

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

ЛАБОРАТОРИЯ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

На правах рукописи



КАРЖАВИН ВЛАДИМИР ЮРЬЕВИЧ

**СОЗДАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА
ПЕРЕДНЕЙ МЮОННОЙ СТАНЦИИ УСТАНОВКИ
КОМПАКТНЫЙ МЮОННЫЙ СОЛЕНОИД (CMS)**

01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Дубна – 2020

Работа выполнена в Лаборатории физики высоких энергий
Объединенного института ядерных исследований

- Научный консультант** – *Голутвин Игорь Анатольевич*
доктор физико-математических наук, профессор.
- Официальные оппоненты** – *Полухина Наталья Геннадьевна*
доктор физико-математических наук, Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН, заведующая лабораторией.
Бедняков Вадим Александрович
доктор физико-математических наук,
Объединенный институт ядерных исследований,
директор лаборатории.
Кривишч Анатолий Григорьевич
доктор физико-математических наук,
Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова национального исследовательского центра «Курчатовский институт», руководитель отдела.

С электронной версией диссертации можно ознакомиться на официальном сайте Объединенного института ядерных исследований в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» по адресу:

<https://dissertations.jinr.ru/ru/Councils/NuclearPhysicsCouncil/Dissertations>. С печатной версией диссертации можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке ОИЯИ (г. Дубна, Московская область, ул. Жолио-Кюри, д. 6).

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук

Г. А. Карамышева

Общая характеристика работы.

Актуальность работы.

Компактный мюонный соленоид (CMS) является одним из крупнейших в мире универсальных экспериментальных комплексов, работающих на пучках протонов и ядер Большого адронного коллайдера (БАК).

Физическая программа эксперимента, наряду с изучением свойств бозона Хиггса и прецизионной проверкой выводов Стандартной модели (СМ), включает задачу поиска доказательств существования новой физики за пределами СМ.

Область поиска новой физики за рамками СМ распространяется на различные модели со сложными с экспериментальной точки зрения сигнатурами. В ряде моделей предсказывается существование новых частиц с массами до нескольких ТэВ, которые могут распадаться на мюонные пары или давать в конечном состоянии распадов одиночные или множественные мюоны одновременно с другими частицами. Подобные мюоны могут иметь поперечный импульс p_t от десятков до сотен ГэВ, а в случае распада новых тяжелых резонансов ожидаемые значения p_t достигают тэвновой области.

Изучение указанных процессов накладывает дополнительные требования к экспериментальным установкам, связанные с улучшением возможностей триггерирования и детектирования мюонов. Идентификация мюонов в протон-протонных взаимодействиях на БАК, выполняемая мюонной системой CMS, предоставляет возможность изучения обширной области физических процессов. Важнейшей особенностью мюонной системы является способность отделить реальные события от фоновых и с высокой точностью и эффективностью определить пространственные, временные координаты частиц, и измерить их поперечный импульс (p_t).

Основополагающая роль мюонной системы в CMS подчеркнута в названии эксперимента «Компактный мюонный соленоид». В мюонной системе CMS измерение импульса и заряда мюонов происходит в широком кинематическом диапазоне. Комплекс передней мюонной станции ME1/1 торцевой мюонной системы CMS играет определяющую роль в обеспечении необходимого энергетического разрешения мюонной системы установки CMS. Наиболее близкое в мюонной системе расположение станции по отношению к внутреннему трекеру обеспечивает сшивку частей трека, восстановленных в мюонной и трекерной системах, и экстраполяцию трека в точку взаимодействия, что определяет высокие требования к характеристикам детекторов мюонной станции ME1/1, которые должны выполняться в сложных экспериментальных условиях при сильном магнитном поле до 4 Т и при высоком уровне фоновых загрузок до 3 кГц/см².

В качестве детекторов передней мюонной станции ME1/1 нами выбраны камеры с катодным считыванием информации, оснащенные быстрой и надежной электроникой, которые в сложных рабочих условиях обеспечивают эффективность восстановления пространственной координаты > 99 %, пространственное разрешение < 75 мкм и временное разрешение ~ 3 нс.

Цель диссертационной работы.

Настоящая диссертационная работа посвящена разработке, созданию, монтажу и обеспечению многолетней эксплуатации уникального комплекса передней станции ME1/1 торцевой мюонной системы установки Компактный Мюонный Соленоид на Большом адронном коллайдере.

Выполнение цели диссертационной работы включает следующие направления:

1. Создание многослойных пропорциональных камер с катодным считыванием для комплекса передней мюонной станции ME1/1, что включает выполнение следующих задач:

- разработка конструкции камер ME1/1;
- разработка технологии серийного производства камер ME1/1 и создание в ОИЯИ участка

- для изготовления камер, оснащённого необходимым оборудованием и системами контроля на всех этапах производства детекторов;
- производство 76 шестислойных камер с катодным считыванием информации для передней мюонной станции ME1/1.
2. Методические исследования характеристик камер для комплекса передней мюонной станции ME1/1 с целью оптимизации их конструкции для обеспечения уникальных параметров, соответствующих условиям проекта CMS. Создание уникальной электронной аппаратуры для проведения систематических методических исследований характеристик прототипов детекторов, включая:
 - создание автоматизированных стендов для исследования характеристик детекторов с космическими частицами и на пучках заряженных частиц;
 - разработку и изготовление комплекта специализированных интегральных схем для считывания анодной и катодной информации, на базе которых создана многоканальная система электроники регистрации для комплексных исследований прототипов детекторов мюонной станции ME1/1.
 3. Монтаж комплекса передней мюонной станции на установке CMS, включая системы (высоковольтную, низковольтную, газовую и охлаждения электроники), обеспечивающие работу детекторов.
 4. Проверка работоспособности комплекса мюонной станции ME1/1 после сборки. Исследование зависимости характеристик детекторов от реального магнитного поля в диапазоне $0 \div 4$ Т (тест с космическими частицами).
 5. Экспериментальное исследование характеристик комплекса мюонной станции ME1/1 на протон-протонных столкновениях в первый период набора данных.
 6. Модернизация детекторов и электроники считывания информации комплекса передней мюонной станции ME1/1 в период первой длительной остановки БАК (LS1), нацеленная на обеспечение надёжной и эффективной регистрации событий и организации триггера в области псевдобыстрот $2.1 < |\eta| < 2.4$, в режиме работы БАК с полной энергией в системе центра масс $\sqrt{s} = 14$ ТэВ и светимостью $2 \times 10^{34} \text{ см}^2\text{с}^{-1}$, а также исследования направленные на обеспечение работы установки в условиях высокой светимости БАК $5 \div 7 \times 10^{34} \text{ см}^2\text{с}^{-1}$ при увеличении интегральной светимости коллайдера на порядок по сравнению с исходным расчетным значением 300 фб^{-1} .

Научная новизна работы.

1. Впервые разработан, создан и введён в эксплуатацию уникальный комплекс передней станции торцевой мюонной системы для крупнейшей в мире экспериментальной установки Компактный мюонный соленоид на Большом адронном коллайдере. Уникальные характеристики всех детекторов CMS, в том числе характеристики комплекса передней мюонной станции, позволили выполнить одну из основных целей эксперимента - открытие Бозона Хиггса - важнейшего открытия в области физики высоких энергий XXI века.
2. Создана уникальная электронная аппаратура для проведения систематических исследований характеристик прототипов детекторов мюонной станции ME1/1, для которой разработан и изготовлен комплект специализированных интегральных схем считывания анодной и катодной информации.
3. Проведены комплексные методические исследования, на основании результатов которых разработаны, изготовлены и применены в эксперименте CMS многослойные пропорциональные камеры с катодным считыванием. В этих исследованиях:
 - впервые экспериментально исследовано влияние магнитного поля на пространственное разрешение камер с катодным считыванием. Показана необходимость компенсации эффекта сноса электронов, дрейфующих к аноду, с помощью поворота проволок на угол Лоренца, значение которого для камер ME1/1 составило $\alpha_L = 29^\circ$;
 - впервые исследовано влияние электромагнитного сопровождения, индуцируемого мюонами, на координатную точность камер ME1/1. Показано, что вероятность

регистрации вторичных треков сопровождения возрастает линейно в интервале энергий $30 \div 300$ ГэВ с 17 % до 27 %, что приводит к возрастанию числа невозстанавливаемых событий с 0.1 % до 2.6 %;

- исследована вероятность образования δ -электронов в плоскости камеры, которая составляет ~12 %. Оценка вероятности поглощения δ -электронов в одном слое камеры составляет ~80 %;
- впервые показано, что наличие 6 плоскостей в мюонных камерах является оптимальным для эффективной реконструкции трека мюона при наличии электромагнитного сопровождения;
- впервые экспериментально показано, что анодные и катодные сигналы, приходящие с 6 плоскостей камеры, могут использоваться в логике локального триггера. Первые 2 анодных сигнала могут служить меткой события, а мажоритарные совпадения сигналов с 6 анодных и катодных плоскостей используются для однозначной привязки трека к времени взаимодействия пучков в коллайдере. Идентификация трека осуществляется за время 50 нс.

4. Успешно завершён первый этап набора экспериментальных данных на установке CMS. Эффективность регистрации событий детекторов торцевой части мюонной системы CMS во время первого периода набора данных эквивалентна ~98.5 %. Интегральная светимость, накопленная CMS за первый период набора данных, составила 29.4 fb^{-1} . Значение пиковой светимости в конце сеанса достигло значения $L = 7.7 \times 10^{33} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$.

На основе экспериментальных данных первого этапа открыт бозон Хиггса и получены важные результаты по проверке Стандартной модели.

Практическая ценность работы.

Разработаны и изготовлены 76 камер с катодным считыванием информации, которые применены в составе комплекса передней мюонной станции ME1/1 эксперимента CMS. Уникальные характеристики детекторов: пространственное разрешение < 75 мкм и временное разрешение 3 нс - полностью соответствуют требованиям эксперимента CMS.

Конструкция и технология изготовления камер ME1/1 могут быть применены для создания прецизионных и быстродействующих детекторов частиц для исследований в физике высоких энергий.

Представленный в диссертации цикл методических работ имеет важное практическое применение для разработки конструкции и технологии изготовления прецизионных камер с катодным считыванием информации. Предложены и экспериментально доказаны методы компенсации эффектов влияния неоднородного аксиального магнитного поля до 4 Т и высокого уровня радиационного фона до 3 кГц/см^2 на деградацию характеристик камер с катодным считыванием.

Автором совместно с Национальным центром физики частиц высоких энергий (НЦФЧВЭ) г. Минск для исследования и оптимизации характеристик детекторов ME1/1 разработаны и изготовлены специализированные интегральные схемы для считывания анодной, катодной и триггерной информации. На базе изготовленного комплекта интегральных схем создана многоканальная система электроники регистрации, с помощью которой проведены комплексные исследования детекторов ME1/1.

Под руководством автора в период первой длительной остановки БАК успешно проведена модернизация детекторов и электроники считывания передней мюонной станции ME1/1:

- автором совместно с НЦФЧВЭ г. Минск разработаны и изготовлены платы распределения низкого напряжения LVDB-7, которые установлены на модернизированные камеры мюонной станции ME1/1;
- устранена неоднозначность определения координаты частицы в области больших загрузок камер ($2.1 < \eta < 2.4$) и более чем в 3 раза уменьшена шумовая нагрузка на канал электроники считывания, что позволило более чем на 20 % улучшить пространственное

разрешение камеры ($\sigma = 51$ мкм), а также обеспечить эффективность восстановления координаты трека $> 96\%$ и эффективность триггерирования $> 90\%$.

Апробация работы.

Основные результаты диссертации изложены в 25 работах, список которых приведен в конце автореферата. Результаты исследований неоднократно докладывались на общелабораторных семинарах в ЛФЧ ОИЯИ, на семинарах коллаборации CMS в ЦЕРН, а также на следующих международных совещаниях и конференциях:

1. V. Karjavin, CSC Front-End, Trigger and DAQ Layout. Proc. CMS Trigger Meeting, pp 284-304, Bad-Aussee, Austria, March 2, 1994.
2. 1st Annual RDMS CMS Collaboration Meeting, CERN, Geneva, Switzerland, December 11, 1995.
3. 2nd Annual RDMS CMS Collaboration Meeting, CERN, Geneva, Switzerland, December 16-17, 1996.
4. 3rd Annual RDMS CMS Collaboration Meeting, CERN, Geneva, Switzerland, December 16-17, 1997.
5. CMS Endcap Muon Meeting, CERN, Geneva, Switzerland, June 14, 1998.
6. Proceedings of ME1/1 Engineering Design Review, CMS Document 99-047, CERN, Geneva, Switzerland, June 21-23, 1999.
7. Endcap Muon CSC-ME1/1 Meeting at CERN, Geneva, Switzerland, June 06, 2004.
8. 8th Annual RDMS CMS Collaboration Meeting, CERN, Switzerland, December 3, 2003.
9. 10th Annual RDMS CMS Collaboration Meeting, PNPI, St. Petersburg, Russia, 12.09.2005.
10. Endcap Muon CSC-ME1/1 Meeting at CERN, Geneva, Switzerland, June 18, 2005.
11. Muon Annual Review Meeting. CERN, Geneva, Switzerland, June 27, 2006.
12. 11th Annual RDMS CMS Collaboration Meeting, Varna, Bulgaria, September 12, 2006.
13. Endcap Muon CSC-ME1/1 Meeting at CERN, Geneva, Switzerland, February 26, 2007.
14. Endcap Muon CSC-ME1/1 Meeting at CERN, Geneva, Switzerland, June 16, 2007.
15. Muon Project Readiness review, CERN, Switzerland, June 14, 2013
16. 15th Annual RDMS CMS Collaboration Conference, Alushta, Ukraine, May 27, 2011.
17. 17th Annual RDMS CMS Collaboration Conference, JINR Dubna, August 7, 2014.
18. 18th Annual RDMS CMS Collaboration Conference, Varna, Bulgaria, August 24, 2015.
19. 19th Annual RDMS CMS Collaboration Conference, Varna, Bulgaria, September 7, 2016.
20. International Session-Conference of SNP PSD RAS "Physics of Fundamental Interactions". 12 April 2016, JINR, Dubna.
21. 2nd CMS Workshop «Perspectives on Physics and on CMS at HL-LHC» August 29, 2017. Varna, Bulgaria
22. MEx/1 readiness review. CERN, 2 May 2019. "LVDB5 readiness for installation".

Структура и объем диссертации.

Диссертация объемом 214 страниц состоит из введения, семи глав и заключения, содержит 20 таблиц, 179 рисунков и список цитируемой литературы из 105 ссылок.

Публикации.

По материалам диссертации опубликовано 25 работ, в том числе в журналах «Письма в ЭЧАЯ», «JINR Rapid Communications», Nuclear Instruments and Methods, Journal of Physics, Journal of Instrumentation и материалах международных конференций.

Содержание диссертации.

Во введении дан краткий анализ роли Стандартной модели в современной физике. Отмечено, что одним из самых активных направлений исследования в начале 21 века является поиск

отклонений от Стандартной модели (поиск «новой физики»). Отмечена особая роль бозона Хиггса в Стандартной модели для объяснения взаимодействия элементарных частиц различного типа. Сформулированы цели и задачи диссертационной работы, рассмотрены актуальность исследований и практическая ценность работы.

В первой главе приведено краткое описание и основные характеристики «Большого адронного коллайдера» (БАК) и механизм инжекции частиц в БАК, который осуществляется с помощью ускорительного комплекса ЦЕРН. Отмечены некоторые особенности БАК, которые учитываются при разработке экспериментальной аппаратуры для исследований. Количество неупругих взаимодействий в секунду (частота событий) определяется как произведение поперечного сечения реакции (σ) и светимости (L):

$$N_{\text{соб}} = L \times \sigma = 10^{34} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1} \times 60 \times 10^3 \times 10^{-24} \text{ см}^2 = 6 \times 10^8 \text{ с}^{-1}$$

Большое количество событий налагает серьёзные требования к быстрдействию детекторов и электроники считывания информации, а также к обработке экспериментальных данных. Кроме того, детекторы и электроника, располагаемая на детекторе или в непосредственной близости от него, подвергаются высоким дозам радиационного облучения, что требует применения радиационно-стойких технологий.

В диссертации рассмотрено назначение экспериментальных установок, работающих на БАК. Дано краткое описание эксперимента «Компактный мюонный соленоид» (CMS) [16]. Экспериментальная установка CMS спроектирована для выполнения обширной физической программы в сложных рабочих условиях при повышенной светимости БАК.

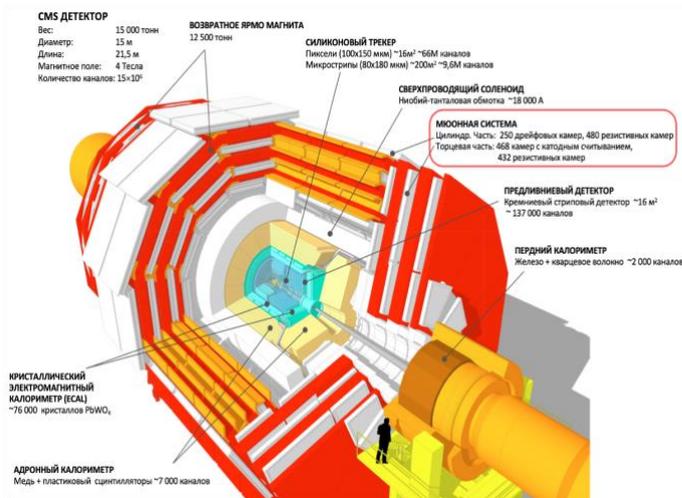


Рис. 1. Общий вид установки CMS.

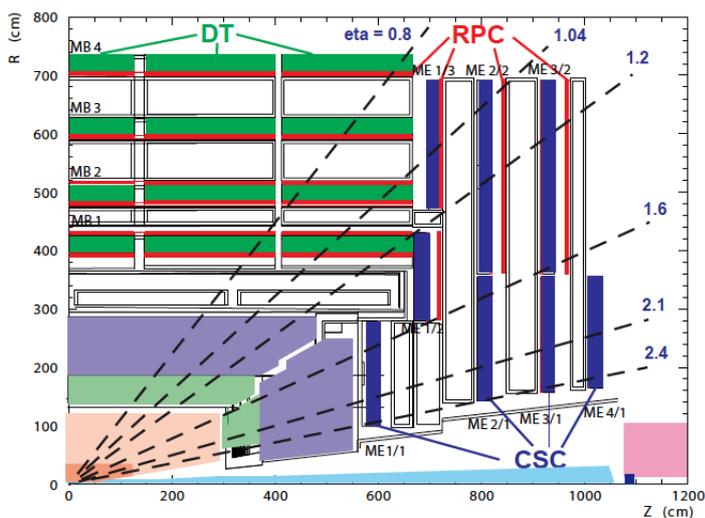


Рис. 2. Четвертая часть мюонной системы CMS.

Представлены назначение, состав и характеристики subsystem CMS, а также принцип действия детекторов, входящих в них.

Две торцевые части мюонной системы, расположенные с двух сторон цилиндрической области CMS (рис.1), состоят из четырёх мюонных станций каждая (ME1-ME4) (рис.2), собранных на основе шестислойных камер с катодным считыванием информации (CSC) и дополнительных триггерных детекторов на основе плоских резистивных камер (RPC), перекрывающих диапазон псевдобыстрот $0.9 < |\eta| < 2.4$.

Представлено назначение мюонной системы CMS [19] и её основные характеристики:

- эффективная идентификация мюонов в условиях работы в магнитном поле ~ 4 Т и повышенных фоновых нагрузках ~ 1.0 кГц/см²;

- эффективная выработка мюонного триггера. Прецизионные мюонные камеры совместно с дополнительными быстрыми детекторами должны обеспечить запуск установки с порогом поперечного импульса в пределах от нескольких ГэВ до 100 ГэВ в диапазоне псевдобыстрот $0.9 < |\eta| < 2.4$;
- собственное разрешение мюонной системы по импульсу $\delta p_t/p_t = 8 \div 15 \%$ при 10 ГэВ и $20 \div 40 \%$ при 1 ТэВ;
- глобальное разрешение по импульсу (при совпадении с центральным трекером) $1.0 \div 1.5 \%$ при 10 ГэВ и $6 \div 17 \%$ при 1 ТэВ;
- достоверность определения заряда 99 % вплоть до кинематического предела 7 ТэВ;
- детекторы и электроника считывания информации мюонной системы должны обладать способностью противостоять высокому радиационному фону;
- должна быть обеспечена надёжная, не требующая технического обслуживания, работа детекторов при высокой светимости БАК ($L > 5 \times 10^{34} \text{ см}^{-2}\text{сек}^{-1}$).

Вторая глава посвящена обоснованию выбора типа детектора и электроники считывания для комплекса передней станции ME1/1 торцевой мюонной системы CMS.

Многопроволочные камеры с катодным считыванием информации выбраны в качестве базовых детекторов мюонных систем крупнейших экспериментов CMS и ATLAS [1].

Представлен физический принцип работы камер с катодным считыванием [1, 24]. Показано, что газовое усиление детекторов для обеспечения координатной точности $\sigma_x = 50 \text{ мкм}$ при уровне шумов $\sigma_{\text{шум}} \sim 4000 \text{ е}$, времени формирования сигнала $T_{\text{ф}} = 300 \text{ нс}$ и шаге катодных стрипов $l_a = 8 \text{ мм}$, должно быть: $G \sim 5.0 \times 10^4$ [1].

Отмечены свойства, которыми должны обладать детекторы комплекса передней мюонной станции ME1/1 торцевой мюонной системы CMS:

- надёжная, не требующая технического обслуживания, работа детекторов в течение не менее 10 лет при повышенной светимости БАК;
- координатное разрешение камер должно быть $\sim 75 \text{ мкм}$ при фоновой нагрузке $\sim 1 \text{ кГц/см}^2$;
- радиальное пространственное разрешение плоскости камеры $\sim 25 \text{ мм}$ (определяется шириной группы проволочек);
- возможность работы в сильном аксиальном магнитном поле величиной до 4.0 Т;
- формирование локального триггера с эффективностью не менее $\sim 99 \%$;
- идентификация локального трека с моментом взаимодействия пучков в коллайдере;
- детекторы должны обладать необходимой защитой от процессов старения (Мальтер эффект).

Сложность расположения в экспериментальной установке накладывает особые условия на разработку и эксплуатацию детекторов мюонной станции ME1/1 [1]. Такие факторы как ограниченное место для монтажа детекторов и трудный доступ к ним, при необходимости ремонта, предъявляют специальные требования к надёжности детекторов и электроники считывания информации с них.

Приведены требования к электронике считывания информации для детекторов мюонной станции ME1/1 [1]:

- возможность работы в сильном магнитном поле ($< 4.0 \text{ Т}$);
- радиационная стойкость, соответствующая уровню радиации в области расположения детекторов мюонной станции ME1/1 [9];
- набор данных без мёртвого времени в условиях больших нагрузок $\sim 100 \text{ кГц/канал}$;
- компактность и наилучшую интеграцию с камерой;
- минимальное потребление по питанию.

В третьей главе приведены результаты методических исследований камер и электроники считывания информации мюонной станции ME1/1. В таблице 1 представлены параметры

прототипов камер, которые были созданы для исследования и оптимизации характеристик детекторов.

Таблица 1

Прототип	P0	P1	P2	P3	P4
Количество плоскостей, шт.	4	6	6	6	6
Зазор, мм	2.5	2.5	2.5	2.8	3.5
Шаг стрипов (верх/низ), мм	5	5	5	7.8/3.15	5.8/4.1
Шаг проволочек, мм	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Диаметр проволочек, мкм	30	30	30	30	30
Рабочее напряжение, кВ.	2.8	2.8	2.8	2.9	3.0
Угол наклона проволочек, град.	-		25	22	29
Размер плоскости, м	0,5 x 0,5	0.9x0.65x0.45		1.705x0.663x0.34	1.62x0.61x0.301
Форма катодных стрипов	Прямоугольная	Радиальная			

Сформулированы задачи оптимизации конструкции камеры с катодным считыванием для передней мюонной станции ME1/1 [6] и представлена программа систематических исследований характеристик прототипов камер.

Представлены результаты методических исследований прототипов детекторов мюонной станции ME1/1, для которых разработано несколько поколений электроники считывания с катодных стрипов и анодных проволочек.

Впервые на прототипе P0 получены основополагающие результаты, позволяющие сделать вывод о правильном выборе типа детектора для торцевой мюонной системы CMS и его физических параметров таких как: ширина стрипа и расстояние анод-катод, диаметр и шаг анодных проволочек, состав газовой смеси, а также проверены детали конструкции и методика точного позиционирования плоскостей при сборке детектора [2]. Экспериментально измерено координатное разрешение плоскости прототипа P0, которое составило ~ 60 мкм, и временное разрешение ~ 3 нс, что соответствует требованиям CMS к точности восстановления пространственной координаты и быстродействию детекторов мюонной станции ME1/1.

Камеры мюонной станции ME1/1 работают в аксиальном магнитном поле величиной до 4 Тесла. Координата регистрируемого мюона определяется областью сбора электронов на анодной проволоке, родившихся в результате прохождения мюона через газовый объем детектора. Под действием магнитного поля электроны, дрейфующие к анодной проволоке, сносятся, что приводит к потере точности восстанавливаемой координаты. Компенсировать влияние сноса дрейфующих электронов на координатную точность можно поворотом анодных проволочек на угол α (угол Лоренца) относительно оси камеры (центрального стрипа). Впервые угол Лоренца экспериментально измерен на прототипе P0 [1], который для значения магнитного поля 3.0 Т составил 25° (Рис. 3). Анодные проволочки прототипа P2 были повернуты на угол $\alpha_L = 25^\circ$ относительно радиальной оси центрального стрипа. При этом значение пространственного разрешения, измеренного с помощью космических частиц в

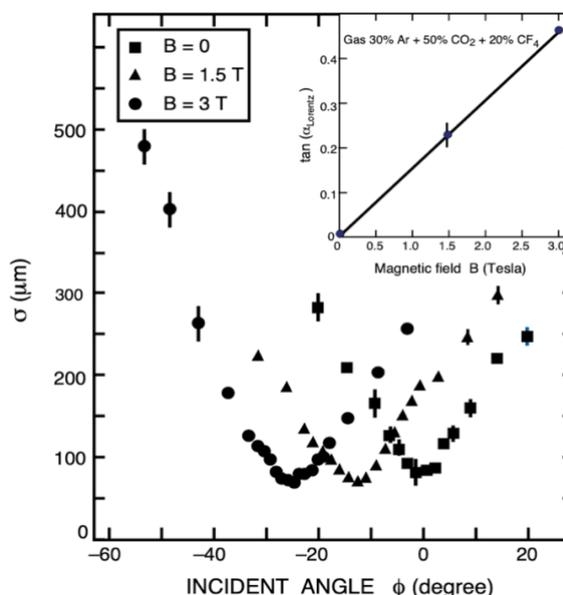


Рис.3. Зависимость пространственной точности камеры от угла наклона трека для трёх значений радиального магнитного поля и зависимость тангенса угла Лоренца от величины магнитного поля.

магнитном поле 3 Тесла, составило ~ 63 мкм по всей чувствительной области камеры (рис. 4). Временное разрешение прототипа P2 составило ~ 2 нс [4]. Исследовано влияние коррелированного фона на характеристики детекторов ME1/1. Анализ экспериментальных результатов, полученных при изучении характеристик прототипа P0 с космическими частицами, позволил впервые оценить наличие в объеме камеры электромагнитного сопровождения, индуцируемого мюонами, приводящего к искажению формы распределения заряда на стрипах, а также к образованию дополнительных треков частиц близких к мюонному треку (рис. 5). Экспериментально показано, что

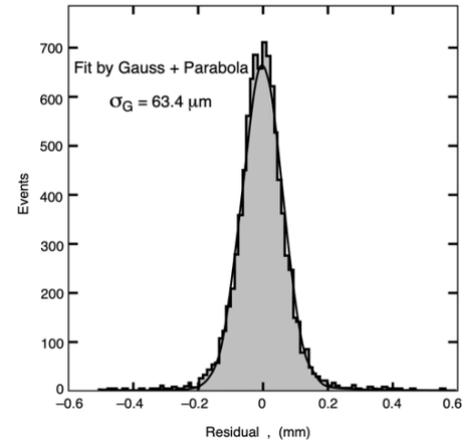


Рис. 4. Пространственное разрешение прототипа P2.

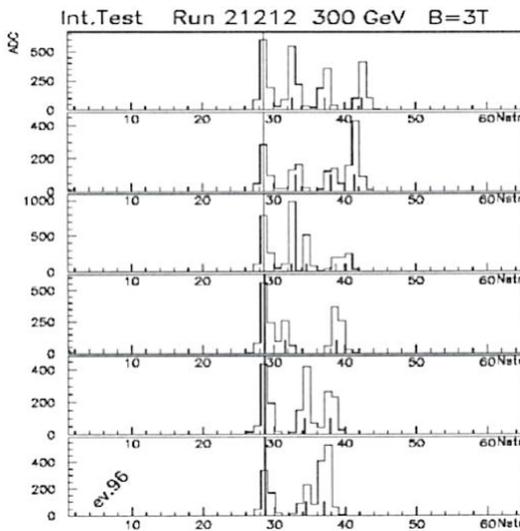


Рис. 5. Мюонный трек с электромагнитным сопровождением.

[2, 3]. Показано, что наличие 6 плоскостей в камерах является оптимальным для эффективной реконструкции трека с электромагнитным сопровождением мюона. Для мюонных треков без электромагнитного сопровождения точность прототипа камеры составляет ~ 75 мкм (рис. 6(a)). В случае, когда электромагнитное сопровождение перекрывается с треком мюона, точность деградирует до 1 мм (рис. 6 (б)) [1]. Экспериментальные результаты интегрального теста позволили оценить загрузочную способность детекторов и электроники считывания [7]. На основе исследований и оптимизации параметров прототипов детекторов и электроники регистрации, автором совместно с НЦФЧВЭ г. Минск разработаны специализированные интегральные схемы для катодной и анодной электроники регистрации информации мюонной станции ME1/1.

вероятность образования δ -электронов в плоскости камеры составляет ~ 12 %. Вероятность поглощения δ -электронов в одном слое камеры составляет ~ 80 % [2]. Вероятность образования вторичных треков от электромагнитного сопровождения измерена на прототипе P2 в интегральном тесте на канале H2 ЦЕРН в пучке мюонов в диапазоне энергий 10-300 ГэВ. Конфигурация эксперимента, в которой участвовали прототипы субдетекторов торцевой части установки CMS (HCAL + ECAL + ME1/1), была максимально приближена к реальной. Вероятность регистрации вторичных треков сопровождения возрастает линейно в интервале энергий 10 ÷ 300 ГэВ с 17 % до 27 %, что приводит к возрастанию числа невозстановливаемых событий с 0.1 % до 2.6 %

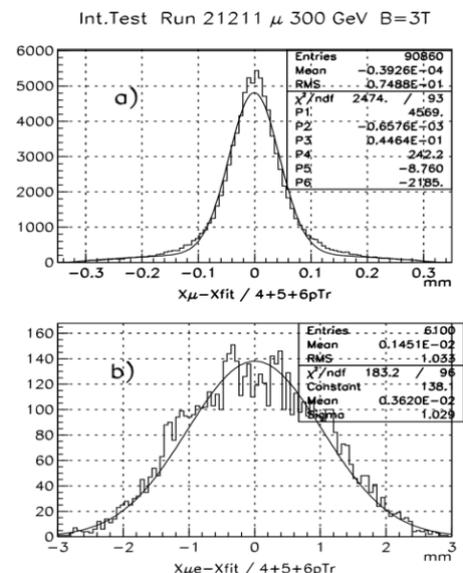


Рис.6. Влияние электромагнитного сопровождения на координатную точность камеры: а) без сопровождения; б) с сопровождением.

Параметры микросхем были оптимизированы с учетом специфических особенностей камер мюонной станции ME1/1. Микросхемы изготовлены на производственном объединении Интеграл, г. Минск.

Для регистрации информации с катодных стрипов создан 16 канальный зарядочувствительный предусилитель-формирователь (КАТОД-1) с временем формирования импульса 100 нс, с головным n-p-n транзистором, с регулировками коэффициента усиления и компенсации длинной компоненты сигнала с камеры (параметры микросхемы приведены в таблице 2) [8]. Для вывода быстрого триггерного сигнала создан 16 канальный формирователь - дискриминатор быстрого канала (КАТОД-3) с временем формирования 30 нс, с регулировками порога и длительности выходного импульса (параметры микросхемы приведены в таблице 3).

Для регистрации информации с анодных проволочек создан 8 канальный предусилитель-формирователь-дискриминатор (АНОД) с временем

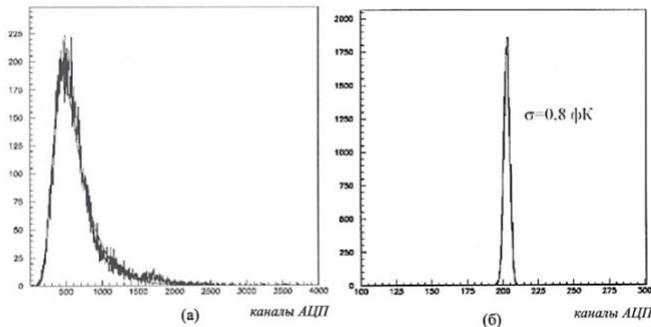


Рис.7. (а) - распределение заряда на катодных стрипах прототипа P3. (б) - уровень шумов канала ИС КАТОД-1.

мюонной станции ME1/1. Катодная информация считывалась с помощью 96 канального модуля, созданного на базе интегральных схем КАТОД-1 и КАТОД-3.

Для регистрации информации с анодных проволочек разработана 24 канальная плата на базе интегральной схемы АНОД.

На рисунке 7 (а) показано характерное распределение заряда на катодных стрипах прототипа P3 [5]. Пик кривой соответствует величине заряда ~150 фК. Разброс пьедесталов АЦП показан на рисунке 7 (б). Уровень шумов измерительного канала ИС КАТОД-1 составил $\sigma = 0,8$ фК. Исследованы временные характеристики прототипа P3 [10, 11]. Полная ширина характерного временного спектра анодных сигналов с одной плоскости камеры на уровне 1 % событий эквивалентна ~25 нс (рис. 8). Соответственно, 99 % событий могут быть зарегистрированы во временных воротах ~25 нс, что удовлетворяет требованиям CMS к

Таблица 2.

Количество каналов	16
Коэффициент преобразования	(1±5) мВ/фК
Шум (ENC г.м.с)	2400+12 э/пФ
Время пика сигнала (C _{вх} =80 пФ)	100 нс
Время базовой линии сигнала	600нс
Наводка с канала на канал	<1 %
Нелинейность	1 %; (0 ÷1.5) В
Потребление по питанию	25мВт/канал

Таблица 3.

Количество каналов	16
Шум (ENC г.м.с)	7000 э
Время формирования	30 нс
Время распространения сигнала	15 нс
Длительность выходного сигнала	30 ÷80 нс
Порог дискриминатора	2 ÷50 мВ
Потребление по питанию	30мВт/канал

Таблица 4.

Количество каналов	8
Коэффициент преобразования	10 мВ/фК
Шум (ENC г.м.с)	1600+20 э/пФ
Время формирования	15 нс
Время распространения сигнала	7нс
Длительность выходного сигнала	30 ÷150 нс
Двух импульсное разрешение	100 нс
Порог дискриминатора	5÷50 мВ
Потребление по питанию	25мВт/канал

формирования импульса 15 нс, с регулировками порога и длительности выходного импульса (параметры микросхемы приведены в таблице 4). Проведены испытания радиационной стойкости интегральных схем [9]. На базе созданных специализированных микросхем разработана и изготовлена многоканальная система электроники регистрации, с помощью которой проведены исследования характеристик финальных прототипов детекторов P3 и P4

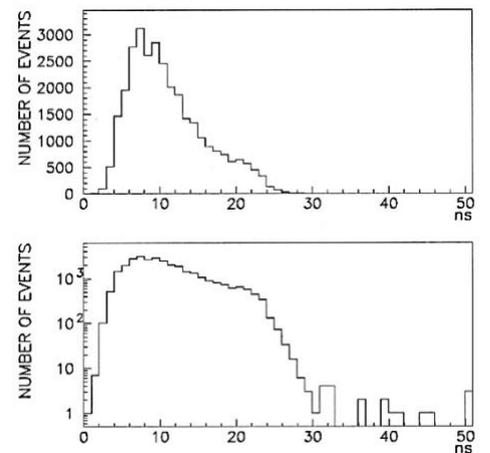


Рис. 8. Характерный временной спектр анодных сигналов с плоскости прототипа P3.

быстродействию анодной электроники мюонной станции ME1/1 [15]. На рисунке 9 показаны временные спектры распределения сигналов, последовательно приходящих с 6 плоскостей камеры, объединенных по "или", которые распределены во времени следующим образом: 1 сигнал - 10,5 нс; 2 сигнал - 12 нс; 3 сигнал - 14 нс; 4 сигнал - 16,5 нс; 5 сигнал - 22,5 нс; 6 сигнал - 26,5 нс. Видно, что первые пять сигналов приходят за время меньше 25 нс. Первый и второй сигналы могут использоваться в логике локального триггера и служить временной меткой события, а мажоритарное совпадение сигналов с 6 плоскостей используются для однозначной привязки трека к времени взаимодействия пучков в коллайдере.

Исследована эффективность стробуемой мажоритарной схемы совпадения, настроенной на срабатывание не менее 4 плоскостей, в зависимости от длительности стробующего сигнала. При длительности стробующего сигнала >30 нс мажоритарная схема совпадения (4 из 6) идентифицирует заряженный трек с эффективностью близкой к 100 %.

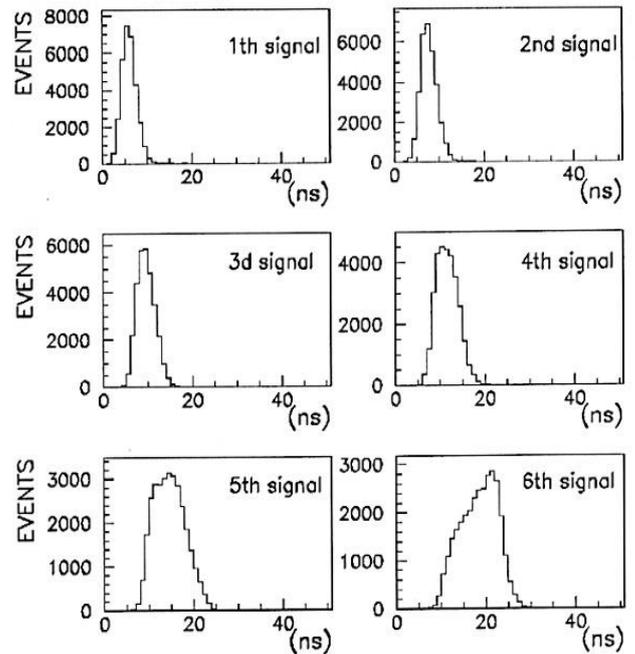


Рис. 9. Временные спектры анодных сигналов, последовательно приходящих с 6 плоскостей камеры.

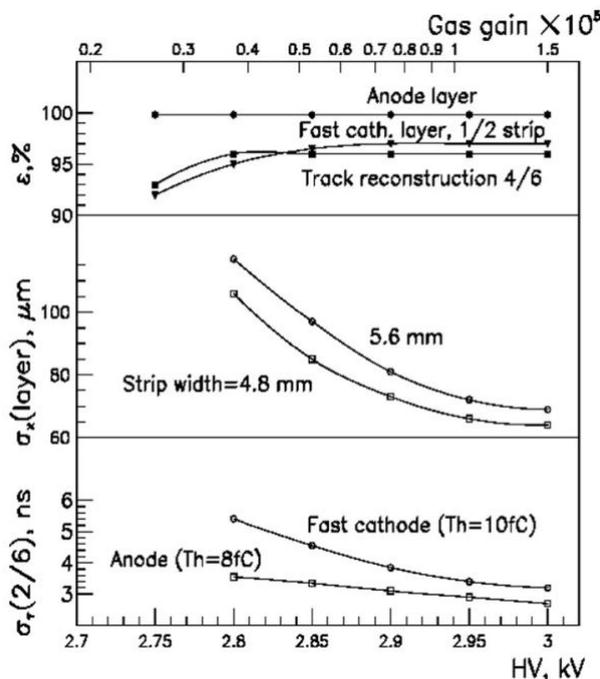


Рис.10. Зависимость эффективности регистрации, координатного и временного разрешения прототипа P4 от высокого напряжения и газового усиления.

Экспериментально показано, что временной спектр сигналов с катодных стрипов (ширина спектра по основанию 40 нс) имеет форму похожую на спектр анодных сигналов (рис. 8). Мажоритарное совпадение быстрых катодных сигналов используется для выработки локального катодного триггера.

Идентификация заряженного трека осуществляется мажоритарным совпадением анодных и катодных сигналов с 6 плоскостей за время <50 нс, при этом временной меткой события является второй сигнал, приходящий с анодных проволочек [15].

Представлены исследования характеристик прототипа P4 камеры с катодным считыванием ME1/1 [12] в мюонном пучке H2 ЦЕРН, измеренные в зависимости от значений высокого напряжения на камере (HV) и газового усиления (Gas gain) детектора (рис. 10) [6].

Координатная точность $70 \div 85$ мкм, измеренная с одной плоскости детектора в нижней части камеры (ширина стрипа 4,8 мм), и координатная точность $80 \div 100$ мкм в верхней части камеры (ширина стрипа 5,6 мм) соответствуют газовому усилению $G \sim (5 \div 7) \times 10^4$. Временное разрешение анодного канала $\sigma \sim 3$ нс и быстрого катодного канала $\sigma \sim 4$ нс измерены при газовом усилении $G \sim (5 \div 7) \times 10^4$. Экспериментально измеренные характеристики координатной точности и быстродействия

прототипа Р4 удовлетворяют требованиям эксперимента CMS к детекторам мюонной станции ME1/1.

Представлены экспериментальные результаты измерения загрузочной способности прототипа Р4, которые соответствуют газовому усилению $G \sim (5 \div 7) \times 10^4$ (рис. 11). При фоновых нагрузках, не превышающих 100 кГц/стрип, пространственное разрешение плоскости детектора соответствует $\sigma_{(layer)} \sim 70$ мкм, а при увеличении нагрузок до 500 кГц/стрип (фактор 5), разрешение деградирует $\sigma_{(layer)} \sim 100$ мкм, оставаясь при этом в пределах допустимого для камер ME1/1. Эффективность восстановления трека по 4 плоскостям, при нагрузках < 100 кГц/стрип, составляет ~ 96 %.

Эффективность регистрации треков с помощью быстрого катодного канала с точностью половины ширины стрипа эквивалентна ~ 95 %.

Экспериментально измеренные параметры предсерийного прототипа камеры Р4 полностью соответствуют требованиям CMS к мюонной станции ME1/1, что позволило принять решение начать серийное изготовление детекторов.

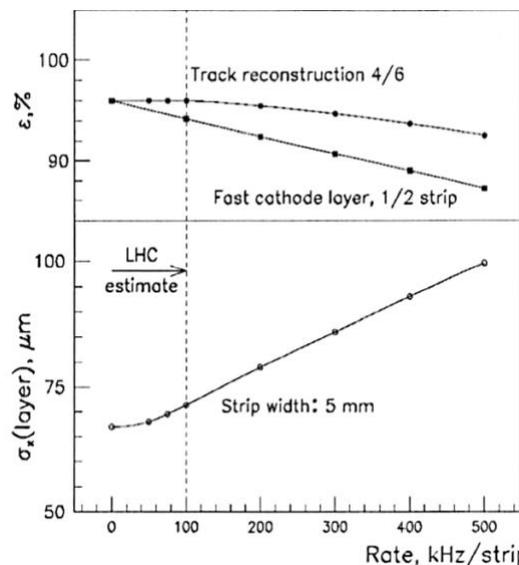


Рис. 11. Загрузочная способность прототипа Р4.

Четвертая глава посвящена созданию многослойных пропорциональных камер с катодным считыванием для передней мюонной станции. Представлена конструкция и физические характеристики камер с катодным считыванием передней мюонной станции ME1/1 [12]. Камера ME1/1 имеет трапециевидальную форму и представляет собой 10-градусный сектор (рис.12), состоящий из 6 слоев одинаковых пропорциональных камер с катодным считыванием информации.

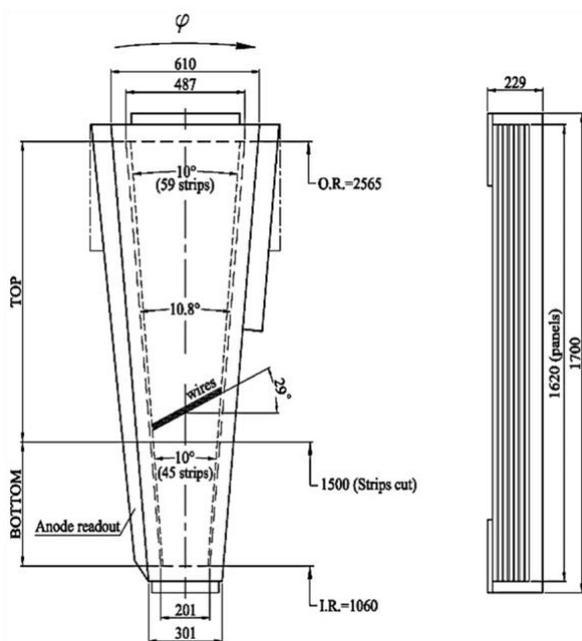


Рис.12. Камера с катодным считыванием мюонной станции ME1/1.

Таблица 5.

Камера	Кол-во плоскостей		6
	Внутренний радиус	м	0.965
	Внешний радиус	м	2.665
	Количество катодных каналов		480
	Количество анодных каналов		288
	Газовый объем	л	25
Плоскость	Вес с электроникой	кг	135
	Расстояние анод-катод	мм	3.5
	Высота	м	1620
	Ширина нижней части	м	0.301
	Ширина верхней части	м	0.610
	Толщина	мм	15
	Площадь	м ²	0.73
	Чувствительная зона	м ²	0.52
Катодные стрипы	Форма стрипов		Радиальная
	Кол-во каналов в верх. части		64
	Кол-во каналов в нижней части		48
	Шаг стрипа в верхней части	мрад	2.33
	Шаг стрипа в нижней части	мрад	3.88
	Длина стрипа в верх. части	мм	1065
Анодные проволоочки	Длина стрипа в нижней части	мм	440
	Диаметр проволоочки	мкм	30
	Кол-во проволоочек		587
	Шаг проволоочек	мм	2.5
	Кол-во каналов		48
	Проволок в канале (кроме 1 и 48)		11
Угол наклона проволоочек	град	29	

Каждый слой образован двумя катодными электродами «сплошной» и «стрипованный»

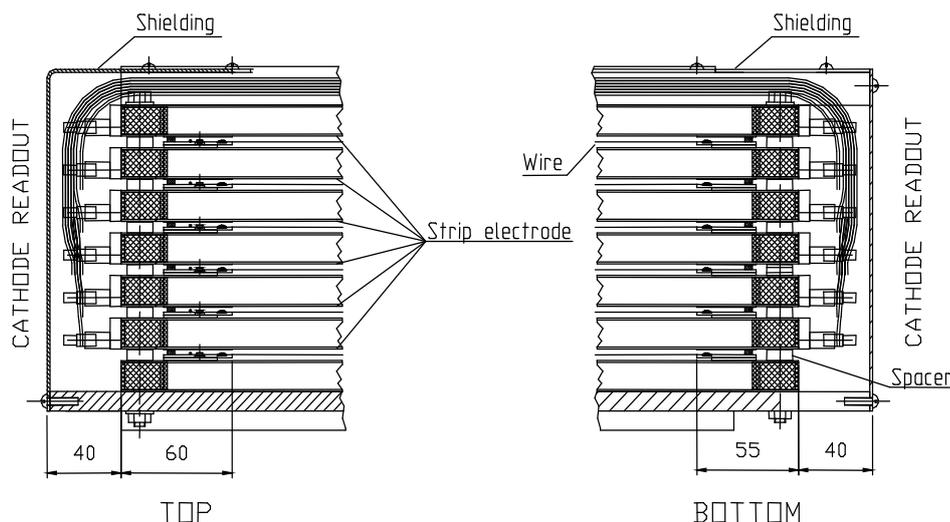


Рис. 13. Сечение камеры с катодным считыванием мюонной станции ME1/1.

(стрипы отфрезерованы на поверхности фольгированного стеклотекстолита). Длина стрипов определяется чувствительной областью детекторов ME1/1 ($1.6 < \eta < 2.4$), которая начинается с радиуса $R = 1060$ мм, и заканчиваются на $R = 2565$ мм. (рис. 12) Максимальная длина стрипа равна 150 см. Шаг стрипа в верхней части камеры равен 2.96 мрад и в нижней части камеры 3.88 мрад. Максимальная длина проволоки равна 53 см. Параметры камеры приведены в таблице 5.

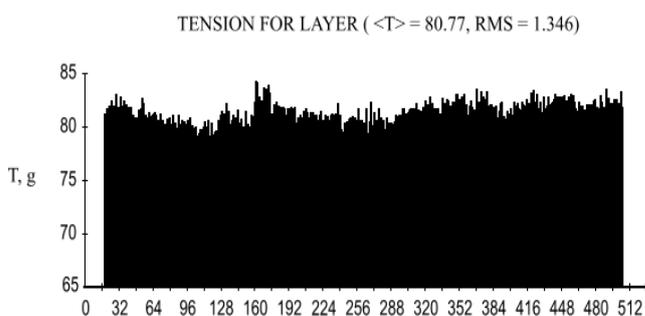


Рис.14. Разброс значений натяжения проволочек на одной плоскости камеры.

Для уменьшения загрузки катодных каналов регистрации стрипы камер станции ME1/1 разделены по вертикали на 2 части и считываются независимо с двух сторон камеры. Радиальные стрипы образуют естественную систему координат для измерения импульса мюона. Катодные электроды представляют собой самоподдерживающиеся панели с сотовым заполнением [31, 57, 61, 63]. Семь панелей, соединённых вместе, формируют шесть газовых промежутков камеры (рис.13). Ширина каждого газового зазора, образованного между катодными плоскостями, составляет 7 мм и задаётся 32 точными спейсерами с допуском по точности изготовления на высоту ± 25 мкм.

Подробно представлена технология изготовления камер с катодным считыванием ME1/1 с описанием отдельных операций по изготовлению основных деталей [13, 14].

Каждая изготовленная панель проходила контроль качества перед установкой на камеру. На рисунке 14 представлены результаты измерения натяжения проволочек для одной плоскости камеры [62]. Среднее значение натяжения проволочек одной плоскости составляет $T = 80,8$ г. Разброс относительно среднего значения эквивалентен: $rms = 1,3$ г.

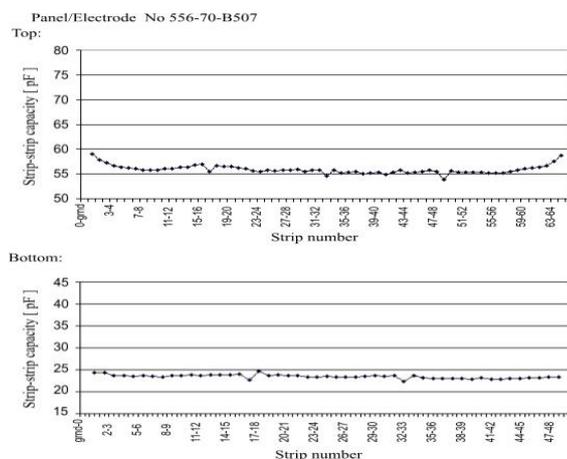


Рис. 15. Разброс ёмкости между стрипами для верхней и нижней частей камеры.

Предел упругости вольфрамовой проволоки, покрытой 30 мкм слоем золота, составляет около 125 г.

Качество нарезки стрипов или расстояние между стрипами контролировалось с помощью измерения ёмкости между ними. Разброс ёмкости для верхней и нижней частей панели показан на рисунке 15. Ёмкость первого и последнего стрипа немного увеличена из-за влияния заземлений по контуру камеры.

Показано распределение отклонения толщины панелей от номинального значения $h = 15$ мм (рис.16). Всего измерено 273 панели (35 точек на каждой).

Герметичность газовых систем всех изготовленных камер была проверена методом заполнения газом при избыточном давлении 10 мбар. Согласно техническому проекту [1], при тестировании выполнялось следующее требование: утечка газа не должна превышать 0,44 % от общего потока газа (<0.25 см³/мин при $P=10$ мбар).

Герметичность систем охлаждения проверялась на заводе-изготовителе при заполнении водой под давлением $P=24$ атм и после установки на камеру при давлении 10 мбар (контролировалось полное отсутствие утечки). Все камеры после сборки плоскостей в один пакет проходили испытания с высоким напряжением $HV=3.2$ кВ, с газовой смесью $Ar + CO_2$ (40%, 60%). Затем производился монтаж системы водяного охлаждения электроники, кабелей и электронных плат считывания информации.

Представлено подробное описание электроники считывания, установленной на камеры ME1/1, которая включает следующие электронные модули [19]:

- 5 плат (по 96 каналов) считывания информации с катодных стрипов (CFEB);
- 18 плат (по 32 канала) считывания информации с анодных проволок (AFEB);
- 1 плата (288 каналов) анодного локального триггера (ALCT);
- 1 плата (5 каналов) распределения низковольтного напряжения.

Ограниченные размеры камеры и в то же время большое количество каналов регистрации сделали сложной задачей интеграции электроники (рис.17).

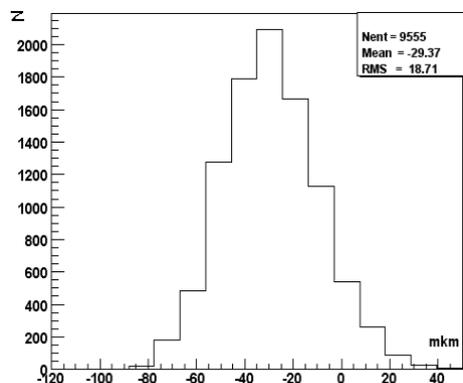


Рис.16. Разброс толщин панелей.

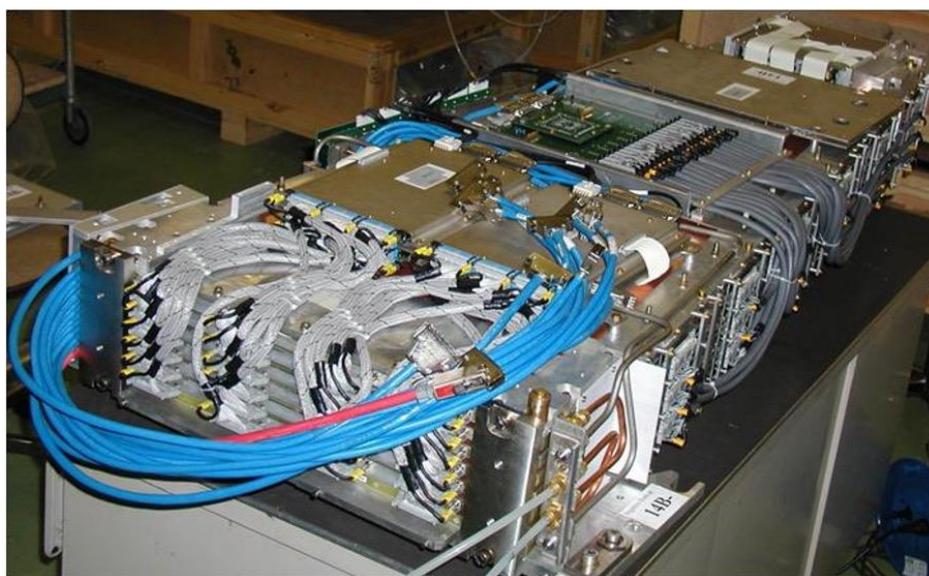


Рис. 17. Общий вид интеграции электроники и сервисных систем (газ и охлаждение) на камере ME1/1.

Представлена методика контроля работоспособности детекторов и электроники считывания после сборки камер ME1/1. Каждая камера проходила стандартный набор

тестовых испытаний, который подразделялся на 2 основные группы [21]. Тесты первой группы предназначены для проверки работоспособности электроники (без высокого напряжения на камере):

- проверка функций медленного контроля (управление коммутацией низковольтного питания электроники, расположенной на камере, чтение токов и напряжений);
 - снятие шумовых характеристик анодных и катодных каналов;
 - проверка работы компараторной логики;
 - сканирование каналов тестовыми сигналами при различных величинах порогов регистрации.
- К тестам второй группы относятся тесты с рабочим напряжением на камере:

- снятие шумовых характеристик анодных и катодных каналов;
 - проверка работоспособности электроники в тестах с космическими мюонами;
 - контроль коэффициента газового усиления и эффективности регистрации камеры.
- Аналогичная проверка работоспособности камер и электроники считывания информации была повторена после транспортировки в ЦЕРН, во время инсталляции детекторов и после окончательной сборки установки в экспериментальном зале.

Пятая глава посвящена разработке и созданию передней мюонной станции ME1/1.

Передняя мюонная станция ME1/1 расположена в зазоре размером 70 см между адронным калориметром (HE) и железным диском (YE1) (рис.18), в котором размещены два слоя камер с катодным считыванием и один слой дополнительных триггерных детекторов (RPC), оснащённых электроникой, кабелями и сервисными коммуникациями, что определяет жесткие ограничения на геометрические размеры конструкции камер ME1/1

Кроме этого, конфигурация экспериментальной установки в месте расположения

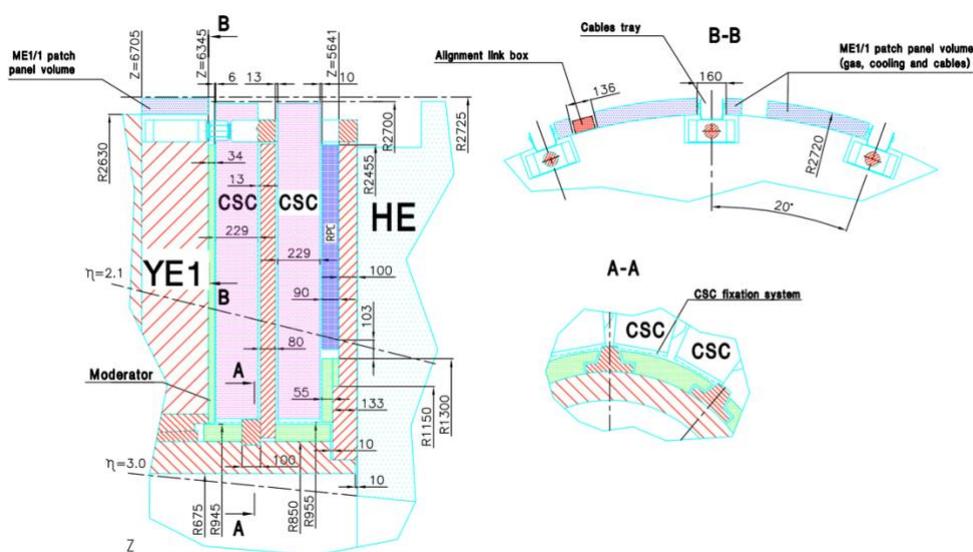


Рис. 18. Расположение камер станции ME1 / 1 в зазоре между адронным калориметром HE и железным диском YE1.

мюонной станции ME1/1 предполагала прокладку кабелей и сервисных коммуникаций субдетекторов торцевой мюонной системы (HE, EE, SE) поверх установленных детекторов ME1/1. Для монтажа детекторов и доступа к ним во время обслуживания потребовалась разработка специальных треев, позволяющих проложить кабели и коммуникации вокруг слотов для установки камер ME1/1 [31, 62].

Доступ к детекторам ME1/1 для ремонта может быть осуществлен только тогда, когда торцевая часть установки CMS выдвинута, и камера ME1/1 извлечена из слота. Для отсоединения кабелей и газовых и водяных труб от детектора во время демонтажа разработана

коммутационная панель (ME1/1 PP) (рис. 19). На каждой части торцевой мюонной станции установлено по 18 панелей ME1/1 PP.

Представлена система охлаждения мюонной станции ME1/1. Один канал охлаждения [1] последовательно объединяет 2 камеры ME1/1 и соединён с общим коллектором деионизированной воды, расположенным на периферии диска YE1. Рабочее давление в системе охлаждения $P \sim 4$ бар. Температура воды внутри системы $T=19\pm 2^\circ\text{C}$. Система

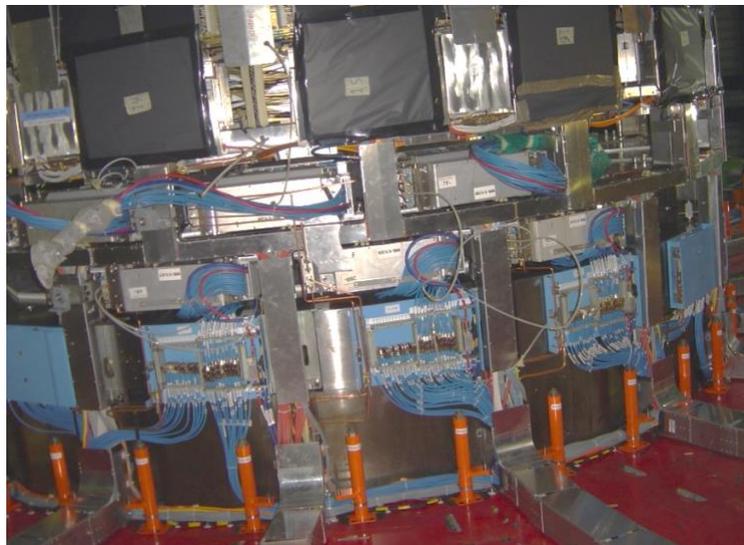


Рис. 19. Коммутационные панели камер (ME1/1 PP).

охлаждения ME1/1 состоит из 36 каналов (18 каналов на каждой торцевой части мюонной системы).

Представлена конструкция газовой системы мюонной станции ME 1/1 [1]. Один канал газовой системы обеспечивает подачу рабочей трёхкомпонентной газовой смеси $\text{Ar}+\text{CO}_2+\text{CF}_4$ (40%, 50%,10%) на четыре последовательно соединённые камеры ME1/1. На каждой стороне торцевой мюонной системы на железных дисках YE-1 и YE+1 размещено по одной стойке, к которой подключено 9 газовых каналов для подачи газовой смеси к 36 детекторам ME1/1.

Дано описание высоковольтной системы передней мюонной станции ME1/1, которая насчитывает 432 канала для питания 72 камер ME1/1. На каждую камеру подаётся 6 высоковольтных каналов для отдельного питания 6 плоскостей. Высоковольтная система выполнена на основе 28 канального источника высокого напряжения 1733BP производства фирмы CAEN, который обеспечивает следующие необходимые параметры:

- напряжение положительной полярности $1 \div 4000$ В;
- рабочий диапазон выходного тока $1 \div 200$ мкА;
- точность измерения тока 200 нА.

Система состоит из 2 крейтов SY1527 (CAEN), в которых расположены 16 модулей 1733BP. Стойка с крейтами и высоковольтными распределительными панелями расположена вне экспериментального зала на расстоянии около 100 м от детекторов.

Представлена система низковольтного питания электроники считывания мюонной станции ME1/1, которая является частью распределённой системы питания детекторов торцевой мюонной системы. Основой системы является источник питания MARATON производства фирмы Wiener. Источники MARATON разработаны для экспериментов на БАК для питания электроники с низким уровнем шума и обеспечивают ток потребления в диапазоне $10 \div 600$ А. Максимальная мощность источника 3.6 кВт. На первых дисках YE \pm 1 обеих торцевых системах расположено 16 источников MARATON, которые обеспечивают питание 216 детекторов торцевой мюонной системы, включая 72 камеры ME1/1, а также питание 24 периферийных крейта с электроникой. На вход модуля распределения низкого напряжения LVDB [1, 16, 24], расположенного на камере, приходит два отдельных канала

питания постоянного напряжения 7,5 В. Аналоговое напряжение для питания входных усилителей анодных и катодных плат и цифровое напряжение для питания цифровых микросхем. Модуль LVDB, вырабатывает необходимые напряжения питания для катодной и

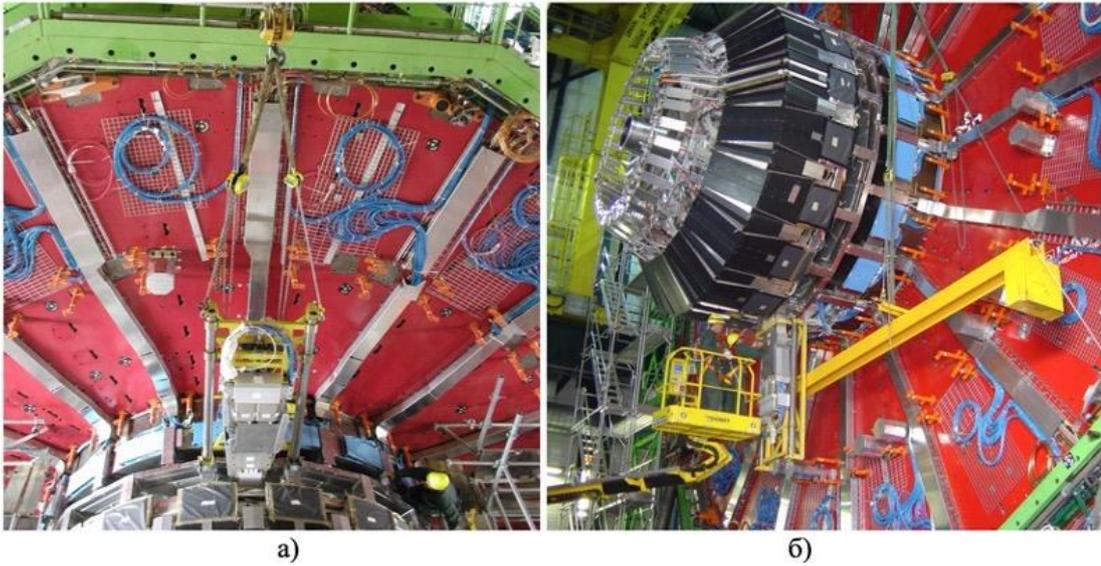


Рис. 20. Процесс установки камер в верхнюю часть (а) и в нижнюю часть (б) мюонной станции ME1/1.

анодной электроники, а также служит для контроля напряжений и токов. Суммарный ток, потребляемый модулем для питания всей электроники, размещённой на камере, составляет 9.7 А по цифровому и 3.1 А по аналоговому каналам.

Представлен процесс монтажа детекторов комплекса передней мюонной станции ME1/1 в наземном монтажном зале SX5 [31, 79], который проходил в 2 этапа по 2 месяца каждый. Для монтажа детекторов изготовлено и применено специальное оборудование. Для монтажа камер в верхнюю часть мюонной станции ME1/1 «загрузочная машина» с детектором подавалась краном вертикально (рис. 20 (а)). Для монтажа камер в нижнюю часть мюонной станции ME1/1 применена балка, с компенсирующим противовесом (рис. 20(б)).

После монтажа работоспособность всех детекторов проверена стандартным набором тестов.

Шестая глава посвящена проверке характеристик мюонной станции ME1/1 с космическими частицами в магнитном поле после сборки станции и в первый период набора экспериментальных данных на протон-протонных соударениях БАК.

Приведены основные результаты испытания передней мюонной станции ME1/1 в совместном тесте субдетекторов CMS с космическими частицами в реальном магнитном поле (МТСС). В сеансе по набору экспериментальной информации участвовали детекторы всех 4-х станций ME1/1, ME1/2, ME1/3, ME1/4, входящие в 60° сектор с одной (положительной) части

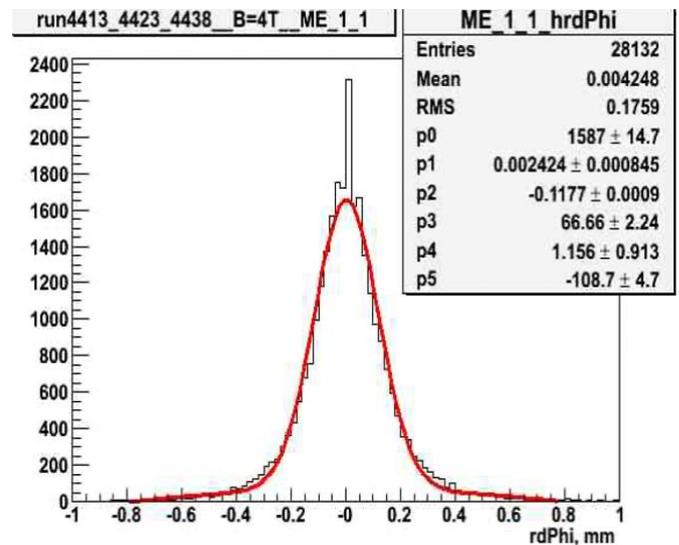


Рис.21. Пространственное разрешение одной плоскости камеры ME1/1 (среднее для 6 плоскостей).

установки, что эквивалентно 1/12 части мюонной системы экспериментальной установки CMS [19, 20].

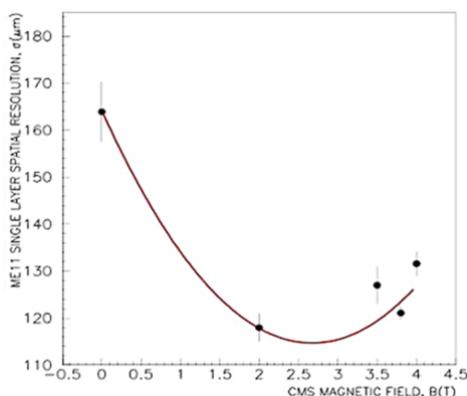


Рис. 22. Зависимость координатной точности плоскости камеры ME1/1 от величины магнитного поля.

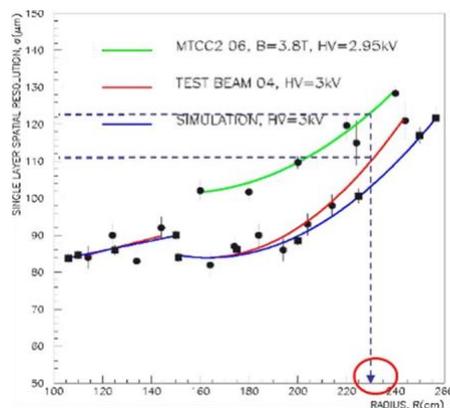


Рис. 23. Зависимость координатной точности плоскости камеры ME1/1 от радиуса.

Впервые при наличии магнитного поля рабочей величины экспериментально измерено пространственное разрешение детекторов передней станции ME1/1, средняя величина которого, вычисленная для 6 камер, составила $\sigma = 118$ мкм на одну плоскость (рис. 21), что соответствует проектному значению CMS (до 180 мкм). Анализ полученных экспериментальных данных сделан с использованием стандартного программного пакета CMS - CMSSW_1_2_2. Полученный результат хорошо совпадает с данными исследований в пучках заряженных частиц, анализ которых производился со специальным программным пакетом для исследования камер ME1/1 [38].

Измерена зависимость координатной точности камер ME1/1 от радиуса, при

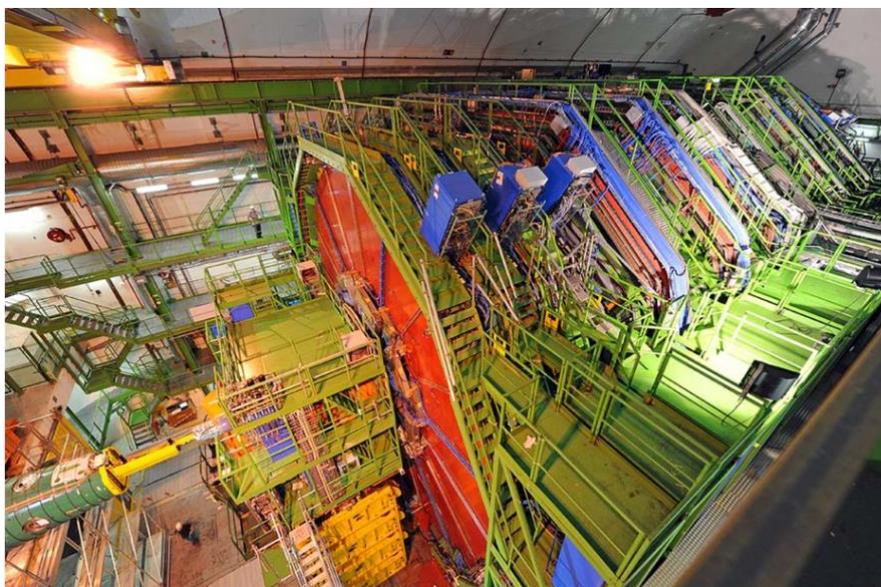


Рис. 24. CMS собран в подземном экспериментальном зале.

номинальной величине магнитного поля 3.8 Т (рис. 22). Отличие координатной точности на 10 мкм для МТСС обусловлено меньшим значением высокого напряжения на камере (2.95 кВ).

Изучена зависимость координатной точности одной плоскости ME1/1 камеры от величины магнитного поля при значении высокого напряжения 2.95 кВ (рис. 23).

Измеренная координатная точность плоскости удовлетворяет требованиям CMS, вплоть до максимально возможных значений магнитного поля. Наилучшее значение координатной точности получено при значении магнитного поля $B = 2.7$ Т.

После завершения сборки CMS в подземном экспериментальном зале UXC установка CMS перешла в состояние готовности к работе с пучком (рис. 24). Перед запуском установки характеристики камер ME1/1 проверены с космическими частицами при рабочем значении магнитного поля (тест CRAFT) [17, 22]. Аббревиатура «CRAFT» означает «Cosmic Rays At Four Tesla», т.е. набор данных с космическими частицами при рабочем значении магнитного поля 4 Т. Представлена зависимость пространственного разрешения детекторов мюонной станции ME±1/1b (верхняя часть камеры) от величины магнитного поля (рис. 25). Лучшее значение пространственного разрешения ME1/1 соответствует максимальному значению

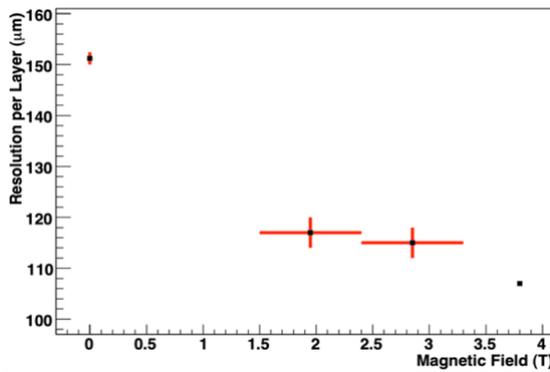


Рис. 25. Зависимость пространственного разрешения камеры ME±1/1b от величины магнитного поля.

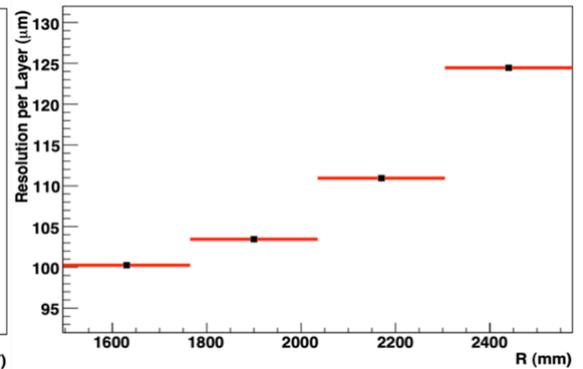


Рис. 26. Зависимость пространственного разрешения камеры ME±1/1b по радиусу.

магнитного поля, что подтверждает правильность выбора угла наклона проволочек ($\alpha=29^\circ$). Во всем диапазоне величин магнитного поля, измеренное значение пространственного разрешения соответствует условиям CMS для камер ME1/1 ($\sigma \leq 180$ мкм).

Экспериментально измерена зависимость пространственного разрешения камер по радиусу при рабочем значении магнитного поля. Пространственное разрешение камеры имеет наилучшее значение ~ 100 мкм вблизи линии пучка (рис. 26), где оно наиболее критично, и быстро растет с увеличением радиуса. Ухудшение разрешения объясняется увеличением ширины стрипа с ростом радиуса.

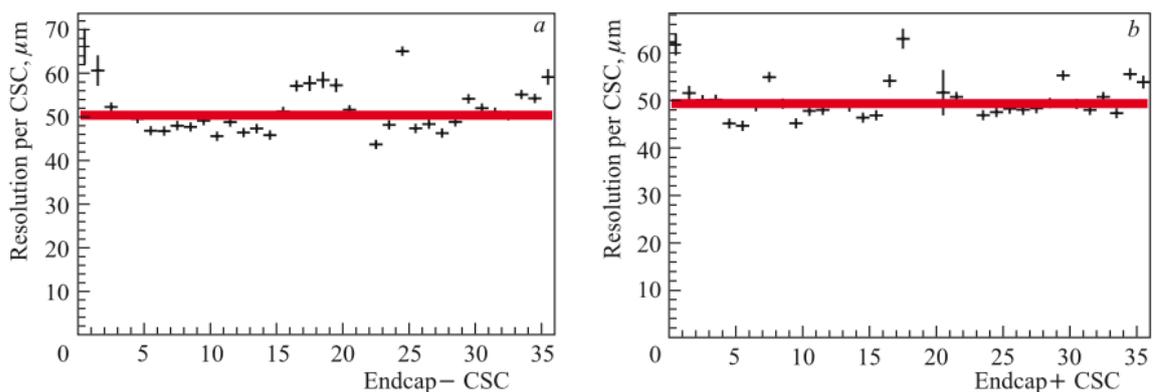


Рис. 27. Пространственное разрешение одного слоя камер ME1/1b для двух торцевых крышек мюонной системы.

Среднее значение пространственного разрешения камер ME1/1b для обеих торцевых частей мюонной станции (рис. 27) составляет ~ 50 мкм. Полученное значение лучше, чем условие CMS для пространственного разрешения ME1/1 камер ($\sigma = 75$ мкм).

Результаты, полученные в период сеанса CRAFT, показали готовность мюонной системы CMS, включая комплекс передней мюонной станции ME1/1, к работе с протон-протонными столкновениями на БАК.

Представлены характеристики мюонной системы в период физического запуска CMS и результаты первого набора экспериментальных данных с протон-протонными взаимодействиями БАК при энергии в системе центра масс $\sqrt{s} = 7$ ТэВ. Интегральная светимость, накопленная CMS за 1 период набора данных, составила 29.4 фб^{-1} . Значение пиковой светимости в конце сеанса составило $L = 7.7 \times 10^{33} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$. Эффективность регистрации событий во время первого периода набора данных составила $\varepsilon \sim 98.5 \%$.

Сделана оценка временного разрешения камер ME1/1. Сравнением калибровочных данных и реальных мюонных треков от столкновений были получены калибровочные значения отклонений относительно среднего значения времени срабатывания для каждой камеры. Эти отклонения учитывались во время реконструкции сегментов треков.

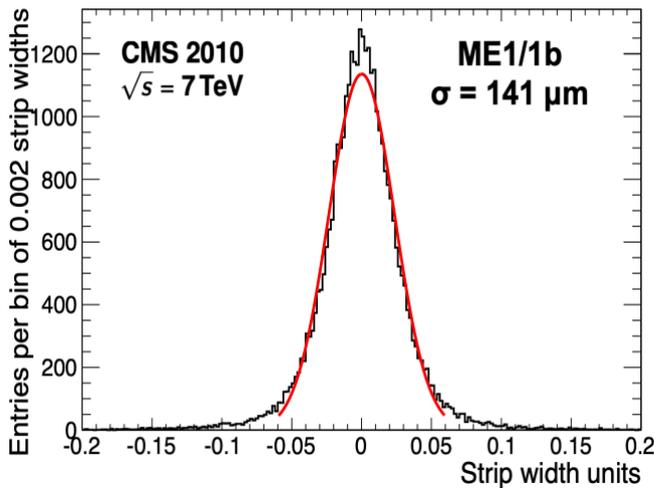


Рис. 29. Пространственное разрешение плоскости камеры ME1/1 в протон-протонных взаимодействиях с энергией в системе центра масс $\sqrt{s} = 7$ ТэВ.

Представлена роль комплекса торцевой мюонной станции ME1/1 CMS в открытии бозона Хиггса. В эксперименте CMS, в условиях конфигурации экспериментальной установки, приближенной к 4 π -геометрии, измеряются характеристики физических объектов (мюонов, электронов, фотонов и струй с импульсом до 1 ТэВ). В частности, детекторные системы CMS были оптимизированы для поиска бозона Хиггса.

Одним из основных или как говорят “золотых” каналов поиска бозона Хиггса, является его реакция распада на два Z-бозона с 4 лептонами в конечном состоянии:

$$H^0 \rightarrow ZZ^* \rightarrow 2l^+ 2l^- \text{ или } H^0 \rightarrow ZZ \rightarrow 2l^+ 2l^-.$$

Напрямую Z бозоны не могут быть зарегистрированы детекторами из-за чрезвычайно короткого времени жизни $T_Z \sim 10^{-25}$ секунды, однако, на выходе реакции распада могут быть

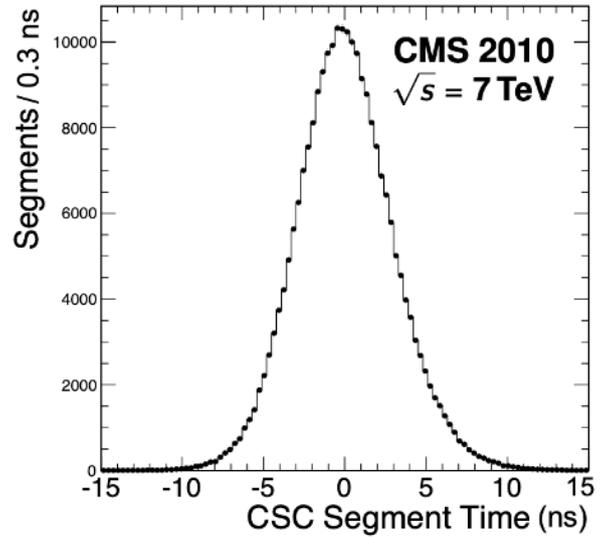


Рис. 28. Временное распределение сегментов треков в камере для мюонов с $P_T \geq 20 \text{ GeV}/c$.

Временное распределение сегментов треков в камере ME1/1 представлено на рисунке 28. Фитирование распределения функцией Гаусса дает величину среднеквадратичного отклонения $\sigma_t = 3$ нс, что соответствует требованиям CMS для временного разрешения детекторов мюонной станции ME1/1 [17, 23].

Впервые на БАК экспериментально измерено пространственное разрешение детекторов мюонной станции ME1/1 в протон-протонных взаимодействиях с энергией в системе центра масс $\sqrt{s} = 7$ ТэВ (рис. 29). Полученное значение координатного разрешения одной плоскости $\sigma_{пл} = 141 \text{ мкм}$ превосходит требование проекта CMS, которое для камер ME1/1 должно быть $< 180 \text{ мкм}$.

зарегистрированы мюоны. Для решения физической задачи идентификации мюонов в протон-протонных взаимодействиях на БАК необходимо иметь точные, быстродействующие и эффективные детекторы мюонной системы, трекера и электромагнитного калориметра.

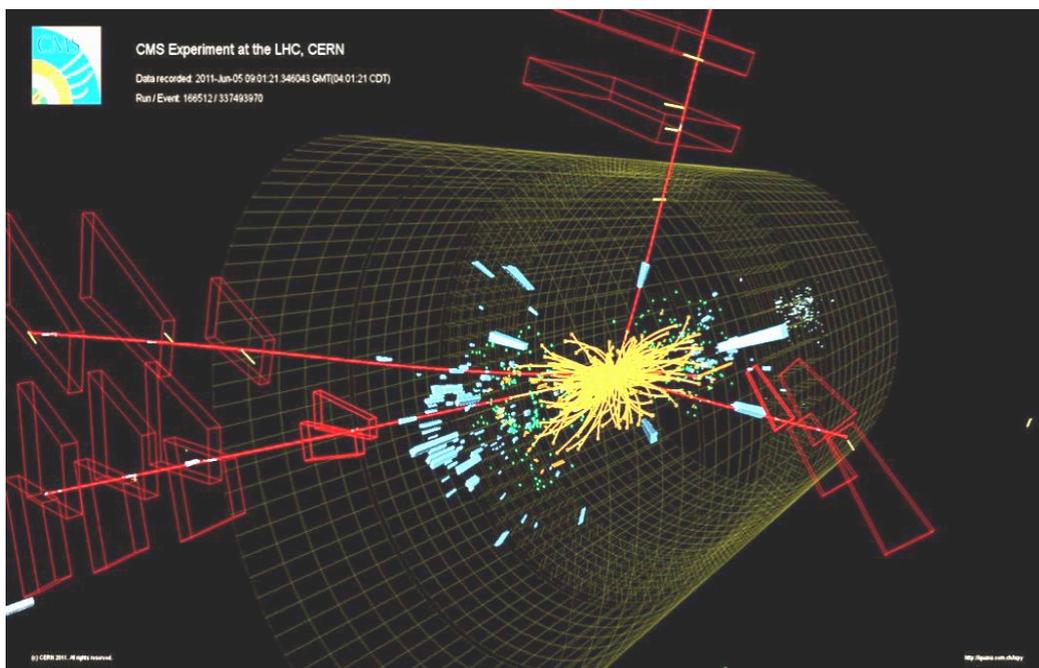


Рис. 30. Пример «золотого» события распада бозона Хиггса с 4-мя мюонами в конечном состоянии.

Детекторы мюонной системы CMS обеспечивают измерение поперечных импульсов мюонов и инвариантной массы пары мюонов с точностью $\sim 1\%$ (при $m_{\mu\mu} = 100 \text{ ГэВ}/c^2$) и эффективностью 70-90%. Подобные точности достигаются за счет прецизионных измерений координат трека мюона. Ключевую роль в этих измерениях играют детекторы комплекса передней мюонной станции ME1/1, которые имеют:

- наилучшее среди всех мюонных камер пространственное разрешение $\sigma \sim 75 \text{ мкм}$, что существенным образом влияет на точность восстановления координат трека мюона в мюонной системе;
- хорошее временное разрешение детекторов, эквивалентное $\sim 3 \text{ нс}$, которое обеспечивает эффективное триггерирование и точную временную привязку локального трека к времени происхождения события;
- максимально близкое расположение мюонной станции ME1/1 к точке взаимодействия пучков, которое обеспечивает сшивку частей трека, восстановленных в мюонной системе и трекаре, а также его экстраполяцию в точку взаимодействия.

Впервые событие парного рождения Z-бозонов было зарегистрировано 24 сентября 2010 г. Пример «золотого» события бозона Хиггса с 4-мя мюонами в конечном состоянии реакции распада показан на рисунке 30. Из рисунка видно, что 1 мюон зарегистрирован детекторами цилиндрической части и 3 мюона детекторами торцевой части мюонной системы CMS. Ближе к точке взаимодействия с обеих сторон видны детекторы мюонной станции ME1/1.

В седьмой главе представлена многоэтапная программа модернизации CMS, нацеленная на подготовку к работе в условиях высокой светимости БАК. В таблице 6. приведено сравнение некоторых ключевых параметров БАК: в расчетном режиме (LHC), в режиме повышенной и предельной светимости (HL-LHC), для протон-протонных взаимодействий [25]. Интегральная светимость коллайдера увеличится в десять раз по сравнению с исходным

расчетным значением. Множественность взаимодействий в одном пересечении пучков (пайлап) возрастёт почти в 5 раз, что накладывает дополнительные требования на быстродействие детекторов, электроники считывания, а также систем сбора и обработки данных.

В период набора экспериментальных данных «Фаза-1», который заканчивается в 2023 году, модернизация CMS нацелена на обеспечение эффективной работы установки в проектном режиме при работе БАК с полной энергией до $\sqrt{s} = 14$ ТэВ и светимостью $L=1 \div 2 \times 10^{34} \text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$ [23].

Таблица 6

Параметр	LHC проект	HL-LHC проект	HL-LHC предел
Пиковая светимость ($10^{34} \text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$)	1.0	5.0	7.5
Интегральная светимость (fb^{-1})	300	3000	4000
Пайлап	~30	~140	~200

Далее, начиная с 2023 года по 2026 год, запланирована длительная остановка (LS3) для модернизации БАК, которая обеспечит надёжную и эффективную работу экспериментальной установки в режиме высокой светимости до $L = 5 \times 10^{34} \text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$. Интегральная светимость БАК увеличится на порядок с 300fb^{-1} до 3000fb^{-1} . Период набора экспериментальных данных в режиме высокой светимости БАК «Фаза-2» продлится с 2026 года по 2038 год. Основной задачей модернизации установки CMS в этот период является обеспечение эффективной работы всех систем в условиях повышенной светимости БАК $> 5 \times 10^{34} \text{см}^{-2}\text{сек}^{-1}$.

Представлена мотивация модернизации комплекса передней мюонной станции и основные направления первого этапа модернизации в период (LS1) длительной технической остановки БАК 2012-2013 гг. [18, 24], которая включает модернизацию детекторов передней станции ME1/1 и оснащение их новой быстродействующей электроникой.

В результате модернизации устранено объединение стрипов 3 в 1 и восстановлен порядок считывания, при котором каждому стрипу соответствует свой канал считывания для этого на субкамере ME1/1(a) установлено 2 дополнительные карты считывания

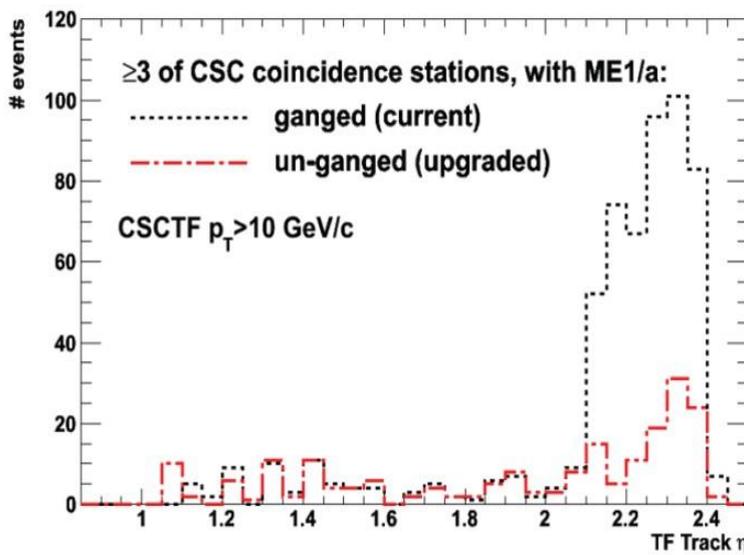


Рис.31. Возрастание времени занятости канала считывания информации при объединении 3-х стрипов.

информации со стрипов. Всего после модернизации на каждой камере ME1/1 установлено по семь 96 канальных цифровых карт считывания информации с катодных стрипов (DCFEB), позволяющих работать без мёртвого времени. Организовано считывание информации с катодной электроники по оптическому каналу, модернизирована триггерная электроника, расположенная на камере и в удаленных крейтах.

В результате модернизации более чем в 3 раза уменьшена шумовая нагрузка канала катодной электроники считывания (рис.31). В области больших нагрузок $2.1 < |\eta| < 2.4$ обеспечена эффективность восстановления координаты трека $> 96 \%$ и эффективность триггерирования $> 90 \%$.

Автором совместно с НЦФЧВЭ г. Минск разработаны платы распределения низкого напряжения, LVDB-7 [24], которые установлены на модернизированные камеры мюонной станции ME1/1. Все модернизированные электронные модули, включая LVDB-7, прошли проверку на радиационную стойкость для работы в условиях высокой светимости БАК (тест с интегральной дозой облучения > 30 крад).

Во втором периоде набора данных экспериментально измерено пространственное разрешение камеры ME1/1а $\sigma = 51$ мкм (рис. 32). Причина повышения точности восстановления пространственной координаты (в первом периоде $\sigma = 64$ мкм) определяется уменьшением входной емкости канала регистрации после модернизации камер.

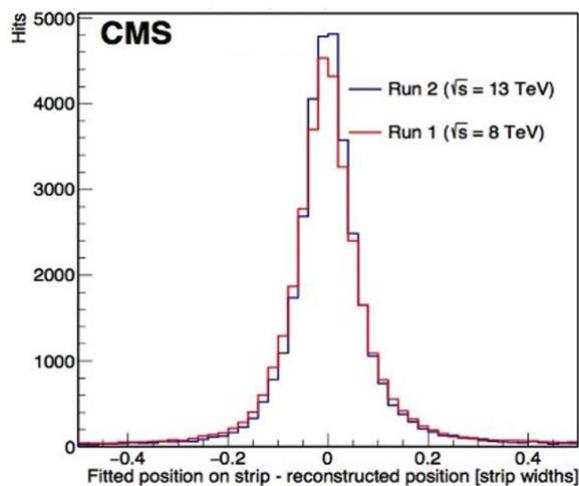


Рис. 32. Пространственное разрешение плоскости камеры ME-1/1а.

1 период набора данных (Run1): $\sigma = 64$ мкм.
2 период набора данных (Run2): $\sigma = 51$ мкм.

В Заключение сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1. Под руководством диссертанта создан и введён в эксплуатацию уникальный комплекс передней мюонной станции ME1/1 торцевой части установки Компактный мюонный соленоид на Большом адронном коллайдере. Конструкция детекторов мюонной станции ME1/1 оптимизирована для эффективной работы в неоднородном магнитном поле до 4 Т при фоновых нагрузках до 3 кГц/см².
2. Достигнуты рекордные параметры комплекса ME1/1:
 - точность реконструкции координаты мюона < 75 мкм;
 - эффективность реконструкции треков > 96 %;
 - временное разрешение ~ 3 нс;
 - эффективность определения временной привязки событий к моменту пересечения пучков > 99 %;
 - время идентификации локального заряженного трека < 50 нс.
3. Детекторы передней мюонной станции ME1/1 обеспечивают сшивку частей трека, восстановленных в мюонной и трекерной системах, и экстраполяцию трека в точку взаимодействия, что в определяющей степени способствует реализации программы физических исследований эксперимента CMS. Это достигнуто благодаря уникальным характеристикам и максимально близкому расположению комплекса передней мюонной станции ME1/1 к внутреннему трекеру.
4. В процессе создания комплекса передней мюонной станции с непосредственным участием автора диссертации впервые решены важные методические проблемы:
 - проведены комплексные методические исследования, результатом которых явилась разработка конструкции и технологии изготовления прецизионных камер с катодным считыванием информации для комплекса передней мюонной станции ME1/1, удовлетворяющих требуемым параметрам эксперимента CMS;
 - в ОИЯИ создан участок серийного изготовления камер с катодным считыванием информации, изготовлено 76 шестислойных камер для мюонной станции ME1/1;
 - произведён монтаж комплекса передней мюонной станции ME1/1 установки CMS, состоящий из 72 камер и систем, обеспечивающих их функционирование;
 - проведена экспериментальная проверка основных характеристик комплекса мюонной станции ME1/1 в реальном магнитном поле с помощью космических частиц, показано, что физические характеристики мюонной станции ME1/1 соответствуют проектным.
5. Под руководством автора успешно реализован первый этап плана модернизации комплекса передней мюонной станции ME1/1, нацеленный на обеспечение надёжной и

эффективной регистрации событий и триггерирования в области псевдобыстрот $2.1 < |\eta| < 2.4$, в режиме работы БАК с полной энергией в системе центра масс $\sqrt{s} = 14$ ТэВ и светимостью $L = 1 \div 2 \times 10^{34} \text{ см}^2\text{с}^{-1}$.

В результате модернизации в области больших загрузок камер ME1/1 ($2.1 < \eta < 2.4$):

- устранена неоднозначность определения координаты частицы и более чем в 3 раза уменьшена шумовая нагрузка на канал электроники считывания, что позволило обеспечить эффективность восстановления координаты трека >96 % и эффективность выработки триггера > 90 %;
- более чем на 20 % улучшено пространственное разрешение, значение которого составило 51 мкм.

На экспериментальной установке CMS, включающей комплекс передней мюонной станции ME1/1, коллаборацией CMS проведен ряд важных физических исследований, результатом которых стало открытие и изучение свойств новой частицы бозона Хиггса, что послужило очередным триумфом Стандартной модели (СМ) и началом беспрецедентно обширных поисков сигналов новой физики.

Диссертация основывается на следующих опубликованных работах:

1. G.L.Bayatian, V.Karjavine, et al., CMS Collaboration, CMS. The Muon Project Technical Design Report, CERN/LHCC 97-32 CMS TDR 3, pp. 1-441, 15 December 1997.
2. C.Albajar, V.Karjavine, et al., Electromagnetic secondaries in the detection of high energy muons, CERN-PPE 94-204, Geneva, pp. 1-20, 1994, Nucl.Inst. and Meth. A364, (1995) 473-487.
3. Belotelov, A. Golunov, I. Golutvin, V. Karjavin et al., Electromagnetic Secondaries and Punch-Through Effects in the CMS ME1/1, Physics of Particles and Nuclei Letters, Vol. 4, No. 4, JINR, Dubna, Russia, 2007, pp.343–349.
4. И.А.Голутвин, И.М.Граменицкий, А.В.Зарубин, В.Ю.Каржавин, и др., Временное разрешение камер с сегментированным катодом мюонной станции ME1/1 компактного мюонного соленоида и идентификация момента взаимодействия пучков коллайдера, Письма в ЭЧАЯ №4[107]-2001.
5. I.Golutvin, N.V.Gorbunov, V.Yu.Karjavin, V.S.Khabarov, G.V.Mescheriakov, P.V.Moissenz, S.A.Movchan et al., The rate capability of the CSC readout electronics, Particles and Nuclei, Letters, 2001, No.4 [107], 2001, pp.45-53.
6. К.А. Зубов, В.Ю. Каржавин, С.А. Мовчан и П.В. Мойсенз, Математическое обеспечение многопроводочной пропорциональной камеры с катодным считыванием информации, Сообщение ОИЯИ P10-99-118, Дубна, 1999.
7. I.Golutvin, V. Karjavin et al., ME1/1 prototype in the integrated test, CERN CMS TN 97-084, 1997.
8. И.А.Голутвин, Н.В.Горбунов, В.Ю.Каржавин, и др. Интегральная схема “КАТОД-1” для считывания информации со стрипов катодной стриповой камеры., Сообщение ОИЯИ, P13-2001-151.
9. И. А. Голутвин, Н.В. Горбунов, А.В. Зарубин, В. Ю. Каржавин, и др., Исследование радиационной стойкости интегральной схемы “Анод”., Сообщение ОИЯИ, P13-2001-152.
10. Yu. Erchov, V. Karjavin et al. Fabrication and test of the full-scale P3 prototype of the ME1/1 CSC CMS IN 1997/003, pp. 1-4, CERN, 1997.
11. Ю. В Ершов, В.Ю. Каржавин, и др. P3-полномасштабный прототип КСК ME1/1, Сообщение ОИЯИ E13-99-296, Дубна 1999.

12. Yu.V. Ershov, A. O. Golunov, I.A. Golutvin, N.V. Gorbunov, A.Yu. Kamenev, V.Yu. Karjavin et al. Cathode strip chamber for CMS ME1/1 encap muon station. (26). Письма в ЭЧАЯ. 2006 Т.3 №3 (132) 8с.
13. Ю. В Ершов, В.Ю. Каржавин, и др. Р4-предсерийный прототип КСК ME1/1., Сообщение ОИЯИ Е13-2000-26, Дубна 2000.
14. Y.Erchov, L.Glonti, I.Golutvin et al., Proceeding of ME1/1 Engineering Design Review. 1999-047, CMS Document, pp. 1-149, CERN, June 21-23, 1999.
15. I.Golutvin, V. Karjavin et al., Study of the Anode Self-trigger ability of the ME1/1 CMS Endcap Cathode Strip Chamber, Письма в ЭЧАЯ. 2007. Т.4, No3(139) С.428–437.
16. Yu. Erchov, V. Karjavin et al. ME1/1 Cathode Strip Chamber for CMS Experiment, Письма в ЭЧАЯ. 2009. Т.6, No4, С.566–571.
17. I. Golutvin, A. Yu. Kamenev, V. Yu. Karjavin, P. V. Moissenz, V. V. Palichik, V. V. Perelygin, S. E. Vassiliev, A. V. Zarubin. The spatial resolution of the CMS ME1/1 Muon Station Cathode Strip Chambers with CRAFT08 data. Письма в ЭЧАЯ. 2010. Т.7, No5(161), С.581–586.
18. В.Ю. Каржавин. Модернизация торцевой мюонной системы CMS. Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2018.Т. 49. ВЫП. 1. С. 91-100.
19. G.L.Bayatian, V.Karjavine, et al., CMS Collaboration, The CMS experiment at the CERN LHC. JINST 3 (2008) S08004. 154-160.
20. G.L.Bayatian, V.Karjavine, et al., CMS Collaboration. Performance of the CMS Cathode Strip Chambers with Cosmic Rays. JINST 5 (2010). pp.19-21.
21. R. Breedon, P.T. Cox, V. Karjavin, et al., Performance et al., Testing of the CMS Cathode Strip Chambers. CMS NOTE -2009/020. C10-21.
22. G.L.Bayatian, V.Karjavine, et al., CMS collaboration. Commissioning of the CMS experiment and the cosmic run at four Tesla. 2010 JINST 5 T03001
23. G.L.Bayatian, V.Karjavine, et al., CMS Collab. The Performance of the CMS Muon Detector in Proton-Proton Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV at the LHC. CMS-MUO-11-001, CERN-PH-EP-2013-072; JINST. 2013. V. 8. P.21-22.
24. CMS Collaboration. Technical Proposal for the Upgrade of the CMS Detector Through 2020. CERN/LHCC 2011-06 CMS UG-TP-1.
25. CMS Collaboration. The Phase-2 Upgrade of the CMS Muon Detectors. Technical Design Report. CERN/LHCC 2017-012 CMS-TDR-016 12 Sep. 2017.C 13-20.