

МЮОННАЯ СИСТЕМА УСТАНОВКИ CMS И ОСОБЕННОСТИ ЕЕ РАБОТЫ В УСЛОВИЯХ HL-LHC

*В. В. Пальчик, В. В. Перелыгин**

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Представлена мюонная система установки CMS (ЦЕРН), в которой используются детекторы трех типов: дрейфовые трубки, резистивные плоские камеры и катодно-стриповые камеры. Приведены характеристики мюонной системы в период набора данных CMS на p - p -взаимодействиях в 2016–2018 гг. Представлены планы по развитию мюонной системы по проекту модернизации CMS «Фаза II». Обсуждаются проблемы замены парниковых газов, используемых в детекторах мюонной системы CMS, на газы с меньшим потенциалом глобального потепления. Приведены результаты исследования эффектов радиационного старения катодно-стриповых камер (CSC) на установке GIF++ (ЦЕРН). Исследуется возможность работы CSC с уменьшенным содержанием CF_4 в рабочей газовой смеси.

The muon system of the CMS facility (CERN) is presented, which uses detectors of three types: drift tubes, resistive plate chambers, and cathode-strip chambers. The characteristics of the muon system during the period of CMS data taking with p - p collisions in 2016–2018 are given. Plans for the development of the muon system under the Phase II CMS upgrade project are presented. The problems of replacing greenhouse gases used in CMS muon detectors with gases with a lower global warming potential are discussed. The results of studying the effects of radiation aging of cathode-strip chambers (CSC) at the GIF++ facility (CERN) are presented. The possibility of CSC operation with a reduced content of CF_4 in the working gas mixture is being investigated.

PACS: 95.55.Vj; 29.40.-n; 29.20.db

ВВЕДЕНИЕ

Детектор CMS [1] — многоцелевая установка, расположенная на Большом адронном коллайдере (БАК) в ЦЕРН и предназначенная для изучения p - p - и Pb-Pb-взаимодействий с целью проведения комплексных исследований в области физики элементарных частиц.

* E-mail: perel@mail.cern.ch

Мюонная система CMS (рис. 1) представляет из себя внешнюю систему координатных детекторов больших площадей, состоящую из двух основных частей — центральной (barrel) и пары торцевых (endcaps) [2]. Мюонная система позволяет регистрировать с высоким разрешением по массе бозон Хиггса в так называемой «золотой» моде распада, имеющей 4 мюона в конечном состоянии: $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\mu$ [3]. Мюонная система состоит из плоскостей детектирования (субкамер) общей чувствительной площадью около 25 000 м², поэтому для ее создания были выбраны производственные технологии, позволившие создать недорогие, прочные механически и надежные в работе мюонные камеры.

Основным детектором центральной мюонной системы являются дрейфовые трубки (drift tubes — DT) [2]. Центральный мюонный детектор CMS состоит из 4 станций, обозначенных на рис. 1 MB1, MB2, MB3 и MB4, образующих 5 концентрических цилиндров вокруг пучка (Wheel 0, Wheel±1, Wheel±2). Три внутренние станции имеют по 60 дрейфовых камер, а внешняя станция — 70. Общее количество каналов считывания — около 172 000. Камера состоит из 3 (или 2) супермодулей, каждый из которых содержит 4 слоя прямоугольных дрейфовых трубок, расположенных в шахматном порядке [1, 2]. Дрейфовая камера позволяет проводить измерение траектории частиц в радиально-азимутальной си-

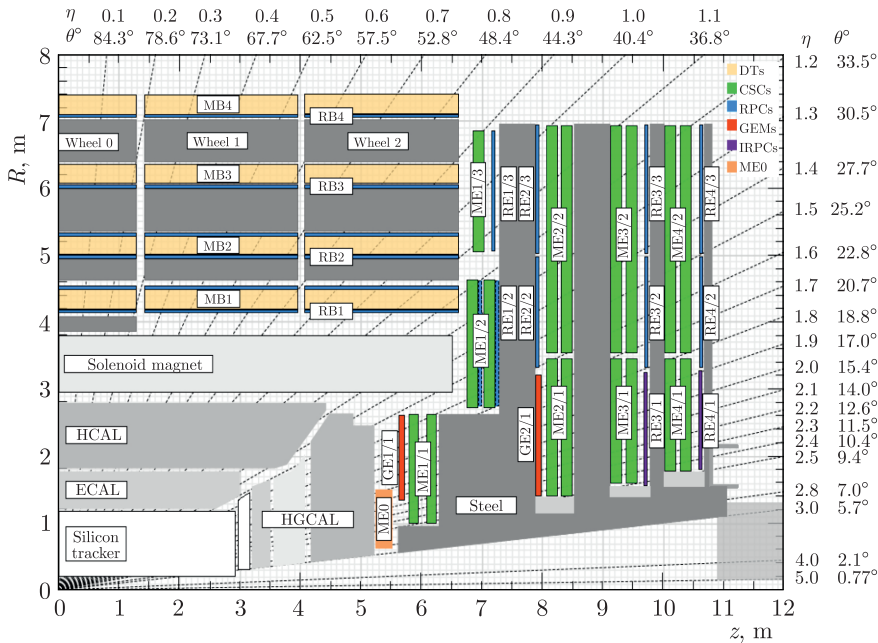


Рис. 1. Вертикальное сечение установки CMS (1/4 часть)

стеме координат $(R-\varphi)$ и системе координат $(R-z)$, перекрывая область псевдобыстрот $0 < |\eta| < 1,2$. Используется рабочая газовая смесь 85% Ag + 15% CO₂.

Шестислойные катодно-стриповые камеры (cathode strip chambers — CSC) были предложены в качестве основного детектора торцевой мюонной системы установки CMS [2]. CSC прецизионно определяют азимутальную координату трека мюона путем измерения центра тяжести распределения зарядов, наведенных на нескольких катодных стрипах, и измеряют радиальную координату трека с точностью до шага группы анодных проволочек. Данная система состоит из четырех мюонных станций, представляющих из себя кольцевые структуры, образованные 36 или 18 камерами (на рис. 1 обозначены ME x/y). Всего имеется 540 камер в обеих торцевых системах. Станции перекрывают область псевдобыстрот $0,9 < |\eta| < 2,4$. Камеры работают с трехкомпонентной газовой смесью Ag + CO₂ + CF₄ с процентным соотношением компонентов 40/50/10.

Переднее «кольцо» ME1/1 [4] расположено наиболее близко к точке взаимодействия (центральной области взаимодействия пучков) детектора CMS. Оно играет ключевую роль в эксперименте, так как обеспечивает согласование треков торцевой мюонной системы и внутреннего трекара. Моделирование показало [2], что камеры ME1/1 должны иметь существенно лучшее пространственное разрешение по сравнению с другими мюонными станциями — порядка 75 мкм. Отличительной особенностью ME1/1 является то, что каждая камера этой системы объединяет в себе две камеры: ME1/1a ($2,1 < |\eta| < 2,4$) и ME1/1b ($1,6 < |\eta| < 2,1$). Фактически ME1/1 является внутренним детектором CMS, так как располагается внутри сверхпроводящего соленоида установки и находится ближе других колец первой станции к точке взаимодействия. Изложенное выше объясняет, почему ME1/1 принято считать отдельной станцией.

Резистивные плоские камеры (resistive plate chambers — RPC) представляют собой газовые параллельно-пластинчатые детекторы, работающие в лавинном режиме, которые обладают высоким временным разрешением, сравнимым с разрешением сцинтилляторов. В установке CMS RPC используются для выработки триггера первого уровня в центральной части мюонной системы (обозначены на рис. 1 RB1–4) и в дополнение к станциям ME в торцевой системе (RE x/y). В CMS камеры RPC состоят из двух рабочих объемов с общими считывающими стрипами [1, 2]. В центральной части имеется 480 камер, а в торцевой — 216. RE3/1 и RE4/1 в настоящее время отсутствуют, их установка в рамках программы «Фаза II» модернизации CMS предполагается в 2025 г. Камеры работают с трехкомпонентной негорючей газовой смесью 96,2% R134a (C₂H₂F₄), 3,5% iC₄H₁₀ и 0,3% SF₆.

1. МЮОННАЯ СИСТЕМА ВО ВТОРОЙ ПЕРИОД НАБОРА ДАННЫХ CMS (2015–2018 гг.)

Характеристики мюонного детектора CMS были изучены с использованием данных протон-протонных столкновений при энергии в системе центра масс $\sqrt{s} = 13$ ТэВ во время второго периода набора данных CMS в 2015–2018 гг. Исследования показали, что пространственное разрешение всех мюонных детекторов достигает или превышает величины, указанные в мюонном Техническом проекте [2], а эффективность реконструкции и идентификации мюонов превышает 96% [5].

Результаты исследования пространственного разрешения катодно-стриповых камер на протон-протонных столкновениях представлены на рис. 2 и в таблице. Для определения координаты трека частицы в субкамере по величинам наведенных зарядов в стрипах, составляющих кластер, используется функция Гатти [6]. По найденным в шести субкамерах координатам трека методом наименьших квадратов проводится прямая (трек-сегмент). Методика вычисления величины пространственного разрешения в катодно-стриповых камерах изложена подробно в [7, 8]. Самым высоким пространственным разрешением обладают камеры мюонной станции ME1/1 (46–53 мкм).

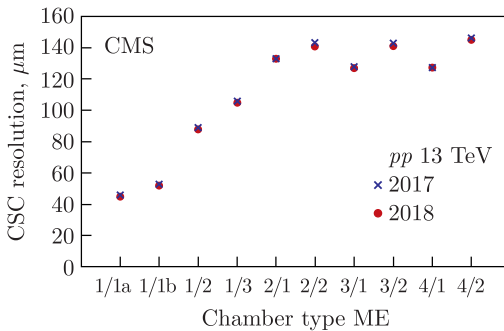


Рис. 2. Пространственное разрешение мюонных станций ME в период набора данных CMS в p - p -столкновениях в 2017–2018 гг.

Пространственное разрешение мюонных станций ME (в микрометрах) (данные для рис. 2)

Станция	2017	2018
ME1/1a	46	45
ME1/1b	53	52
ME1/2	89	88
ME1/3	106	105
ME2/1	133	133
ME3/1	128	127
ME4/1	127	127
ME2/2	143	141
ME3/2	143	141
ME4/2	146	145

2. РАЗВИТИЕ МЮОННОЙ СИСТЕМЫ В РАМКАХ ПРОГРАММЫ МОДЕРНИЗАЦИИ CMS «ФАЗА II»

Большая часть торцевой мюонной системы была установлена в 2007 г., в то время как камеры четвертого диска (ME4/2, RE4/2 и RE4/3) установлены в период первой остановки БАК в 2014 г. Мюонная система CMS была разработана для БАК с проектной светимостью до 10^{34} Гц/см² в точке взаимодействия пучков. Для работы в условиях

HL-LHC необходима модернизация многих компонентов системы. Основными факторами, которые необходимо при этом учитывать, являются более высокая мгновенная и интегральная светимости, возможная деградация детекторов в течение длительного периода набора данных, а также изменения в триггере первого уровня L1. Таким образом, программа модернизации мюонной системы «Фаза II» включает в себя создание как новой электроники считывания, так и новых детекторов. В период второй остановки БАК в 2019–2020 гг. 180 камер внутренних колец CSC $ME_{x/1}$: $ME1/1$, $ME2/1$, $ME3/1$ и $ME4/1$ (см. рис. 1) — были извлечены из детектора CMS для замены старой катодной камерной электроники на новую, обладающую большим быстродействием. Все камеры были вновь установлены в CMS, интегрированы в мюонную систему и прошли тестирование на космических лучах.

В рамках программы «Фаза II» в детектор CMS предполагается также установить дополнительные мюонные детекторы в области малых углов $1,6 < |\eta| < 2,8$ [9]. В их число входят 72 камеры, произведенные по технологии iRPC для станций $RE3/1$ и $RE4/1$. Данные камеры отличаются от существующих $RE_{x/y}$ более высоким пространственным и временным разрешениями. Камеры-демонстраторы были установлены в детектор в 2021 г., а установка обоих колец запланирована на период остановки БАК в 2024–2025 гг. Также программа «Фаза II» предусматривает установку трех новых станций: $ME0$, $GE1/1$ и $GE2/1$, состоящих из детекторов, изготовленных по технологии трехслойных GEM [10]:

- станция $GE1/1$ (система из 144 камер), перекрывающая область псевдобыстрот $1,6 < |\eta| < 2,2$, была установлена в торцевой части установки CMS в 2020 г.;

- станция $GE2/1$ — 72 камеры, спроектированные по технологии, аналогичной $GE1/1$, находящиеся в стадии производства, а их установка планируется в период остановки БАК в 2026–2027 гг.; к настоящему времени в детектор установлена камера-демонстратор;

- $ME0$ — станция в области псевдобыстрот $2,0 < |\eta| < 2,8$, состоящая из 216 камер и находящаяся в стадии производства прототипов; установка $ME0$ запланирована во время третьей длительной остановки БАК в 2027 г.

На период запуска HL-LHC мюонная система установки CMS будет состоять из координатных детекторов, произведенных с использованием пяти различных технологий.

3. ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ МЮОННОЙ СИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ HL-LHC

3.1. Увеличение фоновых загрузок и эффект радиационного старения координатных детекторов. Увеличение светимости БАК в результате его модернизации в коллайдер высокой светимости HL-LHC

и модернизация торцевой части установки CMS по проекту «Фаза II» предположительно приведут к десятикратному росту фоновой загрузки в некоторых газовых мюонных детекторах. В связи с этим возникает необходимость изучения характеристик детекторов в присутствии высокого фона, а также следует изучить возможные эффекты радиационного старения их материалов и рабочих газовых смесей. Для выполнения этих задач в 2015 г. была спроектирована и построена новая установка гамма-облучения (GIF++) в северной зоне выведенных пучков ускорителя SPS ЦЕРН [11]. Установка оснащена источником фотонов ^{137}Cs с энергией 662 кэВ активностью 14 ТБк (рис. 3). Имеются два конуса облучения: вдоль оси пучка мюонов и навстречу пучку с угловой апертурой $\pm 37^\circ$. Поглощенная доза в воздухе может достигать 2,2 Гр/ч непосредственно перед облучателем. Различные комбинации поглощающих фильтров позволяют ослаблять поток гамма-квантов с фактором поглощения 1–46400.

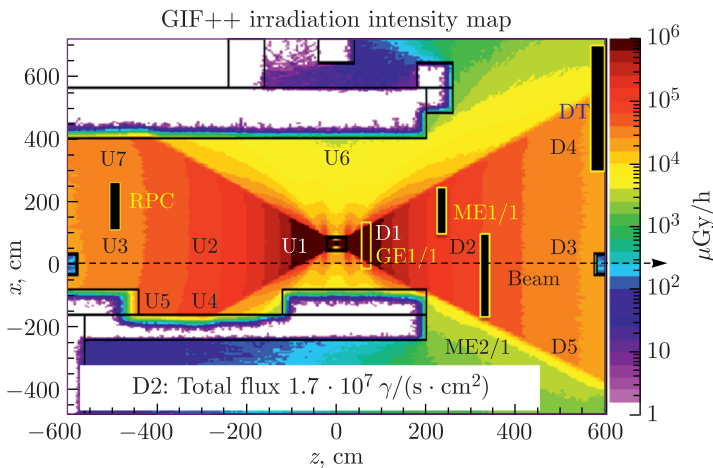


Рис. 3. Карта интенсивности радиационного поля источника ^{137}Cs установки GIF++ [11]. Указаны позиции детекторов, расположенных в зоне облучения (CSC, DT, RPC и GEM)

3.2. Ограничение на использование парниковых газов. Европейская комиссия приняла регламент, ограничивающий количественно продажу фторированных парниковых газов (F-газов). Предполагается поэтапное сокращение их использования, поэтому в 2030 г. объем их продаж должен составить одну пятую от продаж 2014 г. Мюонные координатные системы CSC и RPC используют ряд парниковых газов, таких как CF_4 , $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4$ и SF_6 . Флюорокарбоны используются в газовых смесях координатных детекторов как гасящие или электроотрицательные добавки и для предотвращения процессов старения. Программа исследо-

ваний в области уменьшения использования парниковых газов в рабочих газовых смесях установки CMS развивается в трех направлениях.

1. Поиск газов с низким потенциалом глобального потепления, которые могут использоваться в газовых смесях вместо упомянутых выше газов. К настоящему времени имеется как минимум один такой кандидат — HFO-1234ze ($C_3H_2F_4$), с которым проводятся методические исследования.

2. Изучение возможности использования имеющихся газовых смесей с пониженным содержанием компонентов с высоким потенциалом глобального потепления. Ниже представлены результаты работ, которые проводятся с CSC. Изучаются также эффекты старения для подобных смесей.

3. Минимизация выброса CF_4 путем создания системы эффективной регенерации этого газа — извлечение его из отработанной смеси и повторное использование в рабочей газовой смеси. К настоящему времени эффективность регенерации CF_4 достигает 65–70 %. Проводится изучение характеристик CSC, работающих с использованием регенерированного газа, и планируются тесты для изучения эффектов старения.

4. ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТОВ РАДИАЦИОННОГО СТАРЕНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИК КАТОДНО-СТРИПОВЫХ КАМЕР В УСЛОВИЯХ РАБОТЫ HL-LHC

Для изучения эффектов радиационного старения были выбраны две катодно-стриповые камеры, принадлежащие двум различным мюонным станциям — ME1/1 и ME2/1. Эти камеры имеют наибольшую фоновую загрузку в мюонной системе CMS. На рис. 3 показано их расположение на площадке GIF++ в режиме облучения источником ^{137}Cs . В каждой из двух камер исследовались четыре внутренних слоя (субкамеры), на которые подавалось рабочее напряжение в процессе облучения, в то время как две внешние субкамеры являлись мониторинговыми и на них напряжение не подавалось. Для координатных проволочных детекторов в качестве аналога величины поглощенной дозы использовалась величина заряда, выделившегося в зазоре анод–катод на сантиметр длины анодной проволоки (Кл/см). Камеры продувались трехкомпонентной рабочей газовой смесью на основе аргона: $Ar + CO_2 + CF_4$ с процентным соотношением компонентов 40/50/10 в режиме «замкнутой петли» с добавлением 10 % свежей смеси в соответствии с режимом работы газовой системы CSC на CMS [12]. Согласно оценкам, для существующей ныне конструкции торцевой части установки CMS при работе в условиях HL-LHC в течение 10 лет заряд, выделившийся на единицу длины анодной проволоки ME1/1, составит приблизительно 110 мКл/см [9].

Изучение пространственного разрешения CSC проводилось в пучках мюонов, при этом источник ^{137}Cs с помощью набора фильтров имитировал фон установки CMS от *pp*-столкновений в условиях работы

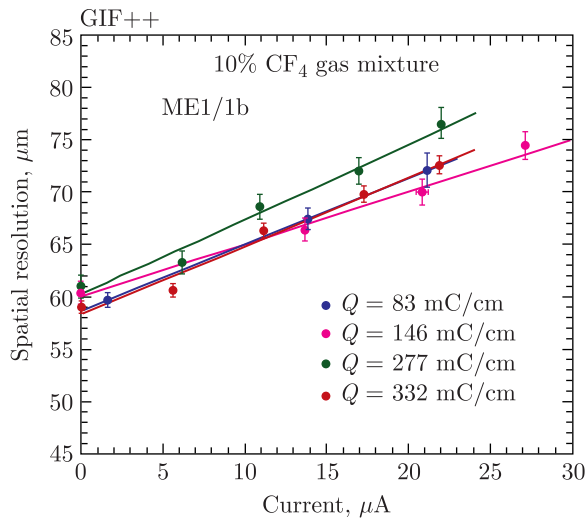


Рис. 4. Пространственное разрешение камеры ME1/1b, полученное в мюонном пучке на установке GIF++, в зависимости от средней величины тока в субкамере. Q — величина накопленного заряда (мКл/см)

HL-LHC. На рис. 4 [13] представлено пространственное разрешение камеры ME1/1b, полученное в этих тестах, в зависимости от средней величины тока в субкамере. Данные приведены для различных величин накопленного заряда Q (мКл/см). Показаны статистические погрешности. Систематические погрешности, связанные с изменением условий тестового пучка, оцениваются в ~ 2 мкм. Точки с нулевыми токами соответствуют измерениям с выключенным источником. Видно, что ухудшения разрешения не наблюдается даже при заряде 332 мКл/см для ME1/1, что соответствует трехкратной величине накопленного заряда в условиях HL-LHC.

Как было отмечено выше, использование парниковых газов в научных экспериментах будет значительно сокращено в ближайшем будущем. По этой причине была проведена вторая серия облучения камеры ME1/1 на установке GIF++ с газовой смесью с пониженным содержанием CF_4 : Ar (40%) + CO_2 (58%) + CF_4 (2%). С этой новой газовой смесью рабочие характеристики камеры не должны измениться, но уменьшение количества CF_4 в смеси может привести к значительно более быстрому проявлению эффекта старения в камере по мере накопления заряда Q . Предварительно был проведен тестовый сеанс для сравнения характеристик камеры с рабочей и новой газовыми смесями. Результаты приведены на рис. 5. Видно, что зависимость пространственного разрешения ME1/1b от интенсивности источника (тока в субкамере) идентична для обеих газовых смесей. Незначительное смещение зависимостей (на $\sim 2\%$) мо-

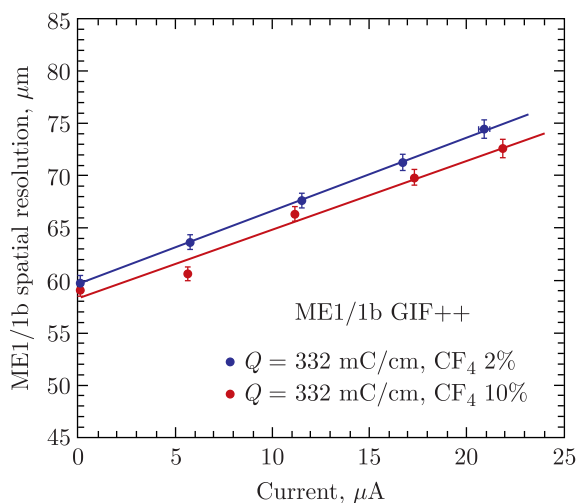


Рис. 5. Пространственное разрешение камеры ME1/1b в зависимости от средней величины тока в субкамере, измеренное для двух рабочих газовых смесей с различным содержанием CF_4 — 2 и 10%

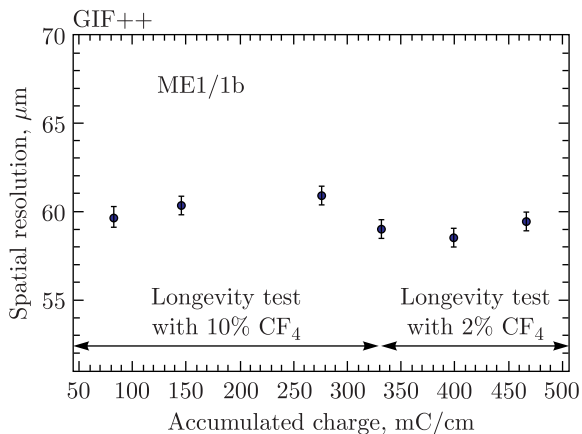


Рис. 6. Пространственное разрешение ME1/1b, измеренное в пучке мюонов на установке GIF++ в период облучения камеры с рабочей газовой смесью, содержащей 10% CF_4 (данные отложены до величины накопленного заряда 332 мКл/см включительно), и в период облучения камеры с газовой смесью, содержащей 2% CF_4 (выше 332 мКл/см)

жет быть объяснено особенностями работы газосмесительной системы, при этом сдвиг находится в пределах статистических погрешностей измерений.

По мере накопления заряда с новой газовой смесью проводились периодические тесты камеры ME1/1 в пучках мюонов. На рис.6 представлены результаты измерения пространственного разрешения камеры, полученные в пучке мюонов при отсутствии облучения источником в периоды тестов с двумя типами газовых смесей. Следует отметить, что для корректного сравнения результатов при проведении измерений всегда использовалась одна и та же газовая смесь — Ar (40%) + CO₂ (50%) + CF₄ (10%). Ухудшения пространственного разрешения камеры ME1/1 не наблюдается вплоть до величины накопленного заряда 467 мКл/см (в 4 раза больше, чем ожидается в течение всего срока работы HL-LHC).

В данном исследовании величина накопленного заряда превосходит величину 0,3–0,4 Кл/см, достигнутую ранее в аналогичных тестах CSC, проведенных на установке GIF [14].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлена мюонная система установки CMS. Рассмотрены особенности работы детекторов различных типов и планы по развитию мюонной системы по проекту «Фаза II». Приведены характеристики торцевой мюонной системы в период работы CMS в 2016–2018 гг. Актуальной задачей является необходимость замены парниковых газов, использующихся рядом мюонных координатных детекторов, таких как CF₄, R134a (C₂H₂F₄) и SF₆, на другие, обладающие низким потенциалом глобального потепления, или сокращение их количества в составе рабочих газовых смесей.

Увеличение светимости БАК в результате его модернизации в коллайдер высокой светимости HL-LHC приведет к значительному росту фоновой загрузки в газовых мюонных детекторах. На установке GIF++ (ЦЕРН) проводится изучение характеристик детекторов мюонной системы в присутствии высокого фона, исследование эффектов радиационного старения детекторов, а также поиск новых рабочих газовых смесей, исключающих или минимизирующих использование парниковых газов. Приведены результаты исследования эффектов радиационного старения катодно-стриповых камер на установке GIF++. Для камеры ME1/1 не наблюдается деградации пространственного разрешения вплоть до накопленного заряда на единицу длины анодной проволоки 467 мКл/см. Показано, что CSC способны работать в условиях HL-LHC без значительного ухудшения характеристик и появления эффектов старения. Проводятся тесты CSC с уменьшенным содержанием CF₄ в рабочей газовой смеси.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *CMS Collab.* The CMS Experiment at the CERN LHC // J. Instrum. 2008. V. 3. P. S08004.
2. *CMS Collab.* The Muon Project. Technical Design Report. CERN/LHCC 97-32, CMS TDR 3. 1997.

3. *CMS Collab.* Observation of a New Boson at a Mass of 125 GeV with the CMS Experiment at the LHC // *Phys. Lett. B.* 2012. V. 716. P. 30–61.
4. *Erchov Yu. V. et al.* Cathode Strip Chamber for CMS ME1/1 Endcap Muon Station // *Письма в ЭЧАЯ.* 2006. Т. 3, №3(132). С. 73–80.
5. *CMS Collab.* Performance of the CMS Muon Detector and Muon Reconstruction with Proton–Proton Collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV // *J. Instrum.* 2018. V. 13. P06015.
6. *Gatti E. et al.* Optimum Geometry for Strip Cathodes or Grids in MWPC for Avalanche Localization along the Anode Wires // *Nucl. Instr. Meth.* 1979. V. 163. P. 83–92.
7. *Golutvin I. A. et al.* The Spatial Resolution of the CMS ME1/1 Muon Station Cathode Strip Chambers with CRAFT08 Data // *Письма в ЭЧАЯ.* 2010. Т. 7, №5(161). С. 581–586.
8. *CMS Collab.* Performance of the CMS Cathode Strip Chambers with Cosmic Rays // *J. Instrum.* 2010. V. 5. P. T03018.
9. *Sirunyan A. M. et al.* The Phase-2 Upgrade of the CMS Muon Detectors Technical Design Report. CERN-LHCC-2017-012, CMS-TDR-016. 2017.
10. *CMS Collab.* CMS Technical Design Report for the Muon Endcap GEM Upgrade. CERN-LHCC-2015-012, CMS-TDR-013. 2015.
11. *Pfeiffer D. et al.* The Radiation Field in the Gamma Irradiation Facility GIF++ at CERN // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2017. V. 866. P. 91–103.
12. *Bosteels M. et al.* CMS Gas System Proposal. CMS IN 1999/018.
13. *CMS Collab.* The Evolution of the CMS Detector for CERN LHC Run-3. CMS Paper PRF-21-001; *J. Instrum.* (submitted).
14. *Acosta D. et al.* Aging Tests of Full-Scale CMS Muon Cathode Strip Chambers // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2003. V. 515. P. 226–233.