



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова
Национального исследовательского центра
«Курчатовский институт»

Препринт 2026-2

М.Ю. Боголюбский, А.А. Волков, Д.К. Елумахов, А.А. Иванилов,
А.Н. Криницын, Н.В. Кулагин, А.А. Минаенко, Д.И. Паталаха,
В.В. Скворцов

**Калибровка Спектрометра Колец Черенковского
излучения с коническим отражателем света и
сферическим зеркалом по физическим событиям на
установке ФОДС**

Протвино 2026

Аннотация

М.Ю. Боголюбский и др. Калибровка Спектрометра Колец Черенковского излучения с коническим отражателем света и сферическим зеркалом по физическим событиям на установке ФОДС: Препринт НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ 2026-2. – Протвино, 2026. – 18 с., 11 рис.

Рассмотрена 4-х этапная процедура калибровки Спектрометра Колец Черенковского излучения (СКОЧ) с коническим отражателем света и сферическим зеркалом по физическим событиям на установке ФОДС ускорительного комплекса У-70 НИЦ "Курчатовский институт" - ИФВЭ. Использовались данные рА-взаимодействий при импульсе пучка 50 ГэВ/с. Метод построен на анализе больших данных с помощью квадратичного функционала, зависящего от множества переменных, в число которых входят набор временных сигналов СКОЧ, геометрические параметры траектории частицы и ее импульс, координаты ее попадания на основание конического отражателя, ориентация сработавших каналов СКОЧ относительно друг-друга и относительно трека частицы. Продемонстрировано чистое разделение в отобранных для процедуры калибровки событиях π^\pm -, K^\pm -мезонов и протонов в принятом интервале их импульсов (6-15) ГэВ/с. Излагаемый метод калибровки применим для любого измерительного устройства, где априори известны результаты на некотором множестве опорных точек.

Abstract

Bogolyubsky M.Yu. et al. Calibration of the Ring Imaging Cherenkov spectrometer with conical light reflector and spherical mirror on physical events at the FODS facility: NRC «Kurchatov Institute» – IHEP Preprint 2026-2. – Protvino, 2026. – p. 18, figs. 11.

A 4-step calibration procedure of the Ring Imaging Cherenkov spectrometer (RICH) with conical reflector of light and spherical mirror on physical events at the FODS setup of accelerator complex U-70 NRC «Kurchatov institute» - IHEP is considered. It was used the data of pA-interactions at beam momentum 50 GeV/c. The method is based on big data analysis using a quadratic functional, dependent on a multitude of variables, including a set of time RICH-signals, geometric parameters of the particle's trajectory and its momentum, coordinates of its impact on the conical light reflector base, orientation of workingf RICH channels relative to each other and relative to the particle's track. Clean separation of π^\pm -, K^\pm -mesons and protons in the accepted momentum range (6-15) GeV/c has been demonstrated for the events selected by the calibration procedure. The presented calibration method is applicable to any measuring device where the results at a certain set of reference points are known a priori.

Введение

Спектрометр Колец Черенковского излучения (СКОЧ) [1] входит в состав установки ФОДС [2, 3, 4, 5, 6, 7], на ускорительном комплексе У-70 НИЦ "Курчатовский институт" - ИФВЭ. ФОДС предназначен для исследования образования адронов с большими поперечными импульсами в pp- и pA-взаимодействиях [8, 9], а также вторичных мезонов, нуклонов и ядерных фрагментов в экспериментах по рассеянию ионного пучка на неподвижной мишени [10, 11, 12, 13].

Задачей СКОЧ является определение типа заряженных рожденных частиц, т.е. их идентификация по измерению угла Черенковского излучения. Его конструкция детально описана в [1]. Отметим только, что оптическая система состоит из сферического зеркала с фокусным расстоянием $F_m = 250$ см и конического отражателя света, состоящего из 48-и трапециевидных плоских зеркал плотно прилегающих к друг-другу вдоль боковой образующей конуса и переводящих Черенковский свет на поверхность цилиндра, в который помещен спектрометр. Здесь через равные промежутки расположены 24 годоскопических фотоумножителя (ГФЭУ) [14, 15, 16] с длиной фотокатода 24 см. Параметры рассматриваемой оптики выбраны так, что происходит развертка фокальной плоскости зеркала на поверхность цилиндра СКОЧ.

Продольная координата попадания фотона находится по измеряемому времени дрейфа выбитого фотоном фотоэлектрона. Последний дрейфует вдоль фотокатода к диодной системе в скрещенных электрическом и магнитном полях по спирали с практически постоянной скоростью. Определенная таким образом координата позволяет найти угол Черенковского излучения. Продольные оси плеча ФОДС и СКОЧ совмещены при монтаже установки геодезическими методами, а также посредством соответствующей лазерной юстировки [18].

Временные измерения осуществлялись Время-Цифровыми преобразователями (ВЦП) ЛЭ-95 [19] с регистрацией времени всех поступающих импульсов вплоть до получения команды "Стоп", являющейся задержанным сигналом "Триггер" для записи отобранного события. Время задержки было выбрано несколько более полного

времени дрейфа электронов в ГФЭУ. При этом, ввиду большой интенсивности пучка, количество срабатываний в каналах ВЦП на одно событие могло превышать единицу из-за перекрытия по времени с прибытием сигналов от других взаимодействий. Процедура перехода от отсчетов (с ценой 2 нс) ВЦП к физическому времени t описана в статье [5].

Геометрическая реконструкция события осуществляется по данным с трекового детектора на дрейфовых камерах и трубках как представлено в [4, 5], а импульсы частиц находятся по изгибу их траектории в спектрометрическом магните ФОДС, детали см. в [6].

1. Процедура калибровки

Схема калибровки состоит из 4-х этапов:

1) На первом рассматривается перевод временных измерений в каналах СКОЧ в углы. Для этого анализируются планарные события, в которых данный ГФЭУ, трек частицы и продольная ось плеча установки находятся в одной плоскости.

2) Второй этап состоит из анализа, так называемых, парных событий. Под последними подразумеваются планарные события с двумя противоположно расположенными сработавшими ГФЭУ. Для таких событий оценка угла Черенковского излучения как полусуммы углов, измеренных в каждом из двух ГФЭУ пары, свободна от погрешностей в геодезической привязке оси СКОЧ к оси плеча и также не зависит от угла распространения частицы. Определяемая зависимость так найденного угла Черенковского излучения от импульса частицы позволяет найти коэффициент преломления рабочего газа СКОЧ в соответствии с формулой (7).

3) На третьем этапе определяется первое приближение калибровочных коэффициентов как отношение теоретического значения угла Черенковского излучения, вычисленного при данном импульсе частицы с учетом уже найденного коэффициента преломления, к его оценке по результатам временных измерений в данном ГФЭУ.

4) И, наконец, на четвертом этапе итерационно находятся окончательные значения калибровочных коэффициентов. Каждая итерация соответствует запуску задания для обсчета выбранной части статистики на компьютерном кластере. Применяемый здесь метод построен на анализе больших данных с помощью квадратичного функционала (см. Приложение), зависящего от множества переменных таких как измеренные времена в ГФЭУ, геометрические параметры траектории частицы и ее импульс, координаты ее попадания на основание конического отражателя, ориентация сработавших каналов СКОЧ относительно друг-друга и относительно трека частицы.

Определение коэффициентов функционала проводится методом наименьших квадратов (м.н.к.) с выделением конуса Черенковского излучения и принятием для анализа лишь тех ГФЭУ, чьи данные ложатся на рассматриваемый конус с игнорированием остальных каналов. Ось конуса задается направлением распространения частицы. Событие исключается из процедуры вычисления калибровочных коэффициентов, если после браковки на конусе излучения остается менее шести точек.

Для калибровки использовались данные рА-взаимодействий при импульсе пучка 50 ГэВ/с, при этом учитывались лишь события с одним выделенным адронным треком в конечном состоянии с углом падения на СКОЧ не более 20 мрад.

1.1. Системы координат и геометрические параметры треков

Отметим, что в данной работе подразумевается правая декартовая система координат XYZ, где ось Y направлена вертикально вверх, а ось Z совпадает с продольной осью плеча установки. Кроме того, при анализе сигналов с данного ГФЭУ используется связанная с ним система координат, получаемая из исходной системы XYZ поворотом вокруг оси Z так, чтобы новая ось X смотрела на данный ГФЭУ. В этой повернутой системе координат параметризация прямолинейной после спектрометрического магнита ФОДС траектории частицы имеет вид

$$\begin{cases} x = a + k_x \cdot z \\ y = b + k_y \cdot z \end{cases} \quad (1)$$

Коэффициенты a , b , k_x , k_y найдены в программе геометрической реконструкции события [5]. Ниже встретятся углы трека $\Theta_x = \arctan(k_x)$ и $\Theta_y = \arctan(k_y)$ с осями X и Y, соответственно, в плоскостях XZ и YZ.

1.2. Временные сигналы в каналах ГФЭУ

Начнем с временных спектров с ГФЭУ. На рис. 1 показано временное распределение для одного из каналов. Оно имеет характерный П-образный вид с подложкой, которая показывает уровень фона. Заметные на полочке некоторые волнообразные структуры объясняются неоднородностью эффективности фотокатода вдоль его длины.

Сплошные линии - это фиты переднего и заднего фронта распределения функцией Ферми, которые позволяют найти начало временной полочки T_1 и ее конец T_2 , а также разность $T = T_2 - T_1$. Последняя является полным временем дрейфа через весь фотокатод, а величина T_1 соответствует временной задержке в данном канале, детали обработки временных сигналов можно найти в [6]. В дальнейшем мы будем учитывать только те сигналы с ВЦП, что попадали во временной интервал (T_1, T_2) , индивидуально определенный для каждого канала.

Для удобства анализа будем использовать не измеренное время t , а эквивалентную переменную Θ_t (с размерностью угла), которая является линейным преобразованием времени t , сводящимся, в сущности, в сдвигу и изменению масштаба:

$$\Theta_t = c + v \cdot (t - T_1) . \quad (2)$$

Параметры c , v являются фиксированными и одинаковыми для всех ГФЭУ. Было выбранно: $c = 0.04$ рад, что соответствует по техническому описанию конструкции СКОЧ [1] минимальному регистрируемому углу в нем, а $v = d / (\langle T \rangle \cdot F_m)$, где d - длина фотокатода, F_m - фокусное расстояние зеркала, $\langle T \rangle$ - среднее для

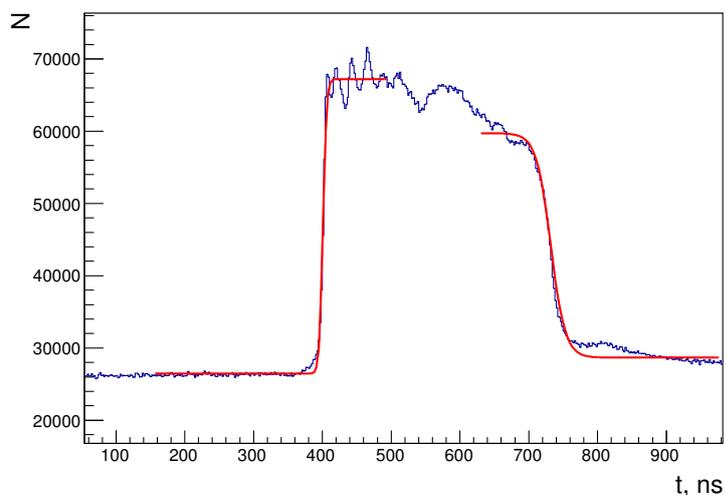


Рис. 1. Пример временного спектра для одного из каналов ГФЭУ. Сплошные линии - фит переднего и заднего фронта распределения функцией Ферми.

каналов ГФЭУ значение полного времени дрейфа. Преобразование (2) сохраняет всю временную информацию о сигнале и не влияет на окончательный результат.

На рис. 2 представлено распределение по количеству N_s сработавших каналов СКОЧ в одном событии (отметим - из 24-х ГФЭУ спектрометра три оказались неисправными и они были исключены из анализа). Для калибровки брались только события с $N_s \geq 6$.

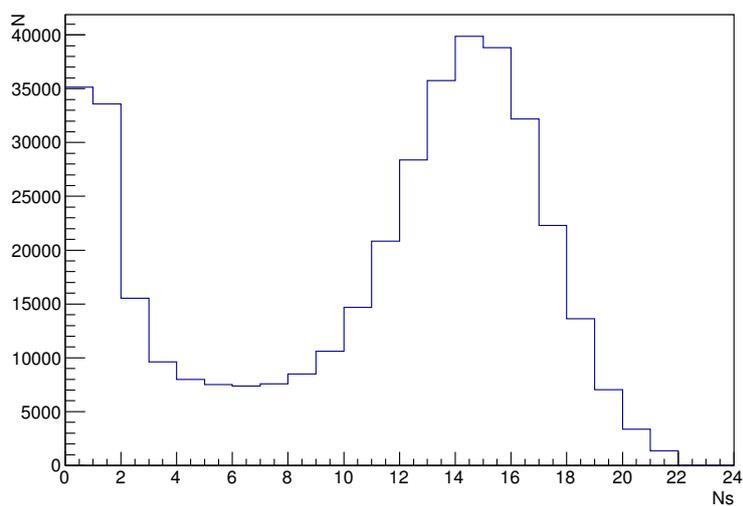


Рис. 2. Распределение по количеству N_s сработавших каналов СКОЧ в одном событии.

Рис. 3 показывает распределение кратности N_h срабатывания канала ГФЭУ в одном событии. Видно, что распределение резко (экспоненциально) падает с увеличением N_h . Для вычисления калибровочных коэффициентов учитывались только каналы с единичной кратностью $N_h = 1$.

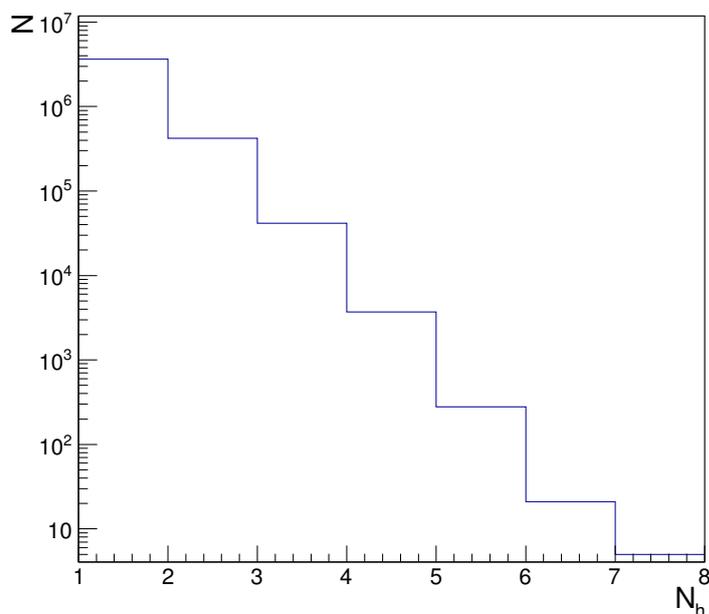


Рис. 3. Распределение по кратности N_h срабатывания каналов ГФЭУ в одном событии.

1.3. Планарные события

Рассмотрим углы трека Θ_x и Θ_y соответственно в плоскостях XZ и YZ в упомянутой выше повернутой системе координат, в которой ось X смотрит на данный ГФЭУ. Планарные события отбирались требованием малости по модулю угла Θ_y , так что $|\Theta_y| < 10$ мрад.

На рис. 4 показаны 2Д-графика для двух ГФЭУ с характерными зависимостями угла Θ_x от величины Θ_t , см. (2). Для первого из них зависимость практически линейная, для второго - заметны явные нелинейности. Сплошные линии - фит данных (пакет CERN-root [21]) полиномом второго порядка. Представленный анализ осуществлялся для всех ГФЭУ СКОЧ. Результаты фита позволяют перевести в каждом канале временные измерения Θ_t в шкалу реальных углов с учетом нелинейности ГФЭУ.

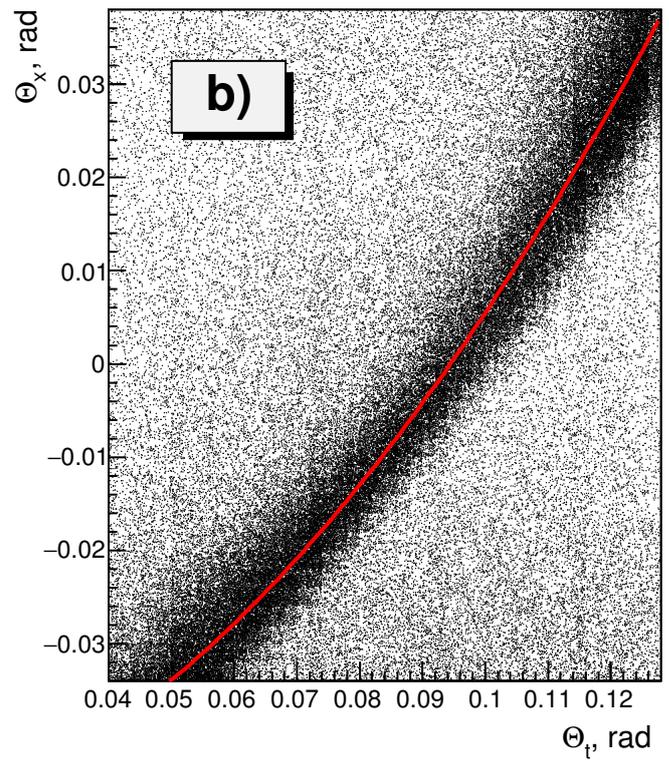
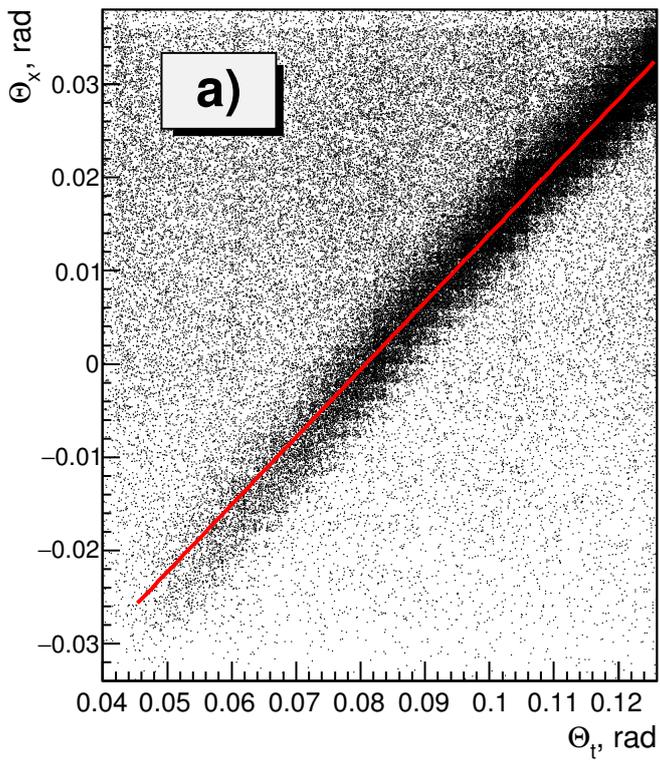


Рис. 4. 2Д-графики для двух ГФЭУ зависимости угла Θ_x трека частицы с осю X от величины Θ_t , см. (2), а) - пример канала с почти линейной зависимостью, б) - канал с явно нелинейной зависимостью, сплошные линии - фит данных полиномом второго порядка.

1.4. Парные события

В парных событиях угол Черенковского излучения Θ рассматривается как полу-сумма углов, найденных в двух противоположных ГФЭУ. 2Д-график зависимости Θ от импульса частицы представлен на рис. 5. Сплошными линиями показаны теоретические зависимости для π^\pm -, K^\pm -мезонов, протонов и дейтронов (сверху вниз). Данные для π^\pm -мезонов использовались для фита (пакет CERN-root [21]) и определения коэффициента преломления рабочего газа СКОЧ в соответствии с формулой (7).

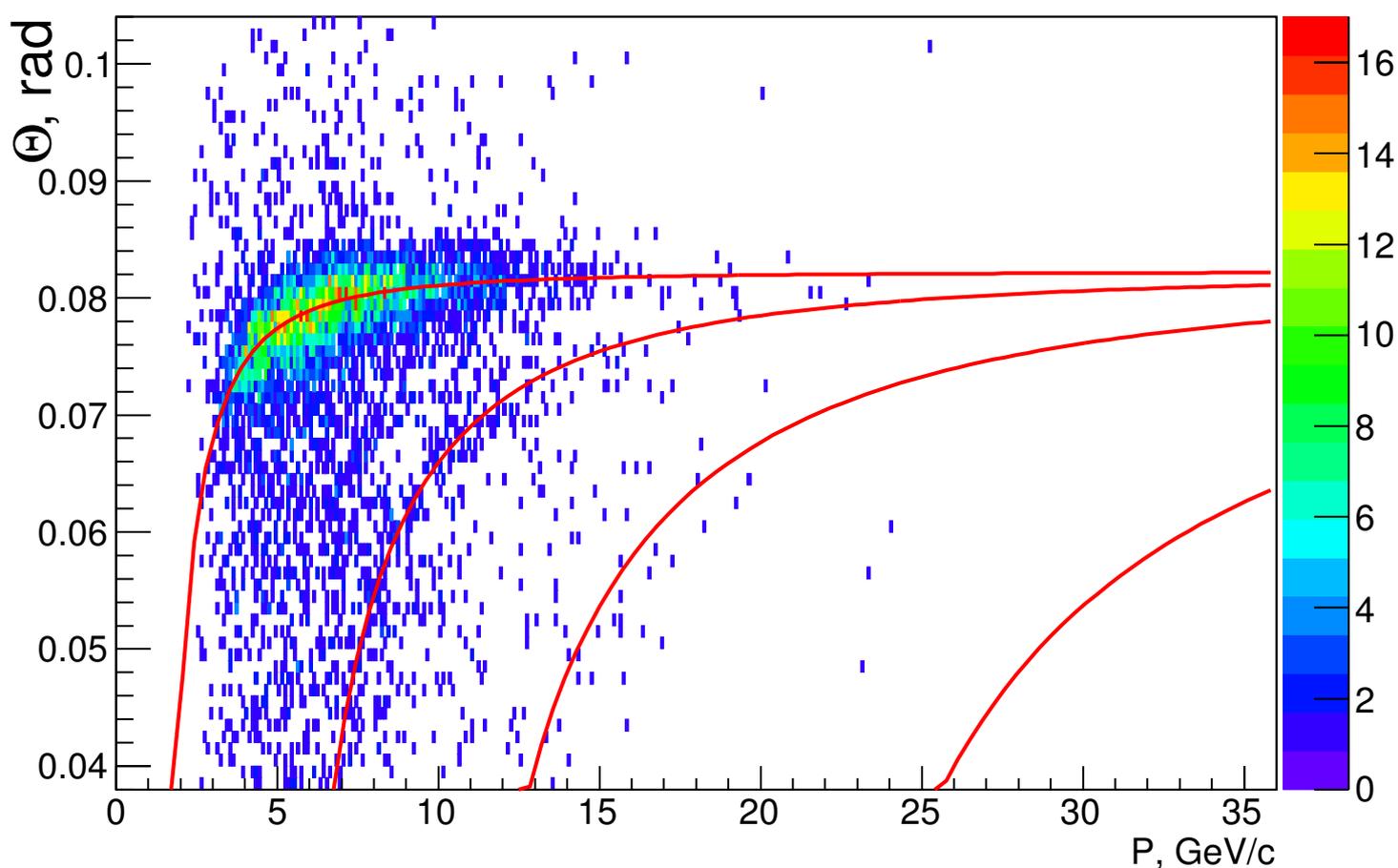


Рис. 5. 2Д-график зависимости угла Черенковского излучения Θ от импульса частицы p , сплошными линиями показаны теоретические зависимости для π^\pm -, K^\pm -мезонов, протонов и дейтронов (сверху вниз).

На рис. 6 дан спектр найденных квадратов масс в каналах СКОЧ (ГФЭУ) для парных событий в двух характерных областях импульсов 6 - 11 ГэВ/с и 12-15 ГэВ/с, выбранных для калибровки. Наблюдаемые пики соответствуют π^\pm -, K^\pm -мезонам и протонам.

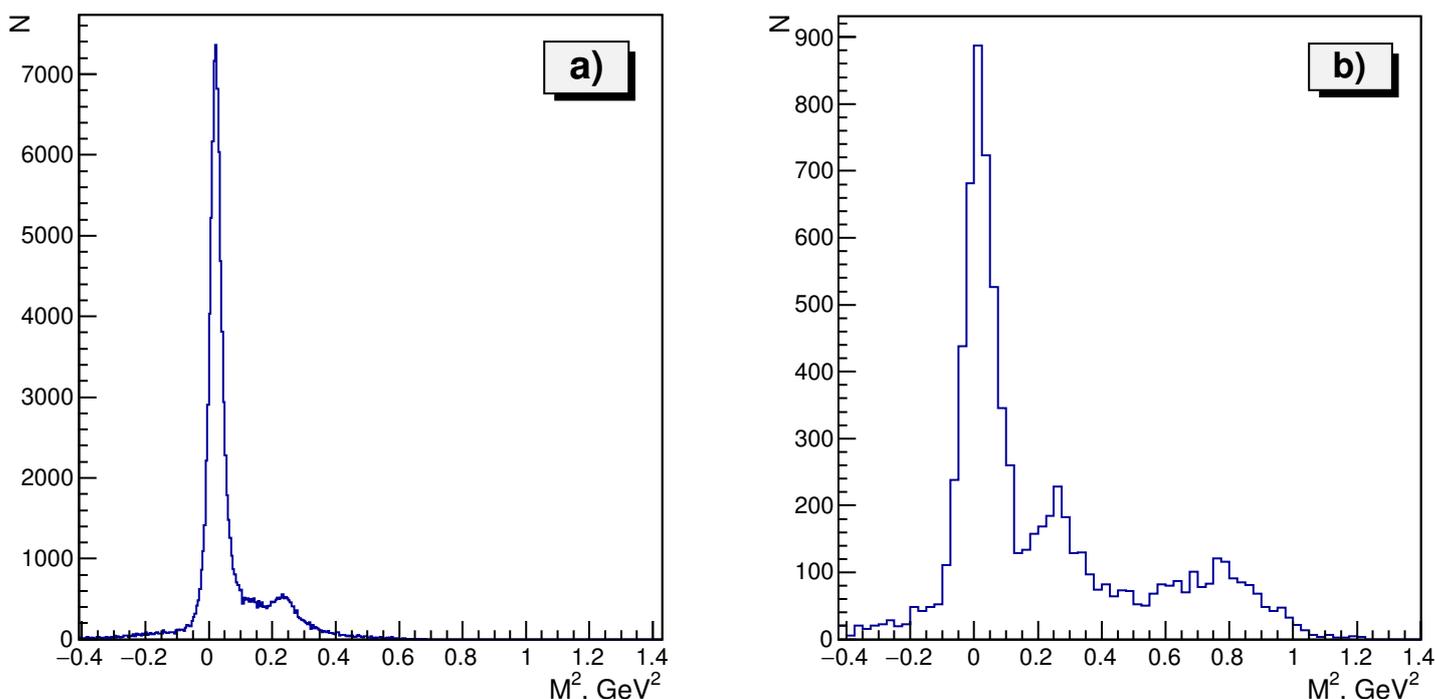


Рис. 6. Спектр найденных квадратов масс в каналах СКОЧ (ГФЭУ) для парных событий, а) - область импульсов 6 - 11 ГэВ/с, б) - 12-15 ГэВ/с.

1.5. Первое приближение калибровочных коэффициентов

Для учета aberrаций в оптической системе СКОЧ и погрешностей совмещения продольных осей СКОЧ и плеча ФОДС калибровочные коэффициенты определялись индивидуально для набора возможных областей, каждая из которых характеризовалась тремя индексами i, j, k . Здесь $i=1,2, \dots, 24$ - номер рассматриваемого ГФЭУ, $j=1,2, \dots, 24$ - номер ГФЭУ, на который смотрит трек частицы в поперечной плоскости, $k=1,2$ ($k=1$ - если угол трека в плоскости XZ в системе координат данного канала $\Theta_x > 0$ и $k=2$ - в противном случае).

Введем величину Θ_m , которую будем рассматривать в качестве оценки угла Черенковского излучения в данном канале (ГФЭУ)

$$\Theta_m = \sqrt{(\Theta_i - \Theta_x)^2 + \Theta_y^2}, \quad (3)$$

где Θ_i - значение угла, найденного в данном i -ом канале СКОЧ, исходя из результатов, представленных на рис. 4 с учетом формулы (2).

Рис. 7 показывает 2Д-график зависимости отношения Θ_π/Θ_m от Θ_m для одной из комбинаций индексов i, j, k , определяющих рассматриваемую область калибровки, где Θ_π - теоретическое значение угла излучения для π^\pm -мезона. Плавная кривая - фит данных полиномом второго порядка (пакет CERN-root [21]), определяющий калибровочный коэффициент в виде функции от аргумента Θ_m .

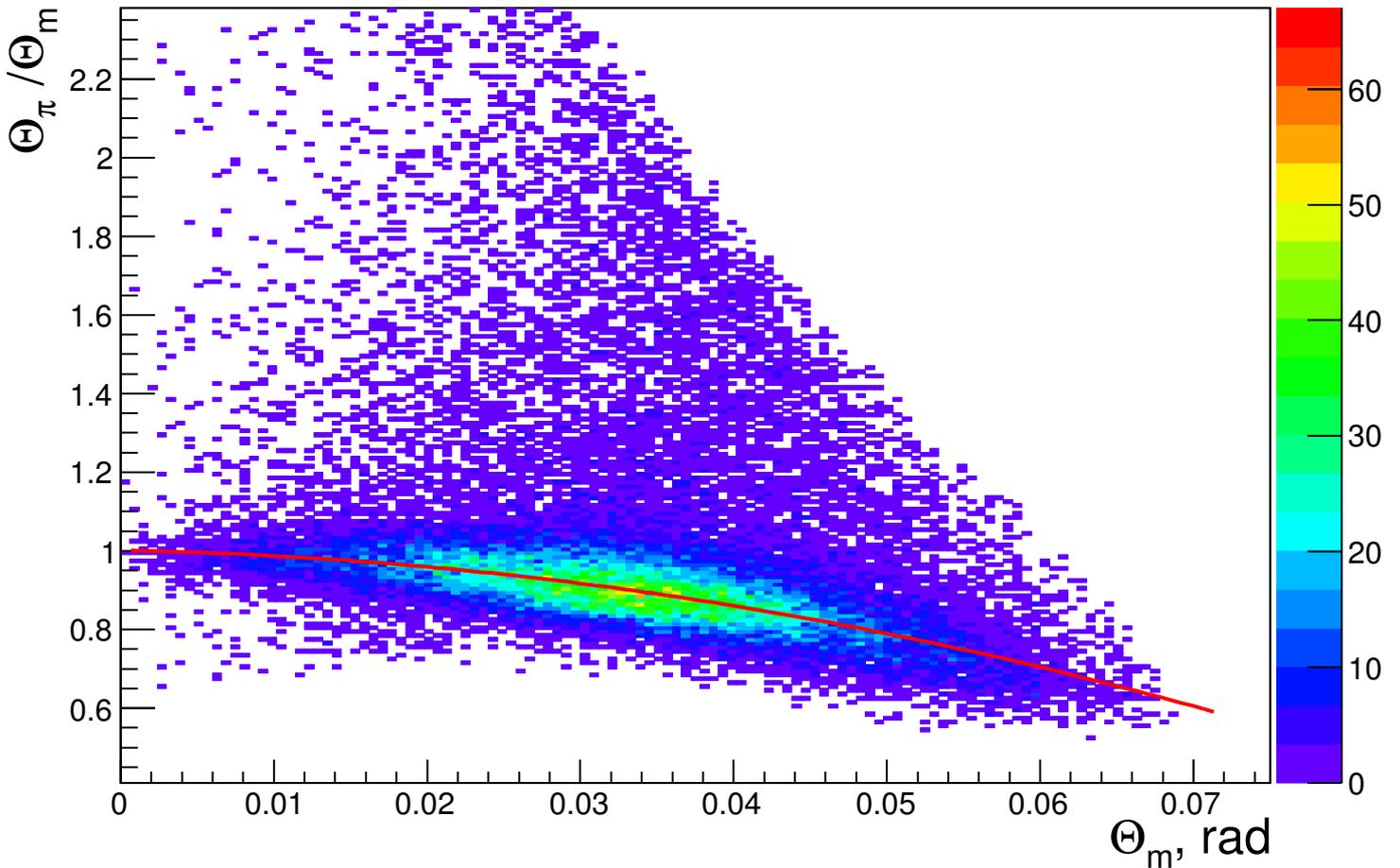


Рис. 7. 2Д-график зависимости отношения Θ_π/Θ_m от Θ_m для одной из комбинаций индексов i, j, k , задающих рассматриваемую область калибровки, где Θ_π - теоретическое значение угла излучения Черенкова для π^\pm -мезона, плавная кривая - фит данных полиномом второго порядка.

На рис. 8 представлен спектр найденных квадратов масс в каналах СКОЧ (ГФЭУ) с использованием найденных калибровочных коэффициентов первого приближения в двух характерных областях импульсов 6 - 11 ГэВ/с и 12-15 ГэВ/с.

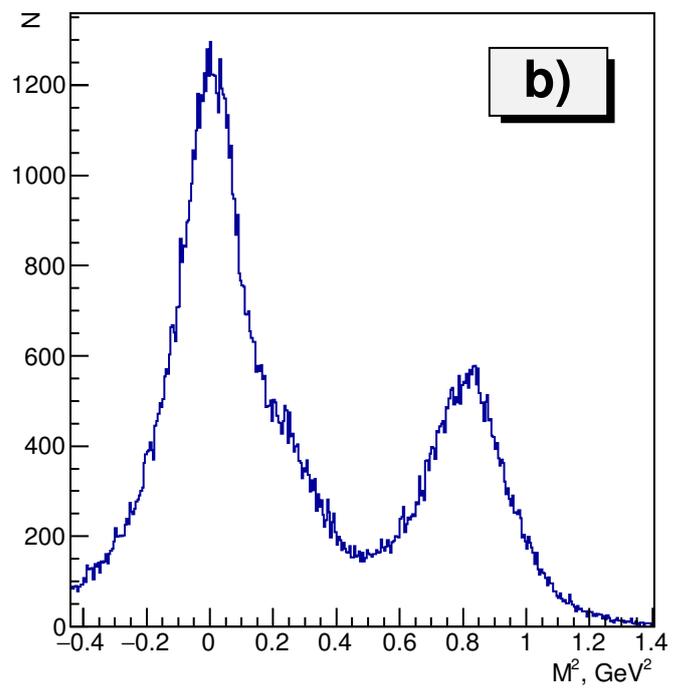
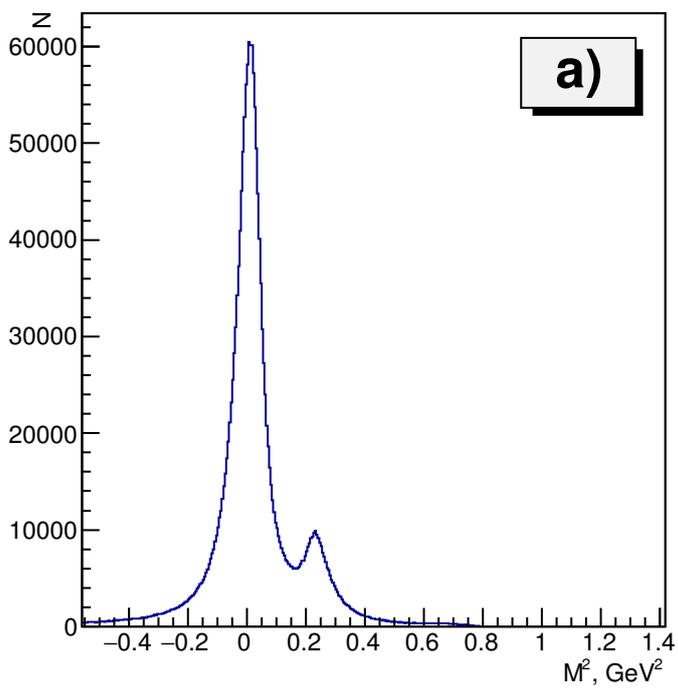


Рис. 8. Спектр найденных квадратов масс в каналах СКОЧ (ГФЭУ) с использованием калибровочных коэффициентов первого приближения, а) - область импульсов 6 - 11 ГэВ/с, б) - 12-15 ГэВ/с.

1.6. Окончательное определение калибровочных коэффициентов

Как уже было сказано выше, окончательные значения калибровочных коэффициентов находятся итерационно при минимизации м.н.к. квадратичного функционала χ^2 [18] (его описание вынесено в Приложение) на больших данных, включающих измеренные времена в ГФЭУ, геометрические параметры траектории частицы и ее импульс, координаты ее попадания на основание конического отражателя, ориентация сработавших каналов СКОЧ относительно друг-друга и относительно трека частицы. Для вычисления калибровочных коэффициентов принимаются во внимание только те ГФЭУ, чьи данные ложатся на выделяемый конус Черенковского излучения и игнорируются остальные каналы. Указанная браковка каналов проводится итерационно в функции выделения конуса излучения [20] (см. также Приложение).

Рис. 9 показывает спектр найденных квадратов масс в каналах СКОЧ (ГФЭУ) с использованием окончательно найденных калибровочных коэффициентов в двух характерных областях импульсов 6 - 11 ГэВ/с и 12-15 ГэВ/с.

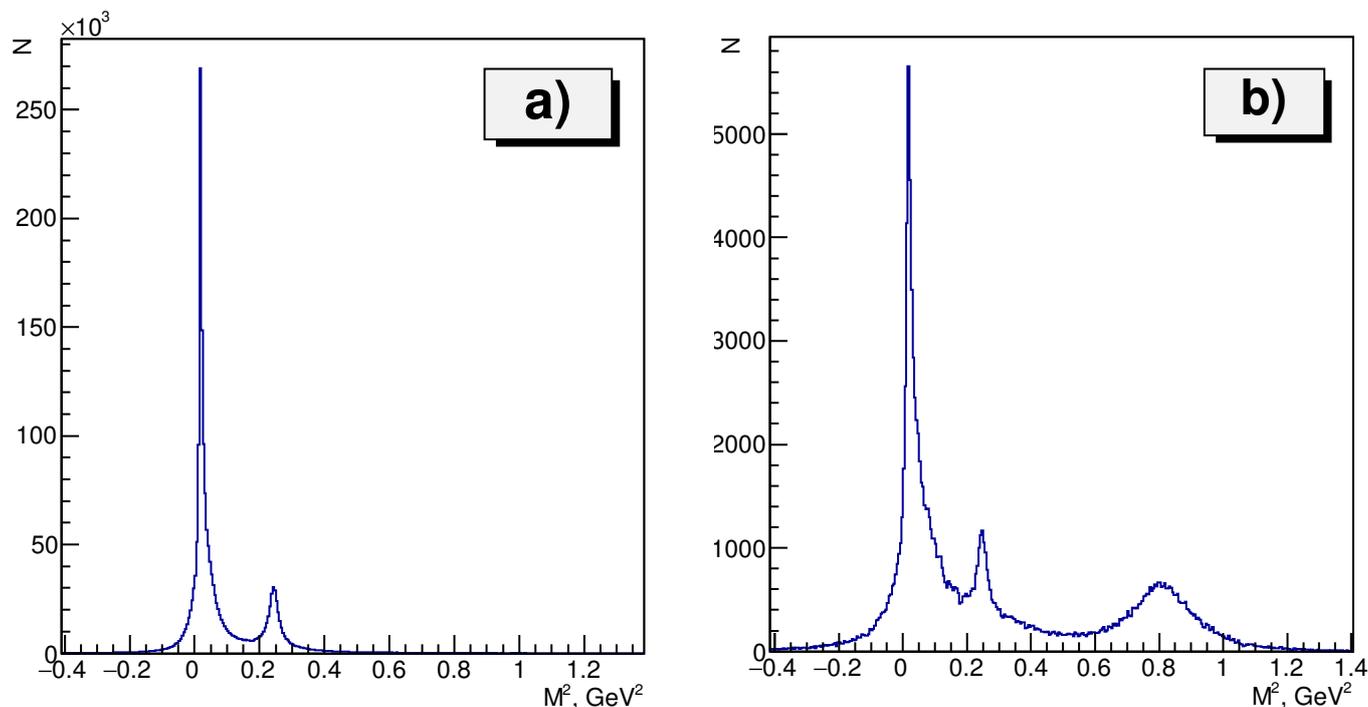


Рис. 9. Спектр найденных квадратов масс в каналах СКОЧ (ГФЭУ) при окончательном определении калибровочных коэффициентов, а) - область импульсов 6 - 11 ГэВ/с, б) - 12-15 ГэВ/с.

Видно, что разрешение улучшилось по сравнению с первым приближением на рис. 8. Дальнейшее существенное улучшение достигается при работе с выделенным конусом Черенковского излучения и определением среднего угла Черенковского све-

та по всем каналам СКОЧ (ГФЭУ), лежащим на данном конусе. На рис. 10 представлен спектр так определенных квадратов масс в тех же характерных областях импульсов 6 - 11 ГэВ/с и 12-15 ГэВ/с.

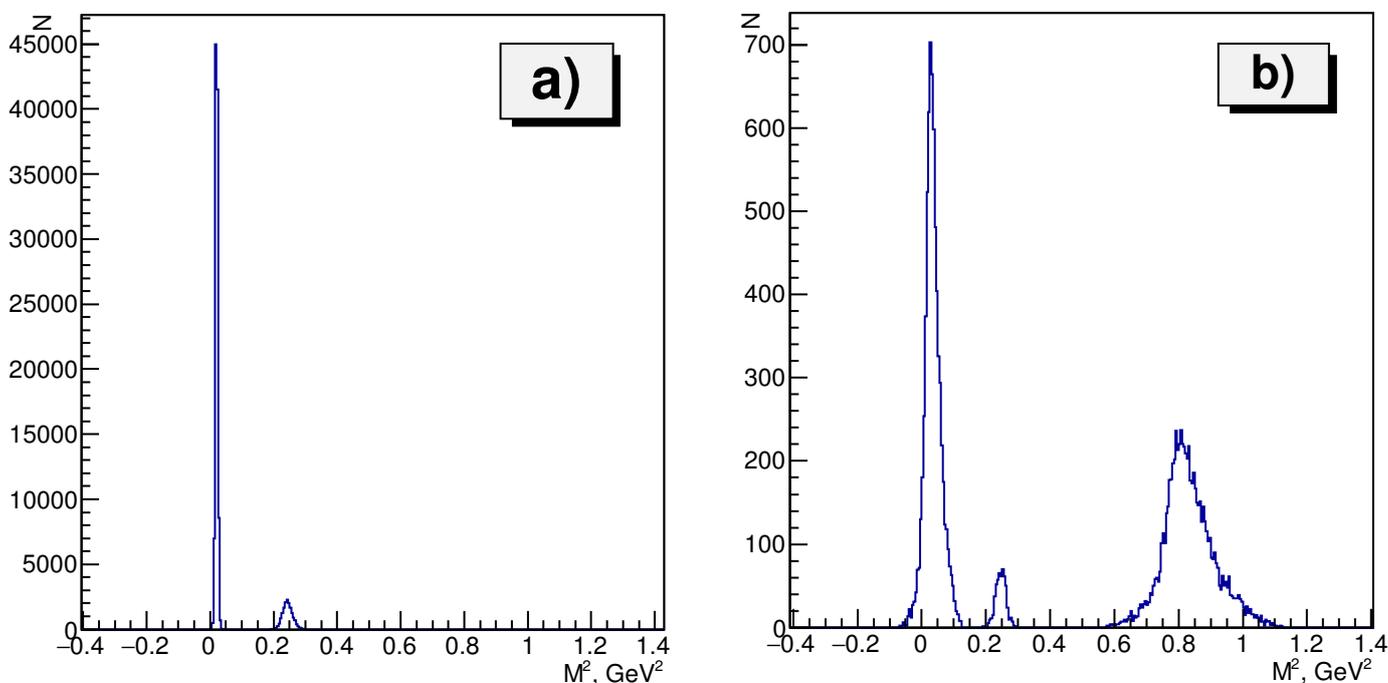


Рис. 10. Распределение по квадрату найденных масс при окончательных калибровочных коэффициентах с определением угла Черенковского света как среднего по всем каналам СКОЧ (ГФЭУ), лежащим на выделенном конусе Черенковского излучения, а) - область импульсов 6 - 11 ГэВ/с, б) - 12-15 ГэВ/с.

Можно сделать вывод, что достигается чистое разделение заряженных π -, K -мезонов и протонов в принятом для калибровки интервале их импульсов (6-15) ГэВ/с.

Приложение: Функционал метода наименьших квадратов для окончательного определения калибровочных коэффициентов

Изложенное в данном приложении является развитием идей из препринта [17] и докторской диссертации [18]. Суть метода состоит в том, что выделяются главные переменные, от которых зависит результат измерений, и на них строится квадратичный функционал метода наименьших квадратов (м.н.к.). Калибровочные коэффициенты находятся методом наименьших квадратов по опорным точкам, где результат известен априори.

В рассматриваемом случае в качестве опорных точек выступают известные массы π^\pm , K^\pm -мезонов, а также протонов, и соответственно, углы конуса Черенковского излучения θ для них.

Основополагающей для наших целей является известная формула для величины θ

$$\cos \theta = 1/(\beta \cdot n) , \quad (4)$$

где n – показатель преломления света в газовом радиаторе спектрометра, $\beta = p/E$, p и E – импульс и полная энергия частицы.

Из формулы (4) следует, что квадрат массы m регистрируемой частицы выражается через угол θ как

$$m^2 = p^2 \cdot \Omega(\theta) , \quad (5)$$

где функция

$$\Omega(\theta) = n^2 \cos^2 \theta - 1 \quad (6)$$

Нам понадобится еще следующее из (5) выражение для θ , используемое при фите данных для определения показатель преломления n

$$\theta = \arcsin(\sqrt{n^2 - 1 - m^2/p^2} / n) \quad (7)$$

Как известно из геометрической оптики, в приближении малых углов свет после отражения от сферического зеркала фокусируется в ее фокальной плоскости. Общепринятым методом определения угла излучения в Черенковских спектрометрах является прямое определение кольца Черенковского излучения с помощью двухкоординатных детекторов фотонов. Измеренный радиус кольца позволяет определить величину угла излучения θ , а при известном импульсе и массу частицы.

Однако метод реконструкции кольца оказывается неприемлемым для широкоапертурных детекторов и, особенно, для детекторов, в оптической схеме которых присутствует конический отражатель. Для Черенковского света от частиц, имеющих большой угол к оси спектрометра, не выполняется условие малых углов отражения от сферического зеркала. Начинают сказываться оптические aberrации, влияние которых на форму изображения усиливается отражателем.

Существует сложные зависимости между углом Черенковского излучения θ и параметрами траектории регистрируемой частицы с одной стороны, и координатой фотона на фотокатоде ГФЭУ с другой стороны. Параметры зависимости определяются показателем преломления радиатора, характеристиками оптических элементов СКОЧ и их взаимным расположением относительно друг друга и относительно трека частицы. Прямое измерение всех необходимых геометрических параметров оптики СКОЧ с высокой точностью лучше 1 мм и привязка оптики к координатным детекторам представляется практически невыполнимой задачей, поэтому нами рассматривается решение указанной проблемы на основе анализа набранной на пучке экспериментальной информации.

Для определения массы частицы в соответствии с формулой (6) через функцию $\Omega(\theta)$ будем записывать последнюю в виде некоторого выражение через измеряемые

в эксперименте величины в виде другой функции F

$$\Omega(\theta) = F(\Theta, k_x, k_y, x, y) , \quad (8)$$

где Θ - оценка угла Черенковского излучения по временным измерению в данном канале, для k_x, k_y см. формулу (1), x, y - координаты точки попадания трека на основание конического отражателя.

Для функции F будем использовать разложения в степенной ряд с точностью до квадратичных членов включительно по переменным Θ, k_x, k_y, x, y . Для удобства работы с записью разложения введем вектор Q (его первая компонента фиксирована и равна единице)

$$Q = (1, \Theta, k_x, k_y, x, y, \Theta^2, \Theta k_x, \Theta k_y, \Theta x, \Theta y, k_x^2, k_x k_y, k_x x, k_x y, k_y^2, k_y x, k_y y, x^2, xy, y^2) \quad (9)$$

Тогда указанное разложение примет вид

$$F(\Theta, k_x, k_y, x, y) = \sum_{i=1}^{21} C_i \cdot Q_i , \quad (10)$$

где C_i - коэффициенты разложения. Их определение сводится к минимизации функционала м.н.к. (соответствующая программа может быть найдена в [20])

$$\chi^2 = \sum_n (\Omega_n - F_n)^2 , \quad (11)$$

здесь n - номер события, Ω_n - значение функции (6) в в данном событии, соответствующее табличной массе M выделяемой в калибровочной процедуре частицы, p - ее импульс, F_n - вычисленное значение функции (10) по измеренным данным для переменных Θ, k_x, k_y, x, y .

Дифференцируя функционал χ^2 по коэффициентам C_i и приравнивая нулю производные, получаем систему линейных уравнений для их определения

$$\sum_{j=1}^{21} \langle Q_i \cdot Q_j \rangle \cdot C_j = \langle Q_i \cdot M^2/p^2 \rangle , \quad (12)$$

где индексы i и j пробегают значения от 1 до 21 включительно, а $\langle \dots \rangle$ означает усреднение по событиям. Решение системы (12) находилось методом из [21].

В ходе получения параметров C_i подразумевается, что для каждого события может быть вычислена величина Ω_n , то есть в процессе обработки должен быть известен сорт частицы. Это является вполне естественным по самому смыслу проведения калибровки. Традиционным способом решения этой проблемы является использование других детекторов, определяющих сорт частицы.

Однако в существующей конфигурации ФОДС это нельзя выполнить, поэтому применена поэтапная итерационная процедура калибровки, не требующая наличия дополнительной аппаратуры. Данные о типе частицы извлекаются из предыдущего

этапа или итерации, проводится новая идентификация сорта частиц, и затем процесс повторяется. К анализу для вычисления калибровочных коэффициентов принимаются лишь те каналы, чьи временные измерения ложатся на конус Черенковского излучения. Сигналы с ГФЭУ после процедуры калибровки дают набор значений углов Θ , образующих кластер, в котором подсчитывается среднее значение угла $\langle \Theta \rangle$ и дисперсия σ распределения по углам. Все точки кластера проходят браковки в цикле программных итераций, где для них рассматриваются отклонения

$$d = \Theta - \langle \Theta \rangle \quad (13)$$

На каждой итерации бракуется одна точка с наибольшим отклонением по модулю d при условии, что ($|d| > 2.5 \cdot \sigma$ и $|d| > 1$ мрад) или $\sigma > 2$ мрад.

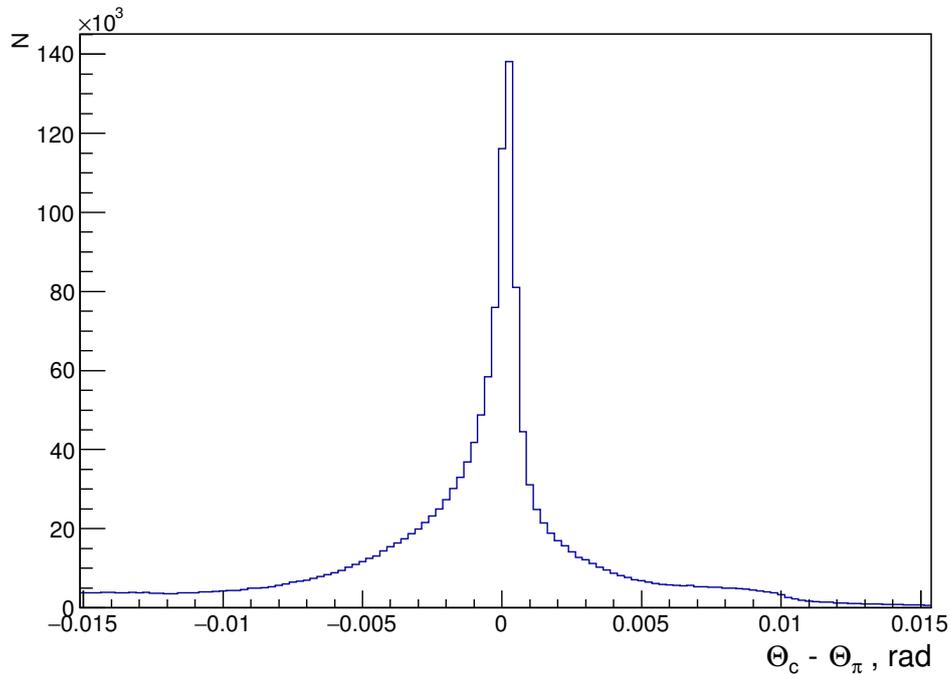


Рис. 11. Распределение разности $\Theta_c - \Theta_\pi$ всех каналов СКОЧ для событий с выделенным π^\pm -мезоном, где Θ_c - оценка угла Черенковского излучения в данном канале с учетом калибровки, Θ_π - теоретическое значение этого же угла.

Если есть забракованная точка, то итерационный цикл продолжается для проверки следующих точек. Угол Черенковского излучения определяется как средняя величина $\langle \Theta \rangle$ после выхода из цикла программных итераций браковки точек. Но при этом событие с малым числом отобранных точек $N_s < 6$ отбрасывается целиком.

Указанный отбор зависит от точности определения углов в СКОЧ. На рис. 11 в качестве примера, характеризующего рассматриваемую точность, показана гистограмма разности $\Theta_c - \Theta_\pi$ всех каналов СКОЧ для событий с выделенным π^\pm -мезоном, где Θ_c - оценка угла Черенковского излучения в данном канале с

учетом калибровки, Θ_π - теоретическое значение этого же угла. Видно, что полуширина центрального пика составляет величину около 1 мрад. Отметим, что точки, попадающие на хвосты данного распределения, отбрасываются процедурой выделения конуса излучения.

Заключение

Проведена 4-х этапная калибровка Спектрометра Колец Черенковского излучения (СКОЧ) по физическим событиям. Использовались данные рА-взаимодействий при импульсе пучка 50 ГэВ/с. При последовательном улучшении на каждом этапе разрешения по массе достигается чистое разделение в отбираемых калибровочной процедурой событиях заряженных π -, K -мезонов и протонов в выбранном интервале их импульсов (6-15) ГэВ/с. Реализованный метод построен на анализе больших данных с помощью квадратичного функционала, зависящего от множества переменных, в число которых входят набор временных сигналов СКОЧ, геометрические параметры траектории частицы и ее импульс, координаты ее попадания на основание конеческого отражателя света, ориентация сработавших каналов СКОЧ относительно друг-друга и относительно трека частицы. Излагаемый метод калибровки применим для любого измерительного устройства, где априори известны результаты на некотором множестве опорных точек.

Список литературы

- [1] V.V. Abramov, A.V. Alekseev, B.Yu. Baldin, V.G. Vasilchenko, A.A. Volkov, Yu.N. Vrazhnov, A.O. Efremov, Yu.P. Korneev, V.I. Kryshkin, V.E. Rakhamatov, A.I. Ronzhin, V.I. Rykalin, R.M. Sulyaev, Nulc. Instr. and Meth. in Physics Research A235 (1985) pp. 497-501, DOI: 10.1016/0168-9002(85)90099-3.
- [2] Abramov V.V., Alekseev A.V., Baldin B.Yu., Bitjukov S.I., Bushnin Yu.B., Vrazhnov Yu.N., Glebov V.Yu., Dunaitsev A.F., Dyshkant A.S., Evdokimov V.N., Zelepukin S.A., Karpekov Yu.D., Konoplyannikov A.K., Krendelev V.A., Krinitsyn A.N., V.I. Kryshkin, N.Yu. Kulman, G.P. Makarov, Yu. M. Melnik, O.P. Orlov, V.S. Petrov, V.G. Rybakov, V.N. Rechenkov, V.A. Sergeev, Yu.N. Simonov, M.A. Sleptsov, M.M. Soldatov, R.M. Sulyaev, A.N. Sytin, V.M. Titarenko, L.K. Turchanovich, V.Ia. Uglakov, "Focusing Double-arm Spectrometer" , Preprint of Institute for High Energy Physics, Serpukhov, 1981, No 81-46.
- [3] Abramov V.V., Baldin B.Yu., Buzulutskov A.F., Volkov A.A., Glebov V.Yu., Goncharov P.I., Gurzhiev A.N., Dyshkant A.S., Evdokimov V.N., Efimov A.O., Korneev Yu.P., Krinitsyn A.N., Kryshkin V.I., Mutafyan M.I., Podstavkov V.M., Ronzhin A.I., R.M. Sulyaev, L.K. Turchanovich, "A Two-Arm Magnetic Spectrometer for the Study of Hard Interactions at the Serpukhov

- Accelerator Instrum. Exp. Tech., 1992, vol. 35, No. 6, pp. 950–961 // ПТЭ, Т. 35, No. 6, с. 75–88 (1992).
- [4] M.Yu. Bogolyubsky, A.Yu. Kalinin, A.N. Krinitsyn, A.A. Morshinov, V.V. Talov, L.K. Turchanovich, Instr. Exp. Tech., 2015, Vol. 58, No. 6, pp. 719–725 // ПТЭ, 2015, No. 6, с. 13–19.
- [5] M.Yu. Bogolyubsky, A.A. Volkov, D.K. Elumakhov, A.A. Ivanilov, A.Yu. Kalinin, A.N. Krinitsyn, V.I. Kryshkin, N.V. Kulagin, D.I. Patalakha, K.A. Romanishin, V.V. Skvortsov, V.V. Talov, L.K. Turchanovich, Instrum. Exp. Tech., 2019, Vol. 62, No. 5, pp. 615–625 // ПТЭ, 2019, No. 5, pp. 26–36.
- [6] M.Yu. Bogolyubsky, A.A. Volkov, D.K. Elumakhov, A.A. Ivanilov, A.Yu. Kalinin, A.N. Krinitsyn, V.I. Kryshkin, N.V. Kulagin, D.I. Patalaha, K.A. Romanishin, V.V. Skvortsov, V.V. Talov, L.K. Turchanovich, Instr. Exp. Tech., 2019, Vol. 62, No. 5, pp. 626–632 // ПТЭ, 2019, No. 5, с. 37–43.
- [7] A.A. Volkov, A.Yu. Kalinin, A.V. Korablev, A.N. Krinitsyn, V.I. Kryshkin, V.V. Skvortsov, V.V. Talov, L.K. Turchanovic Instr. Exp. Tech., 2010, Vol. 53, No. 4, pp. 500–505 // ПТЭ, 2010, No. 4, с. 37–42.
- [8] В.В. Абрамов, А.А. Волков, П.И. Гончаров, А.Ю. Калинин, А.В. Кораблев, Ю.П. Корнеев, А.В. Кострицкий, А.Н. Криницын, В.И. Крышкин, А.А. Марков, В.В. Талов, Л.К. Турчанович, А.В. Хмельников, ЯФ, 2007. Т. 70, с. 1561–1571.
- [9] В.В. Абрамов, А.А. Волков, П.И. Гончаров, А.Ю. Калинин, А.В. Кораблев, Ю.П. Корнеев, А.В. Кострицкий, А.Н. Криницын, В.И. Крышкин, А.А. Марков, В.В.Талов, Л.К. Турчанович, А.В. Хмельников, ЯФ, 2007. Т. 70, с. 1799–1805.
- [10] M.Yu. Bogolyubsky, A.Yu. Bordanovsky, A.A. Volkov, D.K. Elumakhov, V.P. Efremov, A.A. Ivanilov, A.Yu. Kalinin, A.N. Krinitsyn, V.I. Kryshkin, N.V. Kulagin, D.I. Patalakha, V.V. Skvortsov, V.V. Talov, L.K. Turchanovich, "Forward particle production in pA-interactions at momenta 25 and 50 GeV/c and CA-interactions at energy 25 GeV/nucleon Physics of Atomic Nuclei, 2017, Vol. 80, No. 3, pp. 455–460.
- [11] A.G. Afonin, M.Yu. Bogolyubsky, A.A. Volkov, D.K. Elumakhov, V.N. Zapolsky, A.A. Ivanilov, A.Yu. Kalinin, A.N. Krinitsyn, N.V. Kulagin, V. I. Kryshkin, D.I. Patalakha, K.A. Romanishin, V.V. Skvortsov, V. V. Talov 1) , L.K. Turchanovich, Yu.A. Chesnokov, "Measurement of Cross Sections for Inclusive Forward Charged Hadron Production in Carbon–Carbon Collisions at Beam Energy of 19.6 GeV per Nucleon Physics of Atomic Nuclei, 2020, Vol. 83, No. 2, pp. 228–236.
- [12] A.G. Afonin, M.Yu. Bogolyubsky, A.A. Volkov, D.K. Elumakhov, V.N. Zapolsky, A.A. Ivanilov, A.Yu. Kalinin, A.N. Krinitsyn, N.V. Kulagin, V.I. Kryshkin, D.I. Patalakha, K.A. Romanishin, V.V. Skvortsov, V.V. Talov, L.K. Turchanovich, Yu.A. Chesnokov, "Forward production of nuclear fragments in CC collisions

at beam energy 20.5 GeV/nucleon Nucl. Phys. A997 (2020) 121718 // <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2020.121718>

- [13] A.G. Afonin, M.Yu. Bogolyubsky, A.A. Volkov, D.K. Elumakhov, V.N. Zapolsky, A.A. Ivanilov, A.Yu. Kalinin, A.N. Krinitsyn, N.V. Kulagin, V.I. Kryshkin, D.I. Patalakha, K.A. Romanishin, V.V. Skvortsov, V.V. Talov, L.K. Turchanovich, Yu.A. Chesnokov, "Mass Number Dependence of the Forward Production of Charged Hadrons and Nuclear Fragments in Carbon–Lead and Carbon–Carbon Interaction at a Beam Energy of 19.6 GeV per Nucleon Physics of Atomic Nuclei, 2021, Vol. 84, No. 4, pp. 475–482.
- [14] Н.К. Вишнеvский, В.Г. Лапшин, В.И. Рыкалин, В.И. Соляник, В.П. Хромов. Авторское свидетельство № 266083 от 1970 г.
- [15] Н.К. Вишнеvский, Р.Н. Краснокутский, В.Г. Лапшин, В.И. Рыкалин, В.К. Семенов, В.И. Соляник, В.П. Хромов, "Применение годоскопических ФЭУ на скрещенных полях для регистрации частиц высоких энергий". Труды Международной конференции по аппаратуре в физике высоких энергий, Дубна, 8-12 сентября 1970 г., ОИЯИ, Д-5805, Дубна, 1971, том 1, стр. 305.
- [16] В.Г. Васильченко, В.И. Рыкалин, "Годоскопические фотоумножители и их применение в детекторах частиц". Препринт ИФВЭ 85-153, Серпухов, 1985 г.
- [17] В.В. Абрамов, Б.Ю. Балдин, В.Г. Васильченко, А.А. Волков, А.О. Ефимов, Ю.П. Корнеев, В.И. Крышкин, А.И. Ронжин, В.И. Рыкалин, Р.Н. Суляев, Препринт ИФВЭ 86-48, Серпухов, 1986.
- [18] А.А. Волков, "Образование частиц с большими поперечными импульсами в адрон-адронных и адрон-ядерных взаимодействиях". Докторская диссертация, НИЦ "Курчатовский институт" - ИФВЭ, Протвино, 2006 г.
- [19] Н.А. Шаланда, "ЛЭ-95 – 64-канальный ВЦП в системе МИСС", техническое описание, НИЦ "Курчатовский институт" - ИФВЭ.
- [20] М.Ю. Боголюбовский, А.А. Волков, Д.К. Елумахов, А.А. Иванилоv, Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025682700, ФСПИС РФ, 19 сентября 2025 г. // <https://new.fips.ru/iiss/>
- [21] <http://root.cern.ch>

Рукопись поступила 12 февраля 2026 г.

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

М.Ю. Боголюбский и др.

Калибровка Спектрометра Колец Черенковского излучения с коническим отражателем света и сферическим зеркалом по физическим событиям на установке ФОДС.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы **Л^AT_EX**.

Подписано к печати 24.02.2026 Формат 60 × 84/16. Цифровая печать.
Печ.л. 1,4. Уч.-изд.л. 1,92. Тираж 68. Заказ 12. Индекс 3649.

НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ
142281, Московская область, г. Протвино, пл. Науки, 1

www.ihep.ru; библиотека <http://web.ihep.su/library/pubs/all-w.htm>

Индекс 3649

П Р Е П Р И Н Т 2026–2,
НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, 2026
