

УТВЕРЖДАЮ

Директор Лаборатории физики высоких энергий

имени В. И. Векслера и А. М. Балдина

\_\_\_\_\_ В. Д. Кекелидзе

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 года

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Научно-технического совета

Лаборатории физики высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина

Объединенного института ядерных исследований

Диссертация «Создание экспериментального комплекса передней мюонной станции установки Компактный мюонный соленоид (CMS)» выполнена в Лаборатории физики высоких энергий имени В.И. Векслера и А. М. Балдина. В период подготовки диссертации соискатель Каржавин Владимир Юрьевич работал в Лаборатории физики высоких энергий имени В. И. Векслера и А. М. Балдина в должности начальника сектора в Научно-экспериментальном отделе физики на CMS.

Каржавин В.Ю. родился 28 июля 1951 года в г. Москва. В 1979 г. В. Ю. Каржавин закончил Московский ордена Ленина энергетический институт по специальности «Электронные приборы» с присвоением диплома инженера Г1-№745884. Решением Диссертационного совета Объединенного института ядерных исследований №03-2 от 24.10.2001 г. Каржавину Владимиру Юрьевичу присуждена ученая степень кандидата технических наук по специальности 01.04.01 - «приборы и методы экспериментальной физики» с присвоением диплома кандидата наук КТ №063441.

### **По итогам обсуждения принято следующее заключение:**

Диссертационная работа В. Ю. Каржавина посвящена созданию экспериментального комплекса передней мюонной станции установки Компактный мюонный соленоид (CMS). Работа проводилась в соответствии с проблемно-тематическим планом научно-исследовательских работ Лаборатории физики высоких энергий по теме 02-0-1083-2009/2019.

### **Актуальность.**

Актуальность работы не вызывает сомнений. Достаточно отметить, что итогом работы явилось создание важнейших элементов установки CMS, на которой был открыт бозон Хиггса на Большом адронном коллайдере (БАК) в Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН).

Компактный мюонный соленоид является одним из четырех экспериментов, работающих на Большом адронном коллайдере в ЦЕРН. Физическая установка CMS нацелена на обнаружение лептонов с большими поперечными импульсами, что

является одним из характерных параметров для поиска бозона Хиггса и суперсимметричных частиц. Интересующие события отбираются с помощью системы триггирования CMS и затем сохраняются для дальнейшего физического анализа. Важнейшей характеристикой мюонной системы является способность отделять реальные события от фоновых, с высокой точностью и эффективностью определять пространственную, временную координаты частиц и измерять их поперечный импульс ( $p_t$ ).

**Научная новизна диссертационного исследования** заключается в следующих результатах, полученных под руководством и при участии автора, впервые:

1. Разработан, создан и введен в эксплуатацию уникальный комплекс передней станции торцевой мюонной системы для крупнейшей в мире экспериментальной установки Компактный мюонный соленоид на Большом адронном коллайдере.
2. Создана уникальная электронная аппаратура для проведения систематических исследований физических характеристик прототипов с целью оптимизации конструкции, а также с целью проверки соответствия требованиям проекта CMS.
3. Разработаны, изготовлены и впервые применены в эксперименте CMS многослойные пропорциональные камеры с катодным считыванием, способные работать в магнитном поле до 4 Т, при повышенных фоновых нагрузках до 3 кГц/см<sup>2</sup> и обеспечивать пространственное разрешение  $\sigma \sim 75$  мкм и временное разрешение  $\sim 3$  нс.
4. Осуществлена сборка комплекса мюонной станции ME1/1 в экспериментальном зале CMS. Проведена экспериментальная проверка основных характеристик комплекса мюонной станции ME1/1 в реальном магнитном поле до 4 Т с помощью космических частиц. Показано, что физические характеристики мюонной станции ME1/1 полностью соответствуют проектным.
5. Успешно осуществлен физический запуск комплекса мюонной станции ME1/1 в составе эксперимента CMS. Впервые с протон-протонными взаимодействиями БАК измерены основные характеристики детекторов мюонной станции ME1/1: временное разрешение 3нс и пространственное разрешение 66 мкм, которые полностью удовлетворяют проектным условиям эксперимента CMS.
6. Успешно проведена модернизация детекторов и электроники считывания передней мюонной станции ME1/1, которая позволила существенно улучшить характеристики станции при работе с высокими нагрузками, в области псевдобыстрот  $2.1 < \eta < 2.4$ .

#### **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  $\sim 3$  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, а также электронная аппаратура, созданная для исследования и оптимизации характеристик детекторов, имеет важное практическое применение для разработки конструкции и технологии изготовления прецизионных камер с катодным считыванием информации.

Создание комплекса мюонной станции ME1/1, включая входящие в его состав подсистемы охлаждения электроники, подачи газовой смеси, высоковольтного и

низковольтного питания, имеет важное практическое значение для создания многоканальных экспериментальных установок.

**Научно-технический совет ЛФВЭ ОИЯИ отмечает следующие, наиболее важные, результаты диссертационной работы, в получение которых В. Ю. Каржавин внес определяющий вклад:**

1. Проведен цикл исследований пропорциональных камер с катодным считыванием информации, результатом которого явилась разработка конструкции и технологии изготовления прецизионных детекторов для комплекса передней станции торцевой мюонной системы установки CMS.
2. Создан и введен в эксплуатацию уникальный комплекс передней станции торцевой мюонной системы установки Компактный мюонный соленоид на Большом адронном коллайдере в ЦЕРН. При работе в сложных экспериментальных условиях (неоднородное аксиальное магнитное поле до 4Т, большие фоновые загрузки до 3 кГц/см<sup>2</sup>) детекторы комплекса обеспечивают эффективный отбор и восстановление треков, уникальное пространственное разрешение ~75 мкм и быстроедействие ~ 3 нс. В практике физического эксперимента не существовало аналогов такого детектора, удовлетворяющего совокупности требуемых параметров проекта CMS.
3. В ОИЯИ создан участок серийного изготовления многослойных пропорциональных камер с катодным считыванием, оснащенный необходимым оборудованием и системами контроля на всех этапах создания детекторов. Для передней мюонной станции ME1/1 эксперимента CMS изготовлено 76 камер.
4. Произведен монтаж комплекса передней мюонной станции торцевой мюонной системы установки CMS. Решены вопросы интеграции детекторов, сервисных систем и коммуникационных линий, соединяющих электронику, расположенную на камере, с системой сбора информации. Проверена работоспособность комплекса передней станции мюонной системы установки CMS.
5. Проведено экспериментальное исследование основных параметров мюонной станции после завершения монтажа установки CMS в реальном магнитном поле с помощью космических частиц. Показано, что физические характеристики мюонной станции соответствуют проектным условиям эксперимента CMS.
6. Успешно завершён первый этап набора данных эксперимента CMS. Анализ экспериментальной информации показал, что основные физические параметры комплекса мюонной станции соответствуют расчетным и удовлетворяют требованиям проекта CMS.
7. В период длительной технической остановки БАК 2012-2013 гг. успешно реализован первый этап плана модернизации комплекса передней мюонной станции, нацеленный на обеспечение надёжной и эффективной регистрации событий и триггирования в области псевдобыстрот  $2.1 < \eta < 2.4$ , включающий следующие основные направления:
  - оснащение станции новой электроникой на базе цифровых карт считывания информации с катодных стрипов (DCFEB), способных работать без мертвого времени;
  - модернизация нижней части детекторов передней мюонной станции (установка 2 дополнительных карт DCFEB), что позволило устранить неоднозначность определения координаты частицы в области больших значений псевдобыстрот  $2.1 < \eta < 2.4$ , более чем в 3 раза уменьшить шумовую нагрузку канала электроники считывания и обеспечить в области больших загрузок эффективность восстановления координаты трека >95% и эффективность триггирования >90%.

Более чем на 20% улучшено пространственное разрешение камер ME1/1a ( $\sigma \sim 51$  мкм).

**Достоверность** представленных в диссертации результатов подтверждается успешной работой установки CMS в течение длительного времени на Большом адронном коллайдере, результатом которой явилось открытие бозона Хиггса и получение ряда других значимых физических результатов.

#### **Апробация работы.**

Результаты исследований неоднократно докладывались на семинарах в 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-Ausse, 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. 3d 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".

По материалам диссертации опубликовано 25 работ, в том числе 13 работ в изданиях, рекомендованных ВАК для докторских диссертаций:

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. I. 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. A. 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-полномастбный прототип КСК ME1/1, Сообщение ОИЯИ E13-99-296, Дубна 1999.
12. Yu.V. Ershov, A. O. Golunov, I.A. Golutvin, N. V. Gorbunov, V. Yu. Karjavin, A. Yu. Kamenev, 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. P4-предсерийный прототип КСК ME1/1., Сообщение ОИЯИ E13-2000-26, 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.С 13-20.

**НТС считает**, что диссертационная работа В. Ю. Каржавина представляет собой законченное научное исследование, содержащее новые результаты, имеющие важное значение для развития ядерной физики и физики частиц. Главные результаты диссертации могут быть квалифицированы как значительный вклад в развитие фундаментальной науки и удовлетворяют требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней ВАК, а ее автор заслуживает присуждения степени доктора технических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики.

Диссертация «Создание экспериментального комплекса передней мюонной станции установки Компактный мюонный соленоид (CMS)» рекомендуется к защите на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики в диссертационном совете по ядерной физике ОИЯИ.02.01.2019 П при Лаборатория ядерных проблем им. В. П. Джелепова.

Заключение принято на заседании Научно-технического совета Лаборатории физики высоких энергий имени В. И. Векслера и А. М. Балдина Объединенного института ядерных исследований. Присутствовало на заседании ..... членов НТС ЛФВЭ из полного состава численностью 40 человек. Результаты голосования: «за» - ... чел., «против» - ... чел., «воздержалось» - ... чел., протокол № от 2020 г.

Заключение составил  
доктор физ.- мат. наук

И.А. Тяпкин

Председатель НТС ЛФВЭ  
доктор физ.- мат. наук

Е.А. Строковский

Ученый секретарь НТС ЛФВЭ  
кандидат физ.- мат. наук

С.П. Мерц