

УДК 539.1.074

МЕТОДИКА ВЫЧИСЛЕНИЯ УГЛА НАКЛОНА АНОДНОЙ ПРОВОЛОКИ ПЕРВОЙ МЮОННОЙ СТАНЦИИ (ME1/1) УСТАНОВКИ КОМПАКТНЫЙ МЮОННЫЙ СОЛЕНОИД (CMS)

С.А.Мовчан, П.В.Моисенз

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Для достижения высокой координатной точности многопроволочных пропорциональных камер с катодным считыванием информации (МПК) в скрещенных электрических и магнитных полях необходимо знать величину эффективного угла Лоренца. Разработана новая методика измерения эффективного угла, не требующая создания специализированных детекторов. Выполнены экспериментальные измерения эффективного угла наклона анодной проволоки МПК в различных газовых смесях при работе в магнитном поле, близком к полю CMS. Показано влияние компонентов магнитного поля на координатную точность.

For achievement of a high spatial resolution of the Cathode Strip Chamber (CSC) in crossed electric and magnetic fields it's necessary to know the effective Lorentz angle. A new method has been proposed for the effective Lorentz angle measurement without using special detectors. The experimental results have been used for CSC anode wire incident angle measurement for different gas mixtures and a magnetic field similar to that of Compact Muon Solenoid (CMS) set-up. The magnetic field components influence on the spatial resolution has been shown.

Первая мюонная станция (ME1/1) расположена в торцевой части установки компактный мюонный соленоид (CMS) [1] и предназначена для регистрации мюонов в магнитном поле порядка 3 Тл (см. рис. 1) [2].

ME1/1 выполнена в виде кольцевого детектора (с внутренним радиусом, равным 1060 мм, внешним — 2565 мм и толщиной 552 мм), составленного из трапецевидных многопроволочных пропорциональных камер с катодным считыванием информации (МПК) [1, 3]. Каждая МПК состоит из шести регистрирующих слоев, один из которых схематически представлен на рис. 2.

МПК является газовым детектором, в котором электроны ионизации, дрейфующие в электрическом поле к анодной проволоке, под действием магнитного поля сносятся, что приводит к потере точности восстанавливаемой координаты мюона. Ниже будет показано, что поворот МПК либо анодной проволоки позволяет в основном сохранить точность. Традиционные методы экспериментального определения необходимого угла поворота основаны на использовании специализированных детекторов (например, с механически поворачиваемой плоскостью анодных проволок и т.п.) [4]. В данной работе предложены методы вычисления без применения специализированных детекторов.

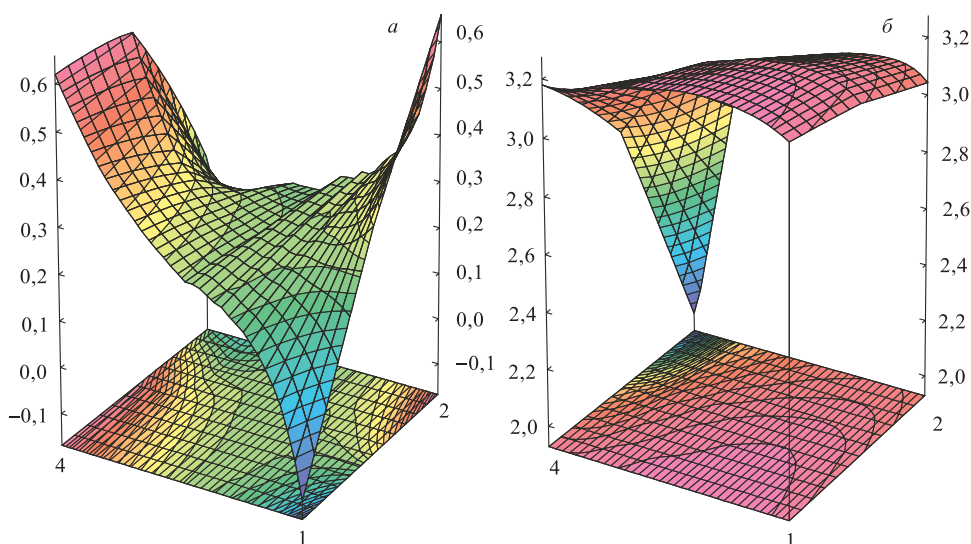


Рис. 1. Распределение радиальной (а) и нормальной (б) составляющих магнитного поля в рабочем объеме станции ME1/1

Из рис. 1 видно, что магнитное поле в рабочем объеме ME1/1 состоит как из нормальной (от 2,5 до 3,1 Тл), так и радиальной (от -0,1 до 0,5 Тл) составляющей. Принимая во внимание неоднородность магнитного поля в объеме ME1/1, для выбора оптимального (с точки зрения средней координатной точности по всей чувствительной площади МПК) угла, необходимо найти его зависимость от каждой составляющей магнитного поля.

Рассмотрим подробнее движение электрона в газовом объеме, в скрещенных электрическом и магнитном полях. В рамках макроскопического подхода необходимое уравнение движения электрона можно представить как

$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = e\mathbf{E} + e[\mathbf{v}\mathbf{B}] - K\mathbf{v},$$

где m — масса электрона; e — заряд электрона; \mathbf{v} — вектор скорости электрона; \mathbf{E} — вектор электрического поля; \mathbf{B} — вектор магнитного поля; K — коэффициент, характеризующий сопротивление среды (величина $\tau \equiv m/K$ имеет размерность времени и определяет среднее время свободного пробега электрона в скрещенных электрическом и магнитном полях).

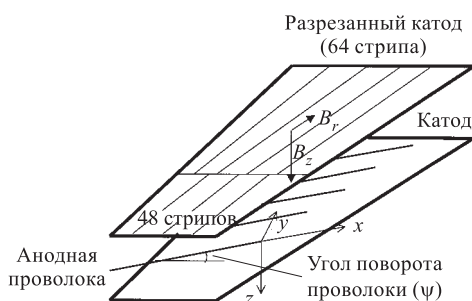


Рис. 2. Схема одного регистрирующего слоя многопроволочной пропорциональной камеры с катодным считыванием

Для случая, когда $t \gg \tau$,

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = 0, \quad \mathbf{v} = \frac{\mu}{1 + (\omega\tau)^2} \left[\mathbf{E} + \frac{\omega\tau}{B} [\mathbf{E}\mathbf{B}] + (\omega\tau)^2 \frac{\mathbf{E}\mathbf{B}}{B^2} \mathbf{B} \right],$$

где ω (ларморова частота) и μ — это: $\omega = (e/m)\mathbf{B}$, $\mu = (e/m)\tau$.

Рассмотрим подробнее влияние каждой из составляющих магнитного поля на движение электрона. Введем правую прямоугольную декартову систему координат (xyz) такую, что ось x направлена вдоль анодной проволоки, а ось y лежит в плоскости анодных проволок (см. рис. 2). В упрощенной модели дрейф электрона к анодной проволоке можно разбить на два этапа:

- движение к плоскости анодных проволок, где $E = (0, 0, \pm E_z)$;
- движение к анодной проволоке, где $E = (0, \pm E_y, 0)$.

В дальнейших выкладках будем предполагать, что угол поворота анодной проволоки (ψ) равен нулю.

СЛУЧАЙ РАДИАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ

Для случая радиальной составляющей магнитного поля на первом этапе движения $B = (0, B_y, 0)$ и

$$v_x = \mp \frac{\mu}{1 + (\omega\tau)^2} \omega\tau E_z, \quad v_y = 0, \quad v_z = \pm \frac{\mu}{1 + (\omega\tau)^2} \omega\tau.$$

В этом случае тангенс угла Лоренца (α_L) равен $\text{tg}(\alpha_L) = v_x/v_z = -\omega\tau$. Следует ожидать линейной зависимости α_L от величины магнитного поля, так как ω зависит прямо пропорционально от B , а τ для условий нашей задачи слабо зависит от B . На втором этапе движения

$$v_x = 0, \quad v_y = \pm \mu E_y, \quad v_z = 0,$$

т.е. никакого сноса электронов нет. Можно показать, что влияние сноса электронов на точность определения координаты для параллельных треков компенсируется поворотом детектора на угол Лоренца в плоскости xz . На рис. 3 [1] представлено влияние радиальной составляющей магнитного поля на снос электронов вдоль анодной проволоки. Из рис. 3 видно, что при угле наклона трека, равном α_L , электроны ионизации собираются в одной точке, что обеспечивает сохранение координатной точности.

Очевидно, что угол Лоренца непостоянен в рабочем объеме МПК, т.к. непостоянна напряженность электрического поля, поэтому на практике вычисляется некий средний угол, называемый эффективным углом Лоренца (ψ) [4]. Поведение ψ в зависимости от радиальной составляющей было изучено с использованием прототипа P0 [1] на космических мюонах в магнитном поле, ориентированном вдоль стрипов на установке RD5 (ЦЕРН, Швейцария). Для вычисления угла ψ контролировались пары значений случайных величин (наклон трека в плоскости xz и отклонение измеренной координаты мюона от реконструированного трека). На рис. 4 представлено распределение пары случайных величин для магнитного поля $B_y = 3$ Тл. Анализируя рис. 4, легко найти значение необходимого угла, принимая во внимание, что наилучшая координатная точность достигается тогда, когда угол наклона трека совпадает с эффективным углом. На рис. 5 представлена

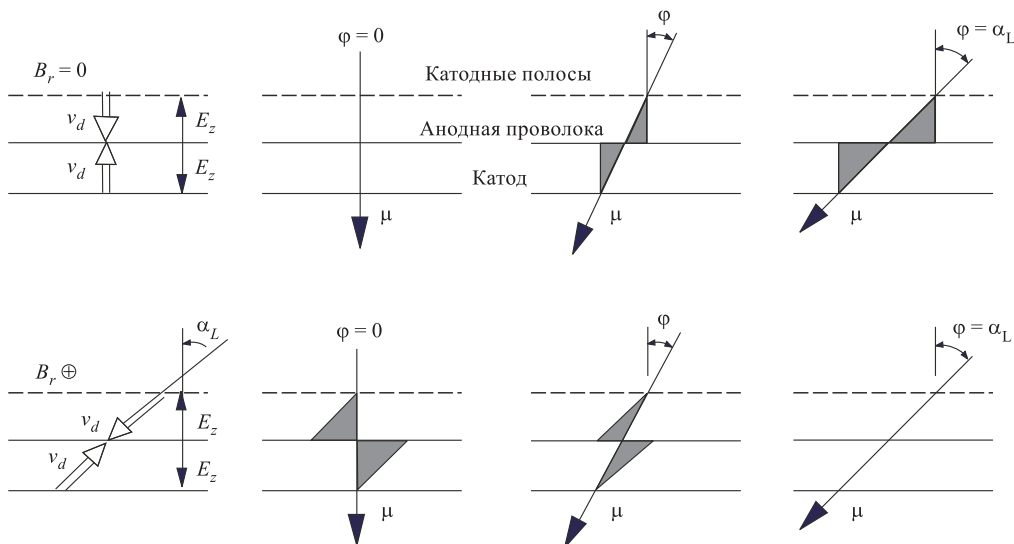


Рис. 3. Влияние радиальной составляющей магнитного поля на снос электронов вдоль анодной проволоки для различных углов наклона треков мюонов

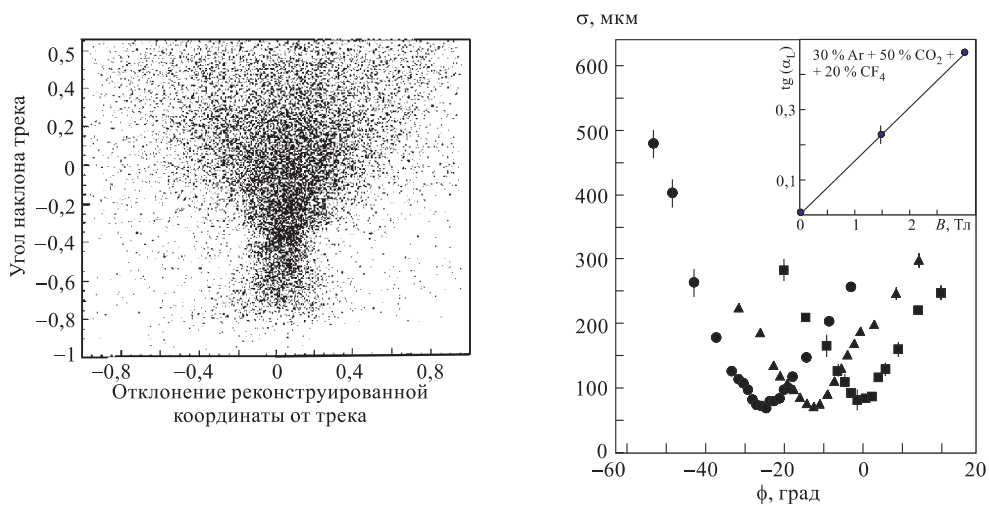


Рис. 4. Распределение пар случайных величин (отклонение реконструированной координаты мюона от трека и угол наклона трека мюона)

Рис. 5. Зависимость точности реконструированной координаты мюона от угла наклона трека в плоскости xz для различных значений радиальной составляющей магнитного поля: \blacksquare — $B = 0$ Тл; \blacktriangle — $B = 1,5$ Тл; \bullet — $B = 3$ Тл

зависимость координатной точности от угла наклона трека в плоскости xz для различных значений магнитного поля.

Как видно на рис. 5, тангенс эффективного угла практически линейно зависит от радиальной компоненты и $\text{tg}(\psi) \approx 0,157B_y$.

СЛУЧАЙ НОРМАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ

Для случая нормальной составляющей магнитного поля на первом этапе движения электрона $B = (0, 0, B_z)$ и

$$v_x = 0, \quad v_y = 0, \quad v_z = \pm \mu E_z,$$

т. е. никакого сноса электронов нет. На втором этапе

$$v_x = \pm \frac{\mu}{1 + (\omega\tau)^2} \omega\tau E_y, \quad v_y = \pm \frac{\mu}{1 + (\omega\tau)^2} E_y, \quad v_z = 0.$$

В этом случае $\text{tg}(\alpha) = v_z/v_y = \omega\tau$ и следует ожидать, как и в случае радиальной составляющей, линейную зависимость $\text{tg}(\alpha_L)$ от величины магнитного поля. Однако значения углов для двух рассмотренных случаев, скорее всего, будут различны, т.к. τ зависит от величины магнитной индукции и напряженности электрического поля, непостоянной в рабочем объеме МПК. Кстати, легко найти, что $v(E, B) = v(E, B = 0) \cos(\alpha_L)$ [5]. Можно показать, что поворот анодной проволоки на угол α_L в плоскости xy компенсирует влияние сноса электронов на точность восстанавливаемой координаты мюона (см. рис. 6) [1].

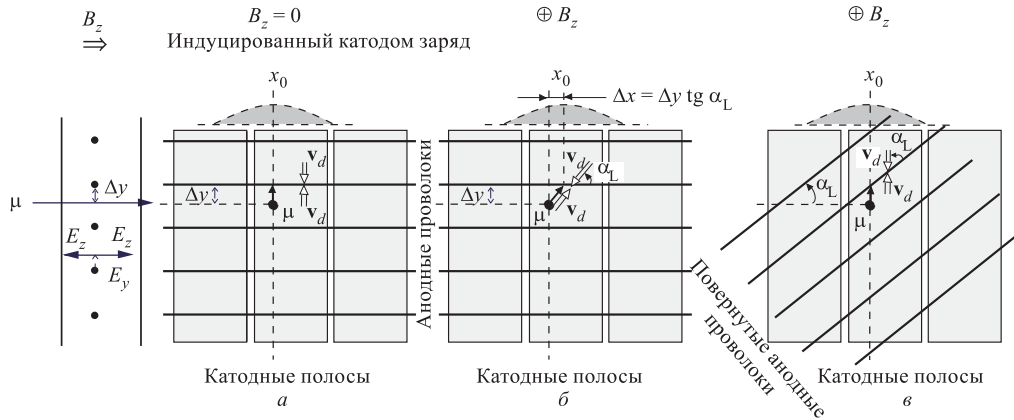


Рис. 6. Влияние нормальной составляющей магнитного поля на снос электронов для различных углов поворота анодной проволоки

Для изучения влияния нормальной составляющей магнитного поля на эффективный угол поворота анодной проволоки в экспериментальной зоне H2 (ЦЕРН) была собрана установка, представленная на рис. 7.

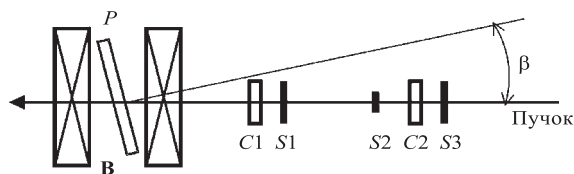


Рис. 7. Схема установки для измерения эффективного угла: P — прототип МПК; $C1, C2$ — пучковые камеры; $S1, S2, S3$ — триггерные сцинтилляционные счетчики; β — угол поворота МПК

Необходимые измерения проводились на прототипах МПК Р2, Р3 [6] и Р4 [7], при этом вектор магнитного поля был ориентирован вдоль пучка. Для подавления систематики сноса электронов в детектирующих слоях МПК была повернута на угол $\beta = 2^\circ$, при этом радиальная составляющая магнитного поля настолько мала, что ее влиянием на координатную точность можно пренебречь. Для определения зависимости эффективного угла от нормальной составляющей контролировалась координатная точность слоя МПК (с анодными проволоками, повернутыми на угол в $21,2^\circ$) при изменении магнитного поля. Очевидно, что наилучшая координатная точность достигается тогда, когда угол поворота анодной проволоки совпадает с эффективным углом (см. рис. 8).

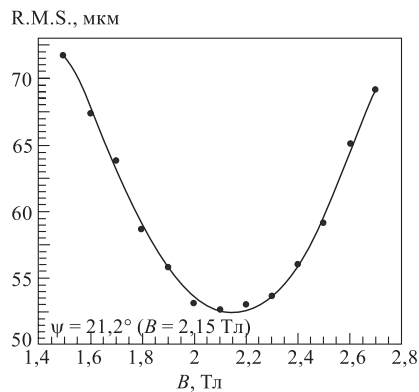


Рис. 8. Зависимость координатной точности от величины магнитного поля

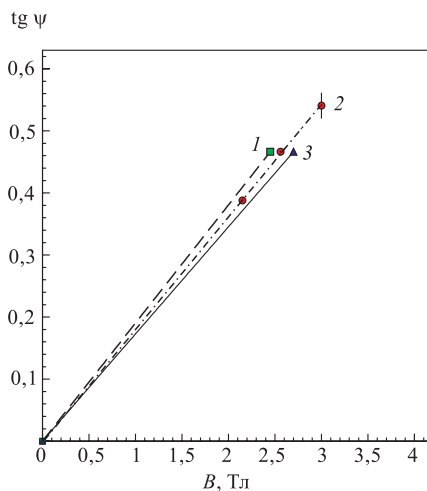


Рис. 9. Зависимость эффективного угла от нормальной составляющей магнитного поля для различных газовых смесей: 1 — Ar(40 %) + CF₄(10 %) + CO₂(50 %); 2 — Ar(30 %) + CF₄(20 %) + CO₂(50 %); 3 — Ar(30 %) + CF₄(10 %) + CO₂(60 %)

На рис. 9 представлена зависимость тангенса эффективного угла от величины нормальной составляющей магнитного поля для различных газовых смесей. Три экспериментальные точки на центральной прямой соответствуют результатам исследования на трех прототипах МПК с различными углами поворота анодных проволок. Как видно из рис. 9, $\operatorname{tg}(\psi) \approx 0,18B_z$ для газовой смеси $\text{Ar}(30\%) + \text{CF}_4(20\%) + \text{CO}_2(50\%)$.

СЛУЧАЙ КОМБИНИРОВАННОГО ПОЛЯ

Для изучения комбинированного влияния радиальной и нормальной составляющих на эффективный угол использовалась вышеизложенная методика, при этом прототип МПК

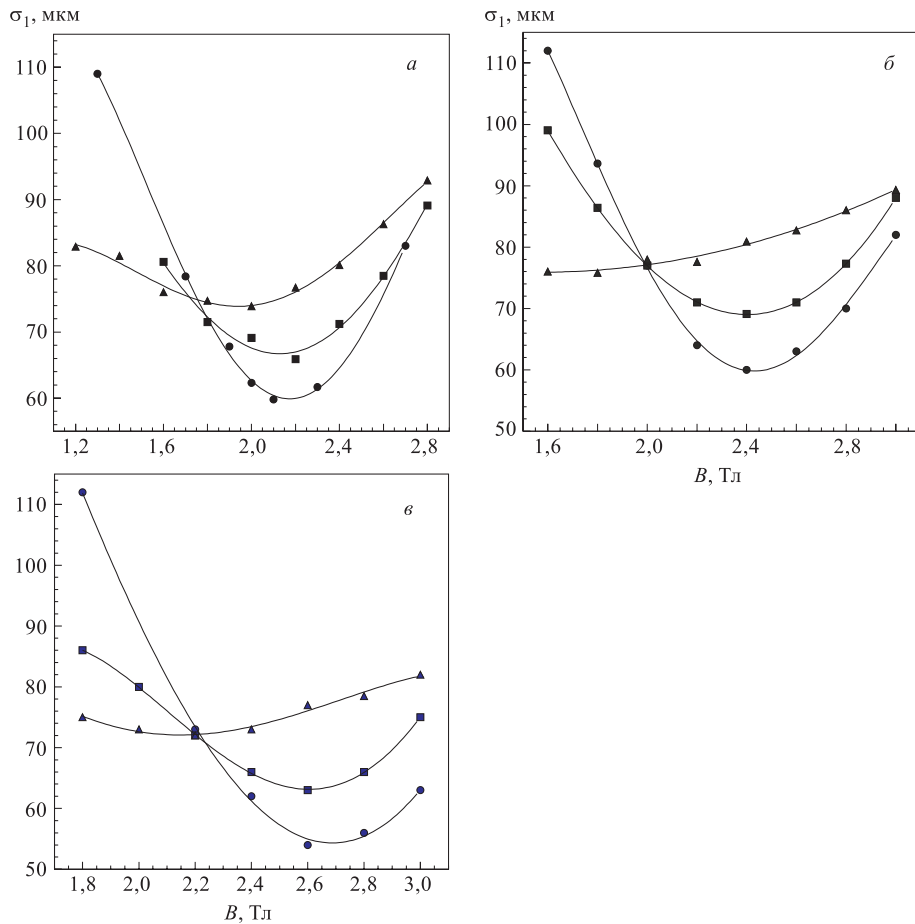


Рис. 10. Зависимость координатной точности слоя МПК от магнитного поля (● — $B_r/B_z = 0,44$ Тл; ■ — $B_r/B_z = 0,176$ Тл; ▲ — $B_r/B_z = 0,268$ Тл) для различных газовых смесей: а) (прототип P3 [3]), $\text{Ar}(30\%) + \text{CF}_4(20\%) + \text{CO}_2(50\%)$; б) (прототип P4 [7]), $\text{Ar}(40\%) + \text{CF}_4(10\%) + \text{CO}_2(50\%)$; в) (прототип P4 [7]), $\text{Ar}(30\%) + \text{CF}_4(10\%) + \text{CO}_2(60\%)$

поворачивался на $2,5^\circ$, 10° и 15° , что обеспечивало различное соотношение компонентов магнитного поля. Можно показать, что для этих условий наклон трека не влияет на значение эффективного угла. На рис. 10, *а, б, в* представлены зависимости координатной точности от величины магнитного поля для различных газовых смесей.

Из рис. 10, *а, б, в* легко оценить вклад радиальной составляющей в деградацию координатной точности (см. рис. 11).

Полученные результаты позволяют построить кусочно-линейную аппроксимацию зависимости эффективного угла от радиальной и нормальной составляющих магнитного поля для различных газовых смесей (см. рис. 12, *а, б, в*).

Интересно, что на величину эффективного угла поворота анодной проволоки влияет как нормальная, так и радиальная составляющая магнитного поля. Иными словами, поворот анодной проволоки в определенной степени компенсирует негативное влияние радиальной составляющей на координатную точность детектора.

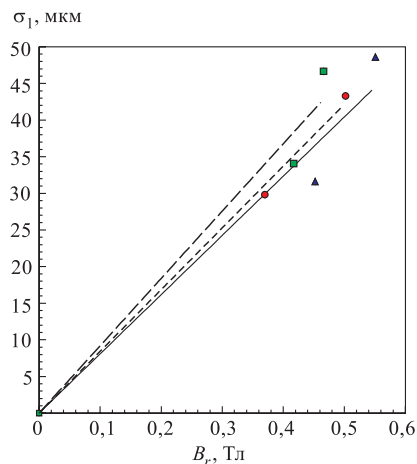


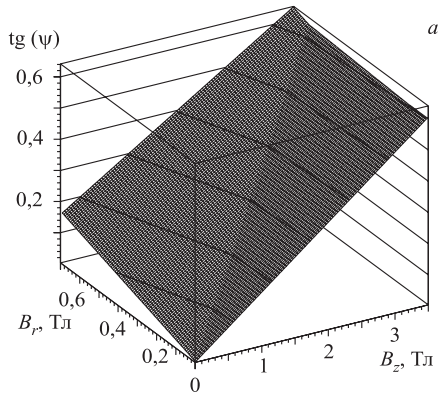
Рис. 11. Вклад радиальной составляющей в деградацию координатной точности для различных газовых смесей ($\sigma_r \approx 80$ мкм·Тл): \blacktriangle — Ar(30%) + CF₄(10%) + CO₂(60%); \bullet — Ar(30%) + CF₄(20%) + CO₂(50%); \blacksquare — Ar(40%) + CF₄(10%) + CO₂(50%)

ВЫЧИСЛЕНИЕ УГЛА НАКЛОНА АНОДНОЙ ПРОВОЛОКИ

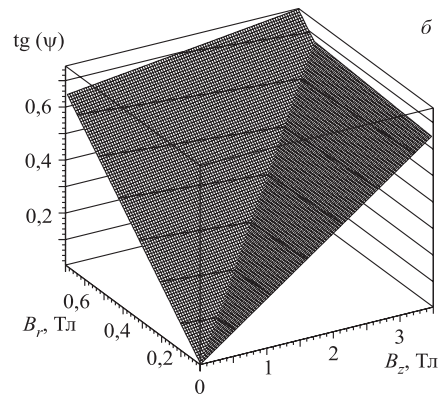
Выше было показано, что влияние радиальной составляющей в основном компенсируется поворотом МПК, однако воспользоваться этим результатом для условий нашей задачи сложно, так как МПК имеют радиальную структуру и мюоны противоположных знаков рождаются равновероятно в изучаемых физических процессах. Как видно из рис. 11, деградация координатной точности регистрирующего слоя из-за влияния радиальной составляющей в худшем случае не превышает 50 мкм, поэтому ниже речь пойдет только о влиянии нормальной составляющей на эффективный угол в условиях неоднородного магнитного поля.

Особенность задачи состоит в том, что в рабочем объеме станции ME1/1 плотность мюонов непостоянна, эффективный угол (ψ) меняется в зависимости от изменения магнитного поля, существует неопределенность параметров будущего магнита, и радиальная структура станции не позволяет полностью компенсировать влияние магнитного поля по всей площади на координатную точность. Средняя координатная точность по всему рабочему объему может быть вычислена как

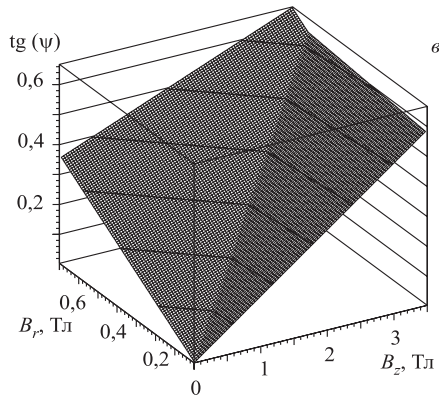
$$\overline{\sigma(\psi)} = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \sigma^2(\psi, B, R, \varphi, z) P_b(B) P_\mu(R, \varphi, z) d(B) d(R) d(\varphi) d(z)},$$



$$\begin{aligned} \operatorname{tg}(\psi) &= 0,0376B_r + 0,1722B_z \text{ для } B_r/B_z \leq 0,176 \\ \operatorname{tg}(\psi) &= 0,232B_r + 0,1379B_z \text{ для } B_r/B_z \geq 0,176 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} \operatorname{tg}(\psi) &= 0,0506B_r + 0,186B_z \text{ для } B_r/B_z \leq 0,176 \\ \operatorname{tg}(\psi) &= 0,93B_r + 0,0309B_z \text{ для } B_r/B_z \geq 0,176 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} \operatorname{tg}(\psi) &= 0,0686B_r + 0,1675B_z \text{ для } B_r/B_z \leq 0,176 \\ \operatorname{tg}(\psi) &= 0,512B_r + 0,0894B_z \text{ для } B_r/B_z \geq 0,176 \end{aligned}$$

Рис. 12. Зависимость эффективного угла от радиальной и нормальной составляющих магнитного поля для газовой смеси: а) $\text{Ar}(30\%) + \text{CF}_4(20\%) + \text{CO}_2(50\%)$; б) $\text{Ar}(40\%) + \text{CF}_4(10\%) + \text{CO}_2(50\%)$; в) $\text{Ar}(30\%) + \text{CF}_4(10\%) + \text{CO}_2(60\%)$

где σ — стандартное отклонение плотности распределения ошибок измерения координаты мюона; P_b — плотность, характеризующая неопределенность параметров магнита; P_μ — плотность распределения мюонов в рабочем объеме; B — значение магнитного поля в центре CMS; R — радиус; φ — азимутальный угол; z — продольная координата.

На рис. 13 представлена зависимость средней координатной точности от эффективного угла для равномерной плотности P_b в интервале от 3,5 до 4 Тл.

Как видно из рис. 13, угол $\psi \approx 27^\circ$. Комбинируя результаты моделирования и экспериментального исследования прототипов МПК можно предсказать распределение координатной точности по площади МПК (см. рис. 14).

Для газовой смеси $\text{Ar}(30\%) + \text{CF}_4(10\%) + \text{CO}_2(60\%)$ эффективный угол наклона анодной проволоки $\psi \approx 29,5^\circ$.

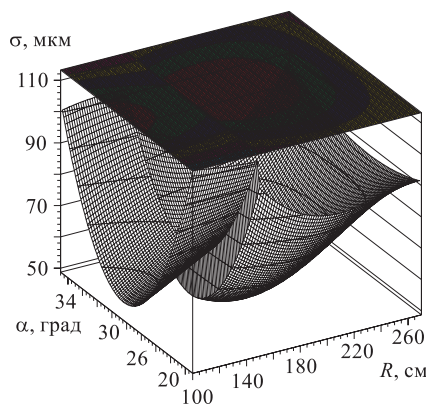
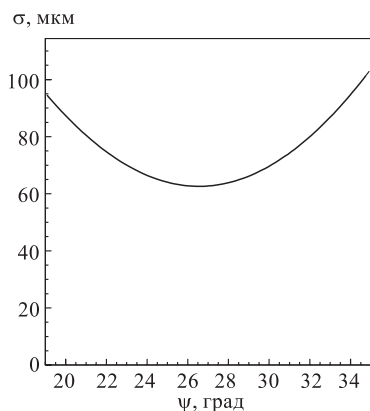


Рис. 13. Зависимость средней координатной точности станции ME1/1 от эффективного угла наклона анодной проволоки для газовой смеси $\text{Ar}(30\%) + \text{CF}_4(10\%) + \text{CO}_2(60\%)$

Рис. 14. Распределение координатной точности по площади отдельного слоя МПК для газовой смеси $\text{Ar}(30\%) + \text{CF}_4(10\%) + \text{CO}_2(60\%)$ (без учета влияния качества изготовления МПК)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана новая методика измерения эффективного угла Лоренца, не требующая создания специализированных детекторов. Выполнены экспериментальные измерения эффективного угла наклона анодной проволоки МПК для различных газовых смесей при работе в магнитном поле, близком к полю CMS. Показано влияние компонентов магнитного поля B_r и B_z на координатную точность.

Авторы выражают благодарность И.А. Голутвину за постоянный интерес к работе и ее поддержку, а также А.В. Зарубину за полезные обсуждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. CMS. The Compact Muon Solenoid. Technical Proposal. CERN/LHCC 94-38, LHCC/P1. Geneva, 1994.
CMS. The Muon Project. Technical Design Report. CERN/LHCC 97-32. CMS TDR 3. Geneva, 1997.
2. Klioukhine V.I. The TOSCA-GEANT Interface Tools. CMS CR 1998/010. Geneva, 1998.
3. Charpak G., Sauli F. High Resolution Electronic Particle 1984 by Annual Reviews Inc. Geneva, 1984. P.285;
Зубов К.А. и др. Математическое обеспечение многопроволочной пропорциональной камеры с катодным считыванием информации. Сообщение ОИЯИ Р10-99-118. Дубна, 1999.
4. Бизюков А.Н. и др. Установка для исследования дрейфовых характеристик газовых смесей в скрещенных электрических и магнитных полях. Препринт ЛИЯФ ЕР-28-1993(1897). Гатчина, 1993;
Величко Г.Н. и др. Исследование работы пропорциональной камеры с катодным съемом информации в магнитном поле. Препринт ЛИЯФ ЕР-32-1994(1974). Гатчина, 1994;

- Bonushkin Yu. et al.* A UV Laser Technique for the Lorentz Effect Compensation Studies in Endcap CSCs. CMS TN/94-223, Geneva, 1994.
5. *Tonk L.* // Phys. Rev. 1955. V.97. P.1443.
6. *Erchov Yu.V. et al.* Fabrication and Test of the Full-Scale P3 Prototype of the ME1/1 CSC. CMS IN 1997/003. Geneva, 1997.
Erchov Yu.V. et al. P3 — the Full-scale Prototype of the ME1/1 CSC. JINR Commun. E13-99-296. Dubna, 1999.
7. *Erchov Yu.V. et al.* P4 — the Pre-Production Prototype of the ME1/1 CSC. JINR Commun. E13-2000-26. Dubna, 2000.

Получено 13 апреля 2001 г.