

МОДЕРНИЗАЦИЯ АДРОННОЙ КАЛОРИМЕТРИИ CMS НА LHC

П. Д. Бунин * от имени коллаборации CMS

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Представлен обзор основных направлений по развитию и модернизации систем адронных калориметров (HCAL) эксперимента CMS на Большом адронном коллайдере (LHC). Обсуждаются результаты модернизации HCAL, полученные в периоды первой и второй длительной остановки LHC (LS1 — 2013–2014 гг. и LS2 — 2019–2021 гг.), и ближайшие планы по модернизации в рамках программы «Фаза 2» в период третьей длительной остановки LHC (LS3 — 2026–2028 гг.).

The main goals and tasks for the development and modernization of the hadron system (HCAL) of the CMS experiment on the Large Hadron Collider (LHC) are presented. The results and plans of the upgrade of HCAL CMS during the LHC Long Shutdown-1 and Long Shutdown-2 (LS1: 2013–2014 and LS2: 2019–2021) as well as under Phase-2 Upgrade programme during the LHC Long Shutdown-3 (LS3: 2026–2028) are shown.

PACS: 29.40.Vj

ВВЕДЕНИЕ

Многоцелевая установка «Компактный мюонный соленоид» (CMS) [1] предназначена для изучения pp -взаимодействий на Большом адронном коллайдере (LHC) с целью проведения комплексных исследований в области физики элементарных частиц для изучения фундаментальных законов Природы. Среди намеченных первоочередных задач эксперимента — подтверждение одного из предлагаемых механизмов генерации масс элементарных частиц (исследование свойств открытого в 2012 г. бозона Хиггса и поиск новых скалярных частиц) и поиск сигналов физики за рамками Стандартной модели взаимодействия элементарных частиц.

Установка CMS имеет цилиндрическую симметричную относительно точки взаимодействия сталкивающихся пучков протонов структуру. В центре установки находится трековая система, состоящая из пиксельного и кремниевого полоскового детекторов. За трекерной частью расположены калориметры — электромагнитный и адронный. Адронный калориметр CMS (рис. 1) состоит из центральной (НВ, область псевдобыстрот

* E-mail: bunin@cern.ch

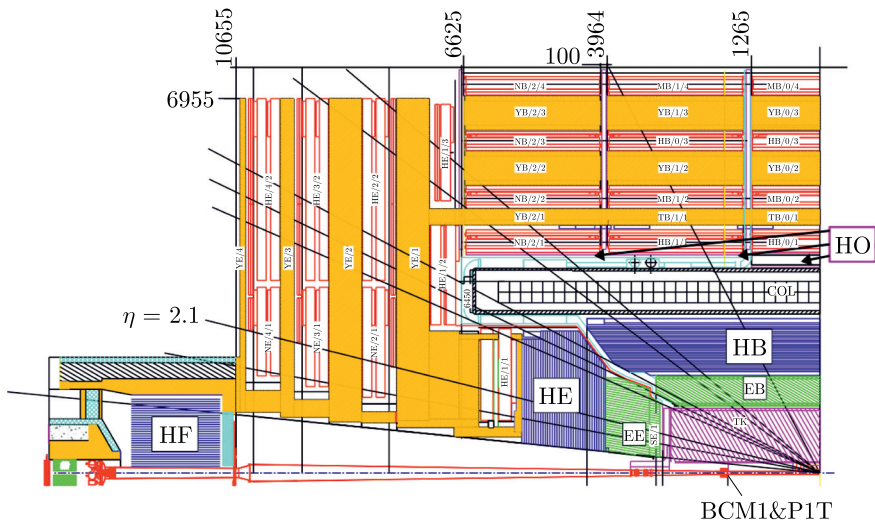


Рис. 1. Схема организации адронной калориметрии CMS

$0 < |\eta| < 1,4$), внешней (НО, $0 < |\eta| < 1,2$), торцевой (НЕ, $1,3 < |\eta| < 3$) и передней (HF, $3 < |\eta| < 5,2$) секций. HB- и HE-калориметры помещены внутрь сверхпроводящего магнита, создающего магнитное поле величиной 3,8 Тл. Снаружи магнита расположены мюонные детекторы, которые находятся в поле соленоида [4].

Торцевые и центральные калориметры [2] включают в себя по 36 отдельных секций по 10° каждая. В свою очередь, каждая секция состоит из полосок латуни, выступающих в роли абсорбера, и ячеек пластического сцинтиллятора с общим числом 16 тыс. каналов считывания. Внешний калориметр представляет собой 36 пластин сцинтиллятора, расположенного между внешней поверхностью соленоида и центральными мюонными камерами. Принцип работы центральных, торцевых и внешних калориметров идентичен: световые сигналы от сцинтилляторов считываются светопреобразующими волокнами, а затем по оптическим волокнам передаются фотодетекторам, в качестве которых до модернизации («Фаза 1», 2017–2019 гг.) использовались гибридные фотодиоды (HPD), а в настоящее время — кремниевые фотоумножители (SiPM). Ввиду того, что передние адронные калориметры расположены на больших углах псевдобыстрот, а следовательно, находятся в зоне наивысших радиационных нагрузок, в качестве активной части в них используются кварцевые волокна, проведенные вдоль железных пластин-абсорберов. В качестве фотоприемников в передних калориметрах используются фотоэлектронные трубки (PMT).

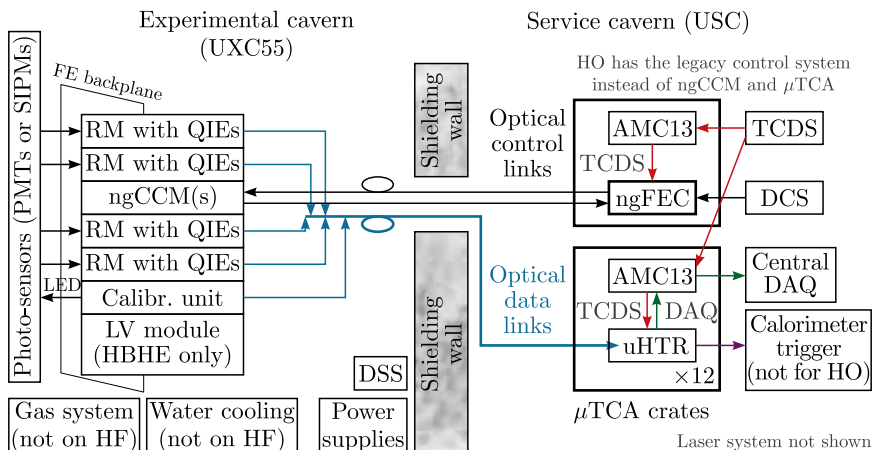


Рис. 2. Схема организации считывающей и регистрирующей электроники адронного калориметра CMS

Аналоговые сигналы считываются с фотодетектора, оцифровываются элементами считывающей электроники калориметра и передаются посредством элементов так называемой регистрирующей электроники, которая обеспечивает отбор событий нулевого и первого уровня, в буфер памяти процессорной фермы, обеспечивающей отбор событий второго и третьего уровней (рис. 2). Отбор событий нулевого и первого уровня проводится аппаратными методами на уровне сигнал–шум и сравнением эмулированного сигнала с реальным. Отбор событий второго и третьего уровней проводится программными методами на уровне масс реконструированных объектов, углов разлета и т. д.

Элементы считывающей электроники размещены непосредственно на детекторе CMS в корзинах считывания. Элементы регистрирующей электроники находятся в подземном служебном помещении, защищенном от воздействия излучений ускорителя и удаленном приблизительно на 50 м от линии пучка.

В настоящее время адронные калориметры способны проводить измерения характеристик одиночных адронов и адронных струй, работая в сильном аксиальном магнитном поле ($B_Z \sim 3$ Тл) при высоком количестве наложенных взаимодействий (до ~ 60 и при загрузках ~ 100 кГц на канал) и в условиях высокого уровня радиационных нагрузок (устойчивая работа при светимости LHC порядка $10^{33} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$).

В настоящей работе представлен обзор задач и результатов модернизации адронного калориметра CMS для обеспечения эффективной работы в условиях повышенной светимости LHC $L > 2 \cdot 10^{34} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

МОДЕРНИЗАЦИЯ АДРОННОГО КАЛОРИМЕТРА В ПЕРИОД ПЕРВОЙ ДЛИТЕЛЬНОЙ ОСТАНОВКИ LHC

Увеличение светимости ускорителя LHC после его модернизаций во время LS2 и LS3 до величины $5 \cdot 10^{34} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ создает новые, особые условия работы всех детекторов эксперимента CMS и накладывает дополнительные требования как на сами детекторы, так и на соответствующие программы моделирования и реконструкции.

Важным следствием повышения светимости ускорителя LHC является увеличение радиационных нагрузок различных частей детектора CMS, которое приводит к уменьшению (деградации) сигнала от активных элементов калориметрических детекторов, что особенно проявляется в передней и торцевой области установки CMS (рис. 3).

Деградации сигнала с активных элементов адронного калориметра оказывают значительное влияние (в сторону ухудшения) на энергетическое разрешение струй в зависимости от интегральной светимости. Из представленных результатов моделирования, проведенного в 2016 г., видно, что уже при набранной суммарной интегральной светимости $> 150 \text{ фб}^{-1}$ будет наблюдаться существенная деградация разрешения реконструированных струй ($> 20\%$) для калориметра с HPD фотодетекторами.

Кроме того, во время первых испытаний работы системы электроники адронного калориметра в магнитном поле был обнаружен эффект появления самопроизвольных разрядов внутри ряда HPD, которые не только являлись источником дополнительного шума, но и могли привести к разрушению фотодиода.

В связи с такой сильной деградацией отклика калориметра и нестабильной работой HPD было принято решение провести модернизацию торцевого адронного калориметра во время технической остановки в конце 2017 и начале 2018 гг. [3]. В качестве идеальной замены HPD был выбран кремниевый фотоумножитель (SiPM), который нечувствителен к магнитному полю. Кроме того, SiPM обеспечивает усиление на два-три порядка более высокое, чем HPD, а также обладает более высокой квантовой эффективностью. Работы по модернизации торцевых адронных калориметров в рамках программы «Фаза 1» подробно описаны в соответствующей статье [5].

С учетом идентичности организации системы считывающей электроники в центральных (HB) и торцевых адронных калориметрах и на основе опыта, полученного в результате работ по модернизации торцевых адронных калориметров, была проведена замена элементов электроники в HB. По аналогии с HE, в HB также использовался многоканальный гибридный фотодиод (HPD), рекомендованный к замене на кремниевый фотоумножитель (SiPM) такого же типа, как в HE. В рамках программы модернизации адронного калориметра был создан специализированный стенд для долговременного тестирования системы считывающей электроники.

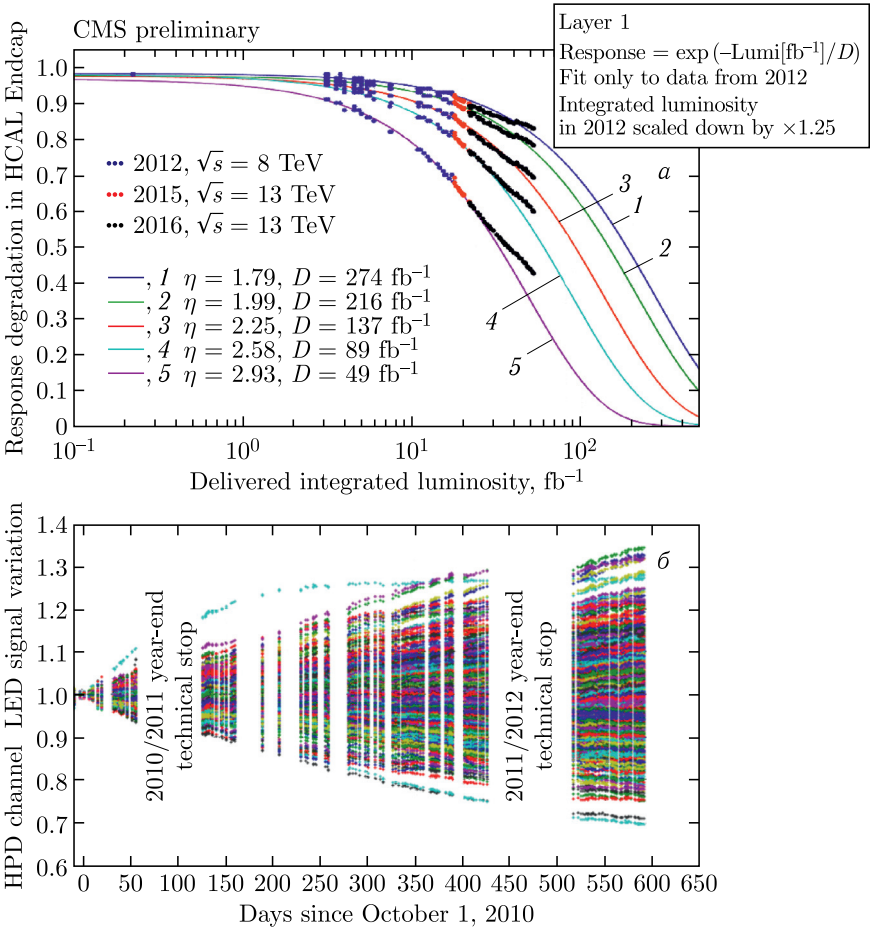


Рис. 3 (цветной в электронной версии). Относительное и прогнозируемое уменьшение сигнала с активных элементов торцевого адронного калориметра (HE) в зависимости от интегральной светимости для различных периодов работы LHC (2012, 2015 и 2016 гг.) и геометрического положения элементов калориметра (вверху). Изменение величины отношения амплитуды сигнала к номинальному в каналах HPD во времени (внизу)

троники с использованием SiPM. Была полностью подготовлена инфраструктурная база, а именно система водяного охлаждения модулей, система низковольтного питания, система подачи напряжения смещения на SiPM, система оптоволоконной коммуникации считывающей электроники с системой отбора данных и триггера, контроля и записи тестовых данных. По аналогии с методикой для тестирования электроники для

торцевых калориметров, тестирование модулей для центральной части адронного калориметра проводилось на основе анализа одно-двухфотоэлектронных зарядовых спектров и анализа спектра от импульса калиброванного источника света. Впоследствии, в результате определения оптимального напряжения смещения SiPM (~ 66 В) и применения индивидуального коэффициента усиления для SiPM (~ 40 фКл), было произведено выравнивание амплитуд сигналов для всех модулей считывания (рис. 4).

Новая система считывающей электроники была установлена на детектор CMS в 2017–2018 гг. на торцевые части калориметра и в 2019 г. в центральные части. Были заменены в сумме 288 считывающих модулей, по 4 для каждого сектора адронного калориметра, установлена новая система подачи напряжения смещения на SiPM, 72 калибровочных модуля и 108 модулей контроля и управления считывающей электроникой, по одному модулю на каждый сектор торцевых калориметров и по два модуля на каждый сектор центрального калориметра соответственно.

Модернизация включила в себя как замену HPD-фотодетекторов на кремниевые фотоумножители (SiPM) для всех секторов адронного кало-

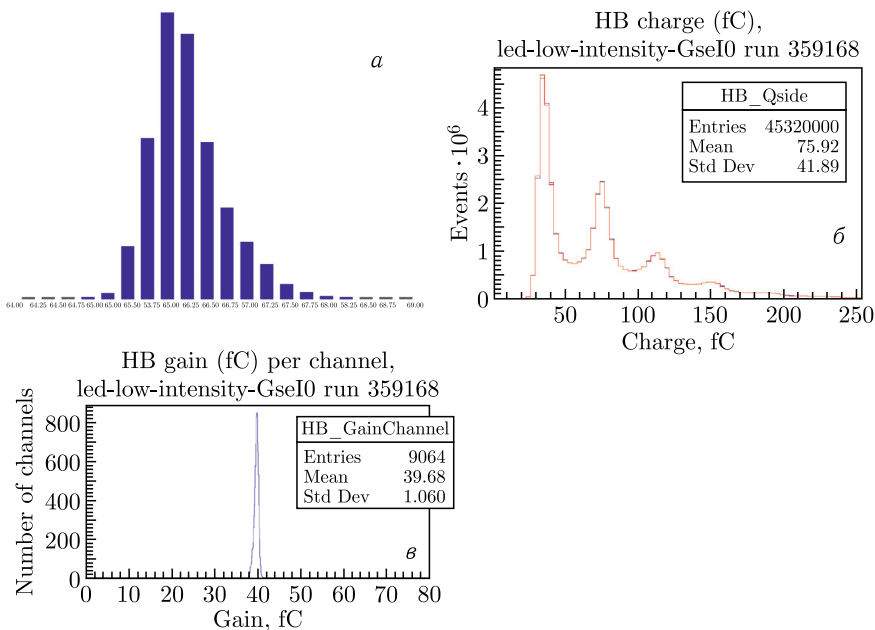


Рис. 4. Распределение значений напряжения смещения для всех каналов адронного калориметра (а). Распределения одно-двухфотоэлектронных зарядовых спектров для суммы всех SiPM в HB (б). Профиль распределения амплитуд сигналов для всех SiPM в HB при регистрации однофотоэлектронных сигналов (в)

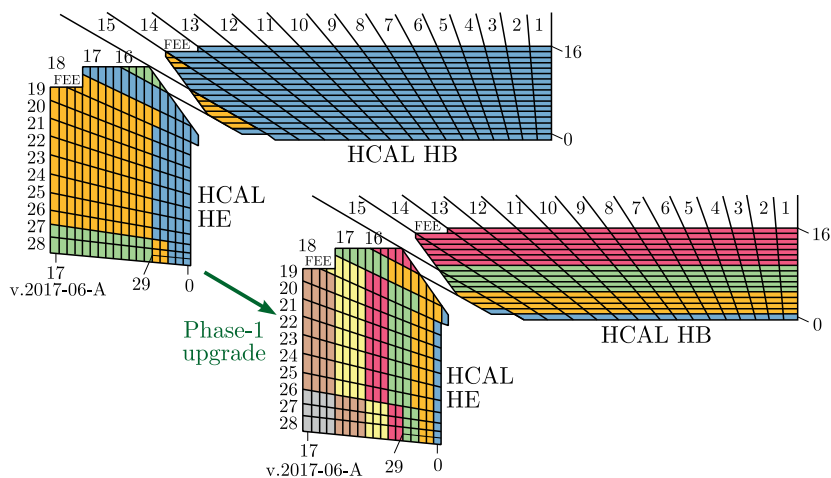


Рис. 5. Схема глубин (продольная сегментация) адронного калориметра CMS до модернизации в рамках программы «Фаза 1» и после нее

риметра (кроме переднего калориметра), так и увеличение числа считывающих каналов по глубине (так называемая продольная сегментация) до 7 единиц (рис. 5), что наряду с заменой фотодетекторов позволит более точно учитывать и компенсировать деградацию отклика адронного калориметра вследствие радиационного повреждения.

ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ HCAL ВО ВРЕМЯ ВТОРОГО СЕАНСА РАБОТЫ LHC

Сеанс протон-протонных столкновений 2016–2018 гг. проходил при временном интервале регистрации событий 25 нс и при величине магнитного поля соленоида $B = 3,8$ Тл. Во время сеанса набора данных проводился мониторинг работы адронных калориметров в глобальной системе сбора данных CMS, выявление неработающих каналов электроники, ошибок чтения сигналов с каналов электроники, измерение частотных и амплитудных характеристик элементов считывающей электроники торцевых адронных калориметров CMS, а также изучение параметров сигналов с электроники адронного калориметра для последующего определения качества («плохой–хороший») регистрируемых и записанных данных CMS. Особенное внимание уделялось новой считывающей электронике торцевых адронных калориметров, так как ее установка проходила во время технических остановок второго сеанса работы LHC.

Методика отбора данных, основанная на выявлении аномальных амплитуд сигналов в каждом канале адронного калориметра, сочетается с измерением и изучением реконструированного отклика в ячейках калориметра. Дополнительно исследуются энергетическое и временное рас-

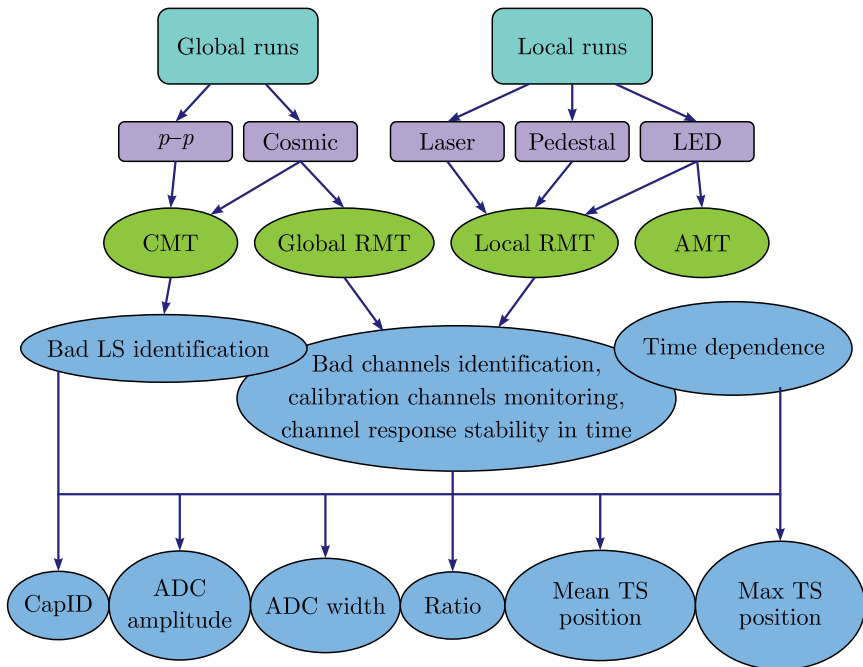


Рис. 6. Блок-схема методики сертификации данных для адронного калориметра CMS. Представлена система программного обеспечения и этапы контроля качества и отбора данных

пределения сигналов. Использование данной методики позволяет однозначно определить качество данных, записанных с адронного калориметра, и отсеять поврежденные данные или ложные сигналы (рис. 6).

В относительном значении 98,7% от всего зарегистрированного системами адронной калориметрии объема данных, полученных в результате протон-протонных взаимодействий и прошедших отбор нулевого и первого уровней, сертифицированы как удовлетворяющие условию для дальнейшего физического анализа. Основные потери в калориметрии связаны с рассинхронизацией системы считывающей электроники и триггера первого уровня CMS, а также с потерей связи между модулями контроля считывающей электроники и системой управления данной электроникой, повлекшими за собой регистрацию импульсов от срабатывания модуля калиброванного источника света во время физического набора данных из-за сдвига записанного события во временном окне. Небольшой вклад в статистику потерь данных внесли инфраструктурные проблемы, такие как поломка (с последующей в 2019 г. заменой) источников питания электроники.

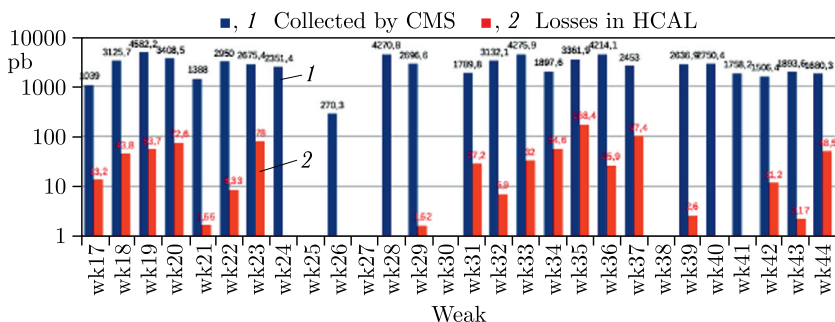


Рис. 7 (цветной в электронной версии). Общий статус сертификации данных с адронного калориметра CMS за 2018 г. в виде зависимости от времени и количества набранных данных. Синим (1) показано количество набранных данных в пб⁻¹, красным (2) — потери в адронном калориметре (в логарифмическом масштабе)

Неработающих каналов электроники, ошибок чтения сигналов, отказов модулей считывающей электроники выявлено не было. Измеренные амплитуды сигналов находились в требуемом диапазоне величин. В условиях роста фоновых нагрузок в режиме набора данных при ядро-ядерных столкновениях перегрузок каналов передачи данных адронного калориметра между системой набора данных и системой отбора не наблюдалось.

Из зарегистрированных CMS данных за 2016–2018 гг. (суммарно 144,1 фб⁻¹: 37,8, 44,2 и 62,1 фб⁻¹ за каждый год соответственно) были отобраны 142,3 фб⁻¹ (37,7, 43,1, 61,5 фб⁻¹ за каждый год соответственно) как удовлетворяющие условию физической задачи для адронной калориметрии детектора (рис. 7). В свою очередь, после сертификации данных со всех подсистем детектора CMS были отобраны 137,3 фб⁻¹ (36,5, 42, 58,8 фб⁻¹ за каждый год соответственно) как удовлетворяющие условиям работы детектора CMS в целом.

МОДЕРНИЗАЦИЯ ТОРЦЕВЫХ АДРОННЫХ КАЛОРИМЕТРОВ В РАМКАХ ПРОГРАММЫ «ФАЗА 2»

Проект модернизации CMS «Фаза 2» направлен на усовершенствование детекторных систем для обеспечения необходимых физических характеристик в сложных условиях высокой светимости на LHC (HL-LHC) [6]. На этом втором этапе программы физики LHC планируется увеличить мгновенную светимость до $5 \cdot 10^{34} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ с целью набора около 3000 фб⁻¹ интегральной светимости к концу 2037 г. Соответствующее среднее число протон-протонных взаимодействий (pile-up) на одно пересечение сгустков пучков составит 140, с возможностью увеличения до 200. Установка модернизированных детекторных систем началась во время LS2 и должна быть завершена во время LS3, которая запланирова-

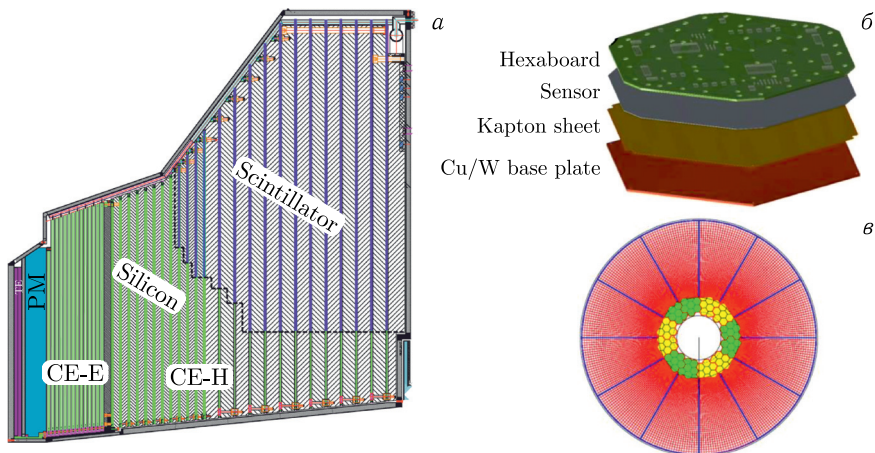


Рис. 8. Эскиз одной четверти макета HGCal в координатах r - z (а). Уложенные слои кремниевого модуля CE-E (б). Пример расположения кремниевого (внутренняя часть) и сцинтилляционного (внешняя часть) модулей в 22-м слое CE-H (в)

на на период с конца 2025 г. до середины 2028 г. Для улучшения способности выделять и точно измерять продукты наиболее интересных столкновений детекторы CMS нуждаются в соответствующей модернизации.

Торцевые части электромагнитного и адронного калориметров CMS будут заменены новой системой, носящей название калориметр высокой гранулярности HGCal, состоящей из электромагнитной и адронной частей (рис. 8). Конструкция HGCal будет подвержена жесткому радиационному излучению с высокой множественностью наложенных взаимодействий на одно событие. Активные детекторные элементы и считывающая электроника должны быть функциональными и высокоэффективными после 10 лет работы HL-LHC: для частей, ближайших к точке взаимодействия, это соответствует максимальному флюенсу частиц $1,0 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ в нейтронном эквиваленте и общей поглощенной дозе 10 МГр. Для смягчения высокого pile-up HGCal будет иметь увеличенную поперечную и продольную гранулярность, а также хорошее временное разрешение. С учетом этих условий и ввиду большой общей площади высокогранулярного калориметра и требования к созданию детектора из материалов с низкой стоимостью на единицу площади, электромагнитная часть калориметра (CE-E) основана на технологии кремниевых фотодатчиков и занимает 585 м^2 , в то время как адронная часть (CE-H) основана на технологиях кремниевых фотодатчиков и сцинтилляционных модулей и занимает 485 м^2 . Подробное описание HGCal приведено в отчете о техническом проектировании [7].

На основе опыта, накопленного в ходе НИОКР по материалу фотодатчиков для модернизации «Фазы 2» трекинговой системы CMS, крем-

ниевые фотодатчики были выбраны в качестве активного элемента для электромагнитной секции торцевого калориметра CE-E из-за их высокой радиационной стойкости к уровню излучения, сравнимому с уровнем излучения в объеме трекера. CE-E состоит из 26 слоев общей толщиной 34 см, что примерно соответствует $26X_0$ и $1,7\lambda$. Активными детекторными элементами будут шестиугольные кремниевые фотодатчики шириной 190 мм, сегментированные в 432 шестиугольные ячейки во внутренней части калориметра и в 192 ячейки во внешней части. Модуль представляет собой фотодатчик на листе каптоновой ленты, помещенный между 1,4-мм W/Cu (75/25 %) пластиной и печатной платой с передовой ASIC HGCROC (см. рис. 8).

HGCROC разработан по 130-нм CMOS технологии и обеспечивает полную функциональность в радиационно жестких условиях. Основными особенностями этого чипа являются: высокий динамический диапазон при низком энергопотреблении благодаря методу измерения заряда через время прохождения порога (ToT) и точные (25 пс) измерения времени регистрации события (ToA) при частоте 40 МГц.

Адронная часть HGCAL CE-H состоит из поглотителя из нержавеющей стали с 21 слоем различной продольной и поперечной сегментации. Передняя часть CE-H состоит из 12 слоев 35-мм поглотителя (3,3 λ), а задняя часть — из 10 слоев 68-мм данного поглотителя (5,7 λ). Первые восемь слоев CE-H будут оснащены модулями с кремниевыми вкладками (с односторонними кассетами). Остальные слои представляют собой комбинацию кремниевых слоев (при больших углах псевдобыстрот) и сцинтилляционных модулей, считываемых КФУ (при низких углах псевдобыстрот). Таким образом, в центре системы нового адронного калориметра размещены гексагональные кремниевые модули, а сцинтилляционные модули расположены во внешней области слоя CE-H (см. рис. 8). Активные детекторные элементы представляют собой гексагональные кремниевые датчики шириной 190 мм из 8'' пластин, а сигнал со сцинтилляционного модуля считывается кремниевым фотоумножителем. Регистрирующая электроника ASIC модулей CE-H будет такой же, как и в CE-E, а именно HGCROC.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для решения текущих задач и задач эпохи HL-LHC адронная калориметрия детектора CMS проходит несколько этапов модернизации, включая полную переделку своих торцевых частей. Основными причинами являются деградация сигнала от активных элементов калориметрических детекторов, отказы аппаратуры сервисных систем, высокие загрузки в условиях увеличенной светимости ускорителя после его модернизации в период LS2, а также высокая ожидаемая мгновенная светимость $(5-7) \cdot 10^{34} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ после модернизации LHC в период LS3, что приведет к большому числу (140–200) наложенных вершин взаимо-

действующих частиц в момент одного события и жестким радиационным условиям. Общая ионизирующая доза в 10 МГр и флюенс частиц в $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ будут набраны за ожидаемые следующие 10 лет работы слюем калориметра, ближайшим к точке взаимодействия. Соответственно, другие части адронного калориметра подвергнутся хоть и меньшей дозе облучения, но достаточной для полной неспособности детектировать частицы при сохранении их текущей конфигурации и систем электроники детектора. Для поддержания своей работы в текущих условиях адронные калориметры прошли первый этап модернизаций («Фаза 1») в течение LS2 и коротких технических остановок. Новые торцевые калориметры («Фаза 2») уже находятся на стадии производства. Производство должно быть завершено к 2026 г., финальные испытания — к 2027 г., а установка и ввод в эксплуатацию запланированы на 2027–2028 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *CMS Collab.* The CMS Experiment at the CERN LHC // J. Instrum. 2008. V. 3. P. 3S08004.
2. *CMS Collab.* CMS: The Compact Muon Solenoid. Technical Proposal. CERN/LHCC 1994-038. 1994.
3. *CMS Collab.* CMS: The Hadron Calorimeter Technical Design Report. Technical Report CERN-LHCC-97-31. 1997.
4. *CMS HCAL Collab.* CMS Technical Design Report for the Phase 1 Upgrade of the Hadron Calorimeter. CERN-LHCC-2012-015, CMS-TDR-10. 2012.
5. Бунин П., Зарубин А. Модернизация торцевых адронных калориметров CMS на LHC // ЭЧАЯ. 2017. Т. 48, вып. 5. С. 632–638.
6. *Apollinari G. et al.* High-Luminosity Large Hadron Collider (HL-LHC) // CERN Yellow Rep. Monogr. 2017. V. 4. P. 1–516.
7. *CMS Collab.* The Phase-2 Upgrade of the CMS Endcap Calorimeter. Technical Design Report CERN-LHCC-2017-023, CMS-TDR-019. Geneva: CERN, 2018.