y ; $d\alpha_x$ — разница наклонов между треками в плоскости xOz ; $d\alpha_y$ — разница наклонов между треками

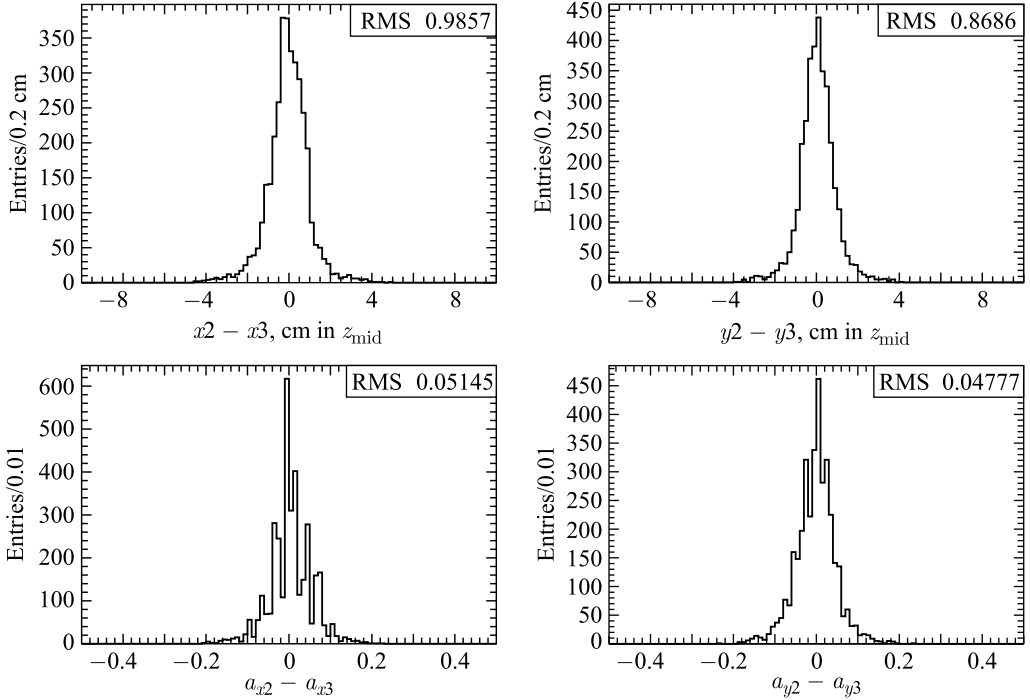


Рис. 11. Разница между координатами экстраполированных в среднюю плоскость z_{mid} сегментов (вверху) и параметрами углов сегментов (внизу) для камер MWPC2 и MWPC3 на данных Run3 без магнитного поля

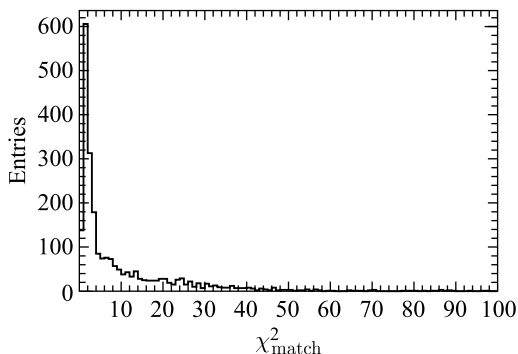


Рис. 12. Распределение χ^2_{match} на данных Run3 без магнитного поля ($B = 0$)

в плоскости yOz ; σ_i — среднеквадратичные отклонения (RMS) этих величин, взятые из распределений на рис. 11.

2.5. Экстраполяция MWPC-треков в мишень ($z_{\text{Glob}} = 0$). Еще одной оценкой качества реконструкции трека может быть его экстраполяция в мишень (начало координат). В этом случае необходимо учитывать влияние наклона трека на большом расстоянии от мишени до камеры.

По известным параметрам восстановленного трека в каждой i -й камере MWPC трек экстраполируется в его начало, т. е. в мишень при $z_{\text{Glob}} = 0$:

$$x_{i0} = a_{xi}(z_{\text{Glob}} - z_i) + b_{xi}, \quad y_{i0} = a_{yi}(z_{\text{Glob}} - z_i) + b_{yi}, \quad (11)$$

где x_{i0} и y_{i0} — координаты трека в мишени; z_i — координата центра i -й камеры вдоль оси z ; a_{xi} , a_{yi} — параметры наклона трека в i -й камере; b_{xi} , b_{yi} — параметры положения трека в i -й камере, $i = 1, 2, 3$.

Такая экстраполяция используется для выравнивания камер относительно пучка и мишени на данных без магнитного поля.

2.6. Геометрическое выравнивание камер MWPC в глобальной системе координат. Так как экспериментальная установка является системой многих детекторов, их взаимное расположение может быть нарушено при сборке и установке, что может приводить к систематическому сдвигу регистрируемых данных. Определение и компенсация этих сдвигов математическим путем («выравнивание») — обязательное условие качественной реконструкции трека. При реконструкции трека необходимо учесть возможные сдвиги по координатам и углам каждой камеры из системы детекторов.

Для Run3 каждую камеру необходимо сдвинуть по координате x и y и повернуть в плоскостях xOz и yOz в глобальной системе координат на величины, указанные в табл. 1.

Таблица 1. Сдвиг камер MWPC в Run3

Камера	x_{sh} , см	y_{sh} , см	$x_{\text{slope_sh}}$	$y_{\text{slope_sh}}$
Ch1	0	8,5	0,04	0
Ch2	-72,1	0	-0,1055	-0,01
Ch3	-75,15	0,1	-0,097	-0,01

Таблица 2. Сдвиг камер MWPC в Run2

Камера	x_{sh} , см	y_{sh} , см	x_{slope_sh}	y_{slope_sh}
Ch1	-0,6	8,0	0	0
Ch2	0	7,9	0	0
Ch3	-15,0	0,2	0	0

Аналогично для Run2 данные представлены в табл. 2.

Сдвиг камер MWPC2 и MWPC3 после магнита на 73 см в Run3 необходим для повышения эффективности работы камер, так как частицы, вылетевшие после взаимодействия пучка с мишенью, отклоняются магнитным полем вдоль оси X . В проведенных технических экспериментах рабочая область DCH, стоящих после камер MWPC, была подключена не полностью, и сдвиги необходимы для лучшей сшивки треков между детекторами.

3. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Оценка эффективности работы камер MWPC. Выбирались лучшие сегменты по критерию χ^2 в каждой камере, для них оценивалась эффективность на плоскость. Для этого использовался простой алгоритм. Присутствие или отсутствие срабатывания в плоскости дает вклад в эффективность или неэффективность этой плоскости. При этом для получения несмещенных оценок для трек-сегментов с минимальным числом точек (четыре) учитывался только вклад в неэффективность.

Пусть вероятность срабатывания плоскости p — одинаковая для всех плоскостей камеры. Тогда справедлива статистическая биномиальная формула расчета эффективности реконструкции сегмента в камере с минимум четырьмя точками [11]:

$$\varepsilon_{ch}(4/6) = p^6 + C_6^1 p^5 (1-p) + C_6^2 p^4 (1-p)^2, \quad (12)$$

где p^6 — вероятность собранных шеститочечных сегментов, $C_6^1 p^5 (1-p)$ — пятиточечных, $C_6^2 p^4 (1-p)^2$ — четырехточечных сегментов.

Оценки эффективности работы каждой камеры в техническом сеансе-2015 представлены на рис. 13. В Run2 камера MWPC3 имела плохо работающие («шумящие») плоскости v^+ , u^- , v^- . Поэтому в этой камере при реконструкции требовали условие минимум пяти точек в сегменте, а в следующем сеансе Run3 эта камера была переставлена в другую область для исследования свойств пучка до мишени.

3.2. Измерение параметров пучка. Как сказано выше, две камеры MWPC в Run2 располагались до магнита. Поэтому с их помощью были измерены параметры пучка — поперечные размеры и его угловой разброс.

Для выполнения поставленной задачи из сегментов в каждой из двух камер были выбраны лучшие пары с минимальной сшивкой (10), включающей условие на минимальное расстояние и разброс по углам между сегментами. После этого производилось фитирование прямой линией по всем измерениям (минимум 8 из 12 возможных точек на трек) по двум камерам. Лучший трек был отобран по распределению χ^2 (8), представленному на рис. 14.

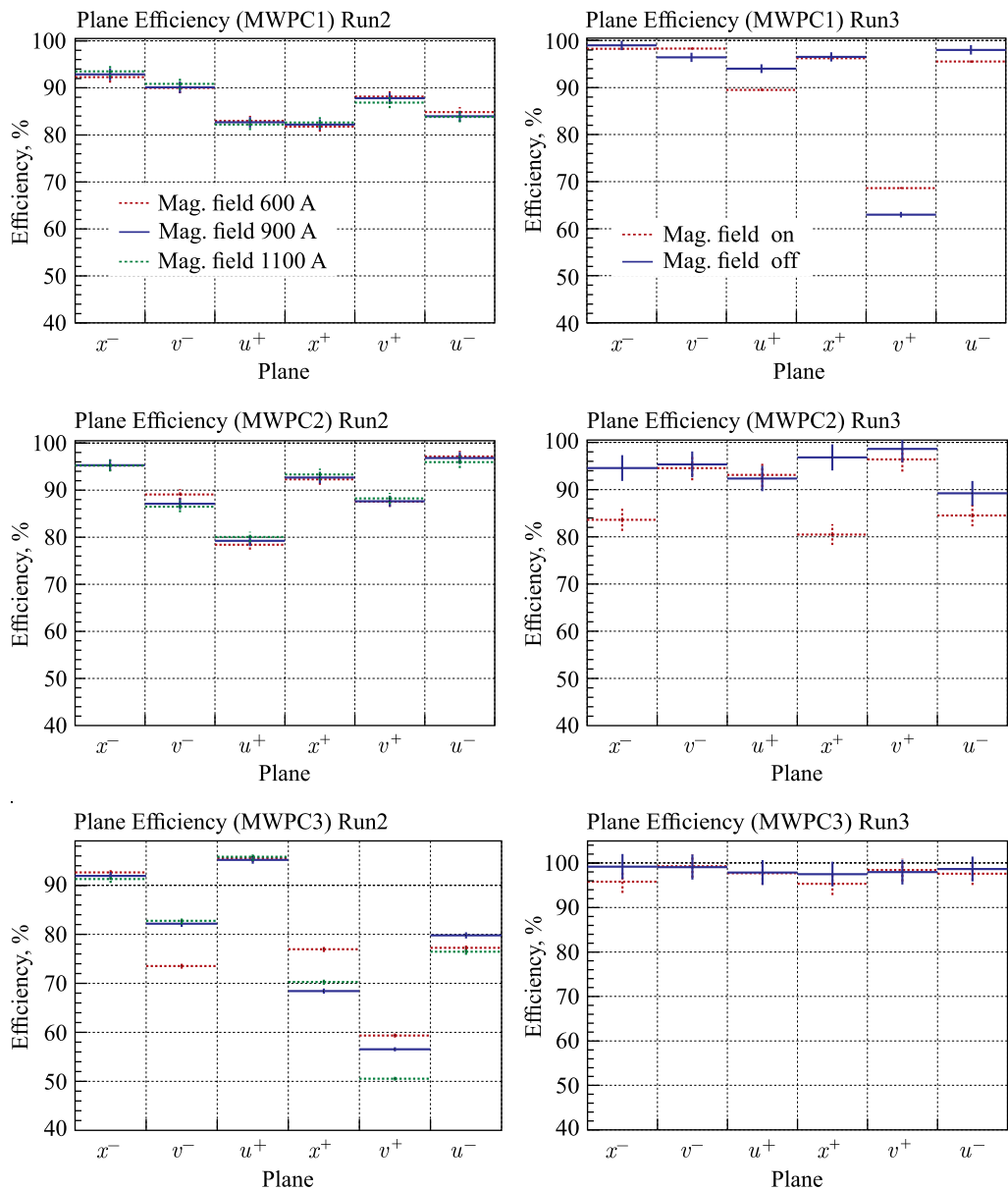


Рис. 13. Оценка эффективности работы для каждой плоскости камеры MWPC1, MWPC2 и MWPC3 в технических сеансах Run2 и Run3 с различным магнитным полем и без него

Для этого была выбрана новая локальная система координат с геометрическим центром между камерами — новый локальный ноль системы камер ($z_{loc} = 0$). Эта координата, в глобальной системе координат с центром $z_{Glob} = 0$ в мишени, обозначена z_{12} (рис. 15).

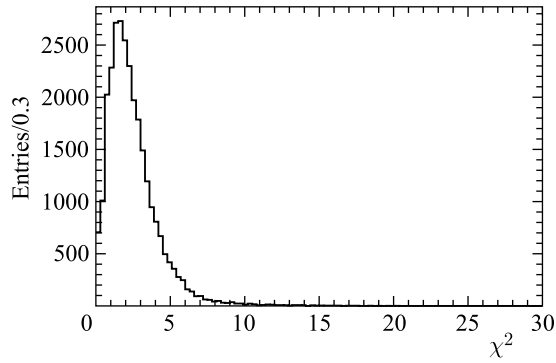


Рис. 14. Распределение χ^2 на данных Run2 без магнитного поля ($B = 0$) для фитированных треков локальной системы по камерам до магнита

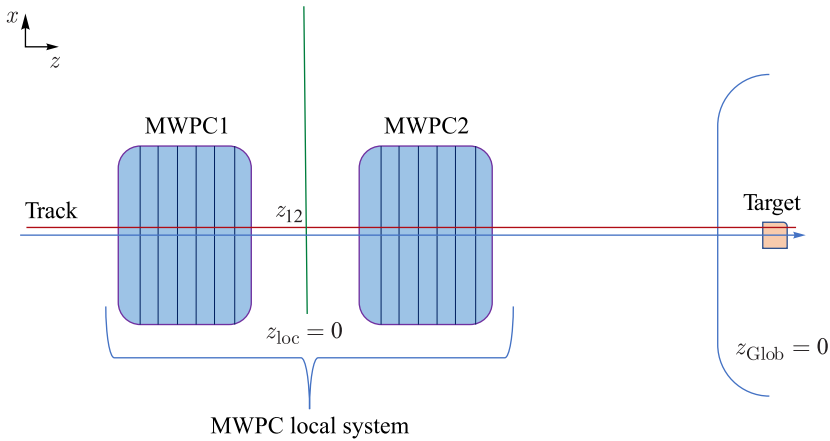


Рис. 15. Положение глобальной системы координат с $z_{\text{Glob}} = 0$ и локальной системы координат камер MWPC с $z_{\text{loc}} = 0$

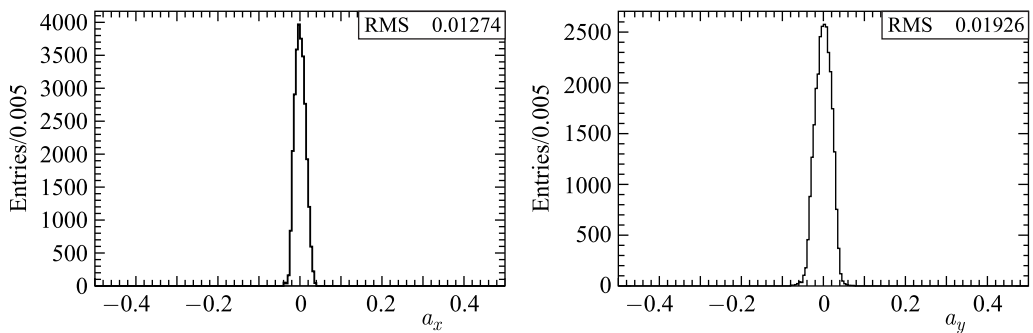


Рис. 16. Угловые параметры пучка в плоскостях xOz и yOz на данных MWPC

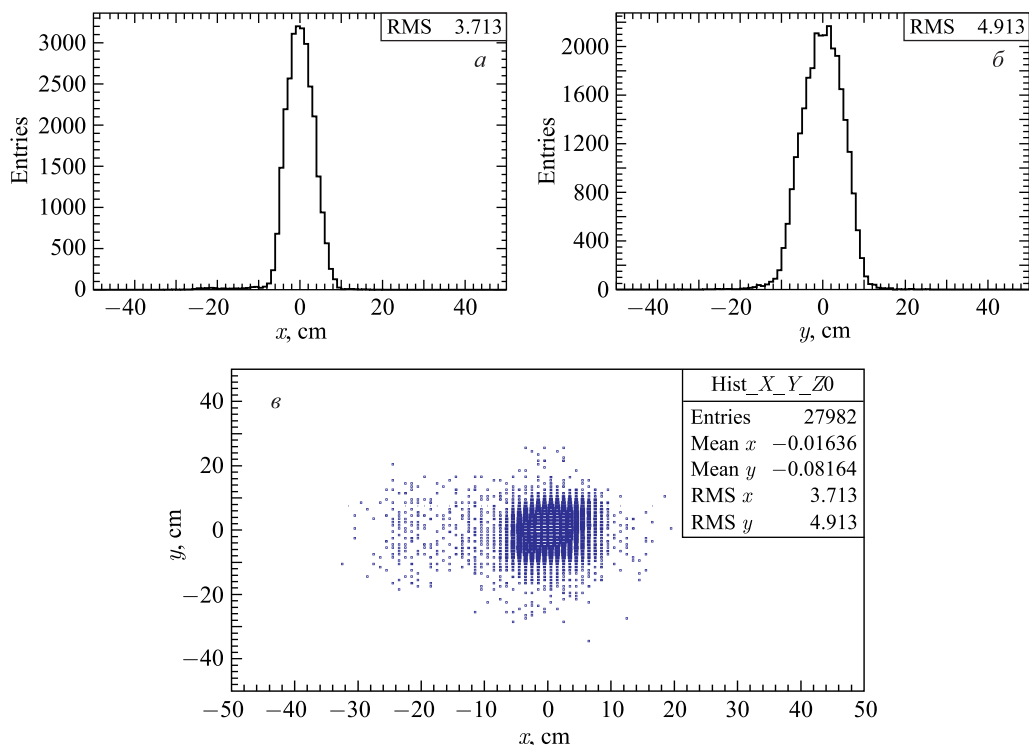


Рис. 17. Поперечные размеры пучка в области мишени при $z_{\text{Glob}} = 0$, каждая координата x и y (а, б) и координаты y и x (в)

Найдя лучший трек, можно оценить угловые параметры пучка (рис. 16). По известным параметрам восстановленного трека в системе камер MWPC трек был экстраполирован в начало глобальной системы координат, т. е. в мишень при $z_{\text{Glob}} = 0$:

$$x_0 = a_x(z_{\text{Glob}} - z_{12}) + b_x, \quad y_0 = a_y(z_{\text{Glob}} - z_{12}) + b_y, \quad (13)$$

где x_0 и y_0 — координаты трека в мишени; a_x, a_y — параметры наклона трека; b_x, b_y — параметры положения трека в локальной системе координат ($z_{\text{loc}} = 0$).

Распределения поперечных размеров пучка в области мишени представлены на рис. 17.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан алгоритм реконструкции траекторий заряженных частиц в системе многопроволочных пропорциональных камер в эксперименте VM@N. С помощью реконструированных траекторий выполнено геометрическое выравнивание камер в глобальной системе координат. Рассчитана эффективность регистрации треков для каждой плоскости камер MWPC. С помощью разработанного алгоритма на базе экспериментальных

данных, полученных во взаимодействиях дейтронов и ионов углерода с углеродной и медной мишенями, реконструированы треки пучка до взаимодействия в мишени и траектории заряженных частиц после взаимодействия. Измерены параметры пучка (поперечные размеры и угловой разброс).

Благодарности. Авторы выражают благодарность сотрудникам ЛФВЭ ОИЯИ М. Капишину, С. Мерцу и В. Бабкину за полезные обсуждения в процессе выполнения данной работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Adams J. et al. (STAR Collab.).* Experimental and Theoretical Challenges in the Search for the Quark Gluon Plasma: The STAR Collaboration's Critical Assessment of the Evidence from RHIC Collisions // Nucl. Phys. A. 2005. V. 757. P. 102–183; arXiv:0501009 [nucl-ex].
2. *Adcox K. et al. (STAR Collab.).* Formation of Dense Partonic Matter in Relativistic Nucleus–Nucleus Collisions at RHIC: Experimental Evaluation by the PHENIX Collaboration // Nucl. Phys. A. 2005. V. 757. P. 184–283; arXiv:0410003 [nucl-ex].
3. *Steinheimer J. et al. // Prog. Part. Nucl. Phys.* 2009. V. 62. P. 313.
4. *Steinheimer J., Gudima K., Botvina A., Mishustin I., Bleicher M., Stocker H. // Phys. Lett. B.* 2012. V. 714. P. 85.
5. *Sauli F.* Principles of Operation of Multiwire Proportional and Drift Chambers // CERN Yellow Reports. CERN-77-09. P. 79–188; doi: 10.5170/CERN-1977-009 (Experimental Techniques in High Energy Physics).
6. *Бок Р., Грот Х., Ноц Д., Реглер М.* Методы анализа данных в физическом эксперименте. М.: Мир, 1993.
7. *Kapishin M. (for the BM@N Collab.).* The Fixed Target Experiment for Studies of Baryonic Matter at the Nuclotron (BM@N) // Eur. Phys. J. A. 2016. V. 52. P. 213; doi: 10.1140/epja/i2016-16213-0.
8. *Bouclier R., Charpak G., Chesi E., Dumps L., Fischer H.G., Hilkei H.J., Innocenti P.G., Maurin G., Minten A., Naumann L., Piuze F., Santiard J.C., Ullaland O.* Proportional Chambers for a 500000-wire Detector // WSS in 20th Century Physics. 1995. V. 6. P. 144–153; doi: 10.1142/9789812795878_0025 (Research on Particle Imaging Detectors).
9. *Бабкин В.А., Базылев С.Н., Буряков М.Г., Волгин С.В., Головатюк В.М., Дмитриев А.В., Дулов П.О., Егоров Д.С., Лобастов С.П., Петров В.А., Румянцев М.М., Слепнев В.М., Слепнев И.В., Терлецкий А.В., Филиппов И.А., Шутов А.В., Щигунов А.В., Юревич В.И.* Установка для испытания детекторов на пучках нуклотрона «Тестовый канал MPD». Препринт ОИЯИ P13-2016-37. Дубна, 2016.
10. *Зубов К.А., Каржавин В.Ю., Мовчан С.А.* Математическое обеспечение многопроволочной пропорциональной камеры с катодным считыванием информации. Препринт ОИЯИ P10-99-118. Дубна, 1999.
11. *Худсон Д.* Статистика для физиков. М.: Мир, 1970.

Получено 21 апреля 2018 г.