МОДЕРНИЗАЦИЯ ДЕТЕКТОРА CMS

Эксперимент CMS на LHC

Шифр темы: 02-0-1083-2009/2023

СПИСОК АВТОРОВ

РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА	Jmm	В.Ю. Каржавин
НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА		И. А. Голутвин
Список авторов проекта прилагается (с	м. следующую страниц	у)
ДАТА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ПРОЕКТА В Н	00	
ДАТА НТС ЛАБОРАТОРИИ Н	НОМЕР ДОКУМЕНТА _	
ДАТА НАЧАЛА ПРОЕКТА		TAI

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ ПРОЕКТА ИЗ ОИЯИ и СТРАН-УЧАСТНИЦ

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

Руководство ОИЯИ

В.А. Матвеев

Группа советников и консультантов

Б.С. Юлдашев

ЛФВЭ

- В.Ю. Алексахин, С.В. Афанасьев, Д.В. Будковский, П.Д. Бунин, М.Г. Гавриленко,
- А.О. Голунов, И.А. Голутвин, И.Н. Горбунов, Н.В. Горбунов, Н.Н. Евдокимов,
- Ю.В. Ершов, И.А. Жижин, Н.И. Замятин, А.В. Зарубин, А.Ю. Каменев,
- В.Ю. Каржавин, А.М. Куренков, А.В. Ланёв, А.И. Малахов, А.М. Маканькин,
- В.В. Перелыгин, В.А. Смирнов, Е.В. Сухов, О.В. Теряев, Е.В. Устинов,
- В.В. Шалаев, С.В. Шматов

ЛИТ

- Н.Н. Войтишин, А.О. Голунов, В.В. Кореньков, В.В. Мицын, Д.А. Олейник,
- Г.А. Ососков, В.В. Пальчик, А.Ш. Петросян, Р.Н. Семенов, Т.А. Стриж,
- В.В. Трофимов, А. Хведелидзе, И.А. Филозова

ЛЯП

Г. Адамов, З. Цамалаидзе

Ереванский физический институт им. А. Алиханяна, Ереван, Армения

В. Алоян, А. Айрапетян, А. Геворгян, А. Петросян, А. Тумасян

Институт ядерных проблем БГУ, Минск, Беларусь

- Я. Галкин, А. Кунц, А.В. Литомин, В.В. Макаренко, Р.В. Стефанович,
- В.А. Чеховский, В.В. Чайковский

Институт сцинтилляционных материалов НАН Украины, Харьков, Украина

А.Ю. Бояринцев, Н. Галунов, Б.В. Гринев, П. Жмурин

Харьковский физико-технический институт, Харьков, Украина

Л.Г.Левчук, А.А. Луханин, С.Т. Лукьяненко, В.Ф. Попов,

Институт ядерной физики Узбекской академии наук, Ташкент, Узбекистан

Б.С. Юлдашев, И.Н. Нуридинов, Э.М. Ибрагимова

ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЙ ПРОЕКТА

МОДЕРНИЗАЦИЯ ДЕТЕКТОРА CMS

Эксперимент CMS на LHC

Шифр темы: 02-0-1083-2009/2023

Руководитель проекта: В.Ю. Каржавин Научный руководитель: И. А. Голутвин

УТВЕРЖДЕН ДИРЕКТОРОМ ОИЯИ		
· · · · · · · · · · · · · · · · ·	подпись	<u>— — —</u> Дата
СОГЛАСОВАНО		
ВИЦЕ-ДИРЕКТОР ОИЯИ		
ГЛАВНЫЙ УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ		
ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР		
НАЧАЛЬНИК НОО		
ДИРЕКТОР ЛАБОРАТОРИИ		
ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР ЛАБОРАТОРИИ		
РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА		
НАУЧНЫЙ. РУКОВОДИТЕЛЯ ПРОЕКТА		. —
ОДОБРЕН		
ПКК ПО НАПРАВЛЕНИЮ		

СОДЕРЖАНИЕ ПРОЕКТА

1	Вве	едение	6
2	Mo	п ивация	7
3	Co	здание торцевых калориметров высокой гранулярности	11
	3.1	Структура HGCal	13
	3.1.1	Кремниевые сенсоры СЕ-Н	14
	3.1.2	Сцинтилляционные модули СЕ-Н	15
	3.1.3	Кассеты	16
	3.2	Панели охлаждения калориметра HGCal	17
	3.2.1	Производство панелей охлаждения калориметра HGCal	19
	3.2.2	Прототипы панелей охлаждения	19
	3.2.3	Процедура выбора предприятия-изготовителя и поставщиков материала	21
	3.3	Проведение комплексных испытаний кассет HGCal	21
	3.4	Оценка затрат на участие в создании HGCal	23
	3.5	План-график работ по сборке и установке торцевых калориметров	27
4	Mo	дернизация детекторов торцевой мюонной системы	28
	4.1	Модернизация, тестирование, сборка и установка MEx/1 CSC	28
	4.2	Модернизация электроники в период LS2	30
	4.3	Модернизация высоковольтного фильтра для камер МЕ1/1	31
	4.4	Модернизация соединительной панели МЕ1/1	32
	4.5	Развитие алгоритмов реконструкции трек-сегментов в CSC	33
	4.6	Участие в изучении эффектов «старения» CSC CMS на GIF++	35
	4.6.1 некор	Изучение характеристик CSC в условиях HL–LHC при наличии орелированного фона	37
	4.6.2	Изучение методов устранения токов Мальтера в CSC	37
	4.7	Участие в исследованиях новых газовых смесей	39
	4.8	Оценка затрат на модернизацию торцевой мюонной системы.	39
5	Оц	енка кадровых ресурсов	41
6	Бю	джет проекта	42
7	SW	ОТ-анализ	45
	7.1	Преимущества проекта	45
	7.2	Слабые стороны и риски проекта	45
8	Сп	исок литературы	46

АННОТАЦИЯ ПРОЕКТА

"Компактный мюонный соленоид" Многоцелевая установка (CMS) предназначена для изучения рр-взаимодействий на Большом адронном коллайдере (LHC) с целью проведения комплексных исследований в области физики элементарных частиц с целью 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), поиск суперсимметрии, проверка теоретических гипотез низкоэнергетической гравитации при энергиях масштаба ТэВ. К другим важным проблемам, которые физики надеются решить с помощью LHC, относится поиск путей объединения трех фундаментальных взаимодействий, например, в рамках расширенных калибровочных моделей. Кроме физическая программа CMS включает целый комплекс исследований, направленных на изучение предсказаний стандартной модели (СМ) в новой области энергии, изучение свойств КХД при ранее недоступных значениях переданного четырехимпульса и долей переданной энергии, изучение закономерностей взаимодействия ядер при высоких энергиях, поиск кварк-глюонной плазмы и многое другое.

Физики ОИЯИ участвуют в проекте" Компактный мюонный соленоид" (Сотраст Muon Solenoid – CMS) в составе сотрудничества научных центров России и странучастниц ОИЯИ (коллаборация RDMS), начиная с разработки концепции эксперимента в 1992 г. Основные усилия ОИЯИ в проекте СМЅ сконцентрированы на создании, эксплуатации и модернизации детекторов торцевых частей установки CMS. RDMS несет полную ответственность за торцевые адронные калориметры (Hadron Endcap, HE) и передние мюонные станции (Muon Endcap, ME1/1). Эта ответственность сохранялась как в период набора данных в время первого (2010–2012 гг.) и второго этапа работы LHC (2016–2018 гг.), так и в течение длительных остановок LHC в 2013–2015 гг. (LS1) и в 2018-2020 время которых была проведена модернизация ΓΓ. (LS2),во экспериментальной установки CMS для обеспечения эффективной работы всех систем в условиях высокой светимости более $10^{34} \, \text{см}^{-2} \text{c}^{-1} \, \text{с}$ протон–протонными соударениями при полной энергии LHC. Начиная с 2027 года предусмотрена работа LHC при повышенной светимости вплоть до 7.5×10^{34} см⁻²c⁻¹ (High Luminosity LHC, HL-LHC), что позволит увеличить статистику более чем на порядок (Lint $\sim 3000~\phi \text{ GH}^{-1}$). С 2025 года по 2027 год запланирована длительная остановка (LS3) для модернизации LHC. Основной задачей модернизации установки CMS в этот период является обеспечение эффективной работы всех систем в условиях в режиме HL-LHC.

Объектом исследования данного проекта являются детекторные системы установки СМS. Целью данного проекта являются участие в создании торцевых калориметров высокой гранулярности (Highly Granularity Calorimeter, HGCal) и в модернизации передней мюонной станции ME1/1 катодно-стриповых камер (CSC) торцевой мюонной системы СМS.

1 Введение

Физики ОИЯИ принимают участие в проекте «Компактный мюонный соленоид» (СМS) [1] более 25 лет с момента создания СМS. Сотрудничество осуществляется в рамках коллаборации: российских институтов, ОИЯИ и институтов стран-участниц ОИЯИ (RDMS). ОИЯИ внес ключевой вклад в создании установки СМS. Основной вклад был сосредоточен на создании детекторов торцевой части экспериментальной установки СМS с полной ответственностью RDMS за проектирование, строительство и эксплуатацию торцевого адронного калориметра (HCAL) и передней мюонной станции (МЕ1/1).

Первый этап LHC (Run 1) проходил в 2009—2012 гг. при работе на сталкивающихся пучках протонов при 7 и 8 ТэВ. В 2015 г. стартовал новый этап работы LHC (Run 2) при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ, который продлился до второй длительной остановки (Long Stop 2, LS2) в конце 2018 г. За это время интегральная светимость, записанных экспериментом CMS данных Lint достигла порядка 190 фбн⁻¹. После LS2 исследования при проектных значениях энергии 13—14 ТэВ (запланировано увеличение энергии до проектного значения 14 ТэВ в с. ц. м.) и светимости свыше 10^{34} см⁻² с⁻¹ (Run 3) продлятся до конца 2024 г. (ожидаемая к концу этапа Lint ~350 фбн⁻¹).

Начиная с 2027 г. предусмотрена работа LHC при повышенной светимости вплоть до $7.5\times10^{34}\,\mathrm{cm^{-2}c^{-1}}$ (High Luminosity LHC, HL–LHC), что позволит увеличить статистику более чем на порядок (Lint $\sim 3000\,\mathrm{фбh^{-1}}$). График работы LHC/HL–LHC и, ожидаемая на каждом этапе, интегральная светимость приведены на рисунке 1.1.



Рисунок 1.1. График работы LHC.

В таблице 1.1 приведено сравнение некоторых ключевых параметров БАК: в расчетном режиме (LHC), в режиме повышенной и предельной светимости (HL–LHC), для протон-протонных взаимодействий.

Для реализации запланированной программы исследований на HL-LHC детекторные системы экспериментальных установок должны быть существенно модернизированы. Во-первых, они должны быть адаптированы для работы в условиях существенно увеличенных радиационных загрузок, а во-вторых, детекторы вместе с системой отбора событий (системой триггера) программным комплексом И реконструкции и анализа событий должны позволить выделять экспериментальную информацию в условиях большого количества одновременных взаимодействий при соударении сгустков протонов, так называемых «наложенных» событий, или «пайлапа» (pile-up). Если среднее число подобных событий на первых этапах не превышало 20-40, то, как ожидается, на третьем этапе оно составит 60, а в HL-LHC достигнет $\approx 140-200$. Таким образом, множественность взаимодействий в одном пересечении пучков возрастёт почти в 5 раз, что накладывает

дополнительные требования на быстродействие детекторов, электроники считывания, а также систем сбора и обработки данных. Это обстоятельство также требует использования радиационно-стойких материалов для детекторных элементов и разработки новых методов анализа экспериментальной информации.

Таблица 1.1. Характеристики LHC

	LHC	HL–LHC	HL–LHC
Параметр	проектная	высокая	предельная
	светимость	светимость	светимость
Пиковая светимость $(10^{34} \text{cm}^{-2} \text{c}^{-1})$	1.0	5.0	7.5
Интегральная светимость (фбн ⁻¹)	300	3000	4000
Пайлап	~30	~140	~200

На рисунке 1.1 представлен график многоэтапной программы модернизации CMS, нацеленной на подготовку к работе в условиях высокой светимости LHC и прогнозируемая эволюция интегральной светимости.

В период набора экспериментальных данных «Фаза-1», который заканчивается в 2025 году, модернизация СМS нацелена на обеспечение эффективной работы установки в проектном режиме при работе LHC с полной энергией до $\sqrt{s} = 14$ ТэВ и светимостью $1-2\times10^{34}$ см⁻²с⁻¹.

Период набора экспериментальных данных в режиме высокой светимости HL–LHC «Фаза-2» продлится с 2027 года по 2038 год. Интегральная светимость LHC будет увеличена на порядок с 300 фбн⁻¹ до 3000 фбн⁻¹. Начиная с 2025 года по 2027 год, запланирована длительная остановка (LS3) для модернизации LHC. Основной задачей модернизации установки CMS в этот период является обеспечение эффективной работы всех систем в условиях HL–LHC.

Целью данного проекта являются участие в создании торцевых калориметров высокой гранулярности (Highly Granularity Calorimeter, HGCal) [4] и в модернизации передней мюонной станции ME1/1 катодно-стриповых камер (CSC) торцевой мюонной системы CMS [5].

Все работы выполняются в рамках взятых на себя обязательств в соответствии с Меморандумом о взаимопонимании по созданию детектора CMS между ЦЕРН и ОИЯИ (Memorandum of Understanding for Collaboration in the Construction of the CMS Detector), соответствующих Приложений (Addendum №10 [6], Addendum №13 [7], Addendum №14 [8], Addendum №15 [9]), Меморандумом о взаимопонимании по участию ОИЯИ в проекте HGCal CMS [10].

2 Мотивация

Перспективы исследований на HL–LHC обсуждаются уже более десяти лет. Главной целью новых исследований, безусловно, станет дальнейшее тщательное изучение природы бозона Хиггса и поиск возможных отклонений от предсказаний СМ, указывающих на проявления сигналов новых физических явлений. Основной вопрос, на который попытаются ответить эксперименты на LHC, формулируется по-прежнему: существует ли новая физика на энергетическом масштабе порядка ТэВ?

Одним из главных инструментов исследований будет изучение свойств бозона Хиггса. На основе статистики первого и второго сеансов LHC свойства нового бозона были исследованы довольно тщательно. В настоящее время нет причин сомневаться в том, что новая частица является скаляром, согласующимся с гипотезой флуктуацией поля Хиггса. Тем не менее, достигнутая точность измерения констант связи не позволяет однозначно сказать, что закрыта любая возможность существования новой физики — наблюдаемый вклад от рождения новых частиц (новых каналов распада бозона Хиггса) может оказаться гораздо меньше текущей точности измерений. Увеличение статистики позволяет существенно повысить эту точность в режиме HL–LHC (рисунок 2.1). Кроме поиска редких распадов и нестандартных каналов распада бозона Хиггса остается открытым вопрос о существовании новых скалярных состояний, предсказываемых, например, моделями с расширенным хиггсовским сектором (например, как частный случай, минимальной суперсимметричной моделью) [11,12].

Многочисленные поиски отклонений от предсказаний СМ не принесли результатов, однако, позволили установить ограничения на массы гипотетических частиц и на масштабы новых явлений (новых калибровочных энергетические измерений, составной структуры фундаментальных дополнительных частиц, лептокварков и т. д.), полученных на основе данных Run 1 и Run 2. Это может означать, что либо масштабы процессов новой физики лежат за пределами достигнутых энергетических (массовых) пределов на LHC, либо их сечения настолько малы, что возможность наблюдения находится за порогом текущей чувствительности экспериментальных измерений.

Ожидается, что на HL–LHC измерения будут проведены в существенно расширенных, по сравнению с существующими, областях модельных параметров для всех сценариев физики за рамками СМ. Увеличение статистики позволит не только расширить ожидаемые пределы на массы новых частиц (в 1.2–3 раза), предсказываемых различными моделями за пределами СМ, но и, если такие частицы будут обнаружены, провести разделение различных гипотез об их происхождении (определение спина и констант взаимодействия).

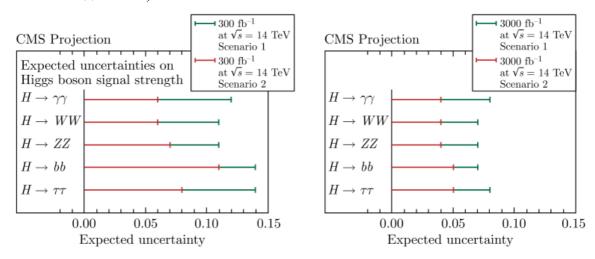


Рисунок 2.1. Оценочная точность измерения интенсивности сигнала бозона Хиггса для $300~\phi \text{бh}^{-1}$ (слева) и $3000~\phi \text{бh}^{-1}$ (справа) [11, 12].

Одним из основных направлений исследования возможных проявлений физики за пределами Стандартной модели взаимодействия элементарных частиц (СМ) являются поиски кандидатов на роль частиц темной материи и процессов, идущих с нарушением лептонного числа (Lepton Flavour Violation, LFV) [11,13].

Особый интерес в поиске новой физики представляют процессы, в которых ожидается рождение новых частиц с поперечным импульсом намного больше их массы

(boosted objects). Как следствие продукты их распада являются пространственноблизкими, в частности, дают очень узкие и/или пространственно-пересекающие (merged) струи. Для разделения таких событий необходимо хорошее пространственное разрешение калориметров.

Калориметр с высокой продольной и поперечной сегментацией облегчает измерение энергии потока частиц, где информация от всех детекторных подсистем оптимально комбинируется. При проектировании CMS HGCal учитывается, что реконструкции particle-flow алгоритмом будет реконструированы энергетические потоки частиц. Поэтому, точность пространственной реконструкции имеет первостепенное значение. В частности, поперечная сегментация должна быть меньше радиуса Мольера как в электромагнитной, так и в адронной частях. Это обеспечивает возможность хорошего разделения двойных струй, особенно в условиях высокой плотности взаимодействий для HL-LHC. Потенциал CMS HGCAL заключается в том, чтобы иметь возможность идентифицировать отдельные частицы внутри струй, подобно тому, как это делали пузырьковые камеры на заре физики элементарных частиц. На рисунке 2.2 приведены результаты моделирования взаимодействия одного протон-протонного сгустка в CMS. Масштабирование показывает отдельные треки и энергетические кластеры и демонстрирует, что частицы могут быть эффективно реконструированы и ассоциированы со струями.

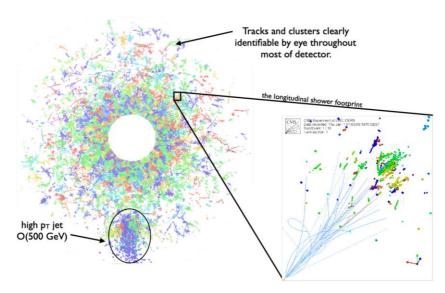


Рисунок 2.2. Моделирование пересечения одного сгустка БАК, содержащего интересное столкновение и 200 одновременных событий зарегистрированных в HGCAL.

Пространственная и временная детализации ливня также помогает уменьшить наложение событий, связывая струи/частицы с конкретными первичными вершинами через позиционирование. Разделение событий еще более улучшается за счет точного временного измерения потоков частиц в электронике первого уровня.

Большое количество продольных слоев облегчает использование различий в развитии продольного ливня для различных физических объектов, таких как электроны или фотоны и струи, возникающие в результате векторного слияния бозонов (VBF) или наложенных событий. Вместе с другими детекторами CMS, такими как трекер и мюонные системы, HGCal позволит выполнять реконструкцию потока частиц. Реконструкция с помощью этого детектора позволять использовать новые методы

идентификации, кластеризации и реконструкции с использованием методов машинного обучения.

В таблице 2.1 приведены сравнительные характеристики параметров установки CMS для работы в условиях максимальной расчетной светимости и в условиях повышенной светимости LHC (HL–LHC). Очевидно, что увеличение светимости в 5 раз, увеличение частоты триггера в 7.5 раза и увеличение задержки триггера первого уровня в 4 раза накладывают дополнительные требования для эффективной работы детекторов и электроники, что требует модернизации некоторых систем и электронных модулей.

	Параметр	LHC	HL-LHC	Фактор
	Параметр	LIIC	THE LITE	увеличения
LHC	Пиковая светимость $(cm^{-2}c^{-1})$	10 ³⁴	5×10 ³⁴	5
	Пайлап	30	150	5
	Интегральная светимость (фбн ⁻¹)	300	3000	10
CMS	Частота триггера L1 (кГц)	100	750	7.5
	Задержка триггера L1 (мкс)	3.2	12.5	3.9
	Пропускная способность DAQ мюонной системы		×10	×10

Таблица 2.1. Требования к характеристикам мюонной системы для работы в условиях высокой светимости LHC.

На детекторы, расположенные на внутренних кольцах четырех мюонных станций: ME1/1, ME2/1, ME3/1 и ME4/1 (обобщенно: MEx/1) устанавливаются более быстродействующие электронные модули, которые соответствуют требованиям для работы в условиях высокой светимости LHC: задержке триггера 12.5 мкс и максимальной частоте триггера 750 кГц.

Большинство обновлений будет выполнено в период LS3. Однако, поскольку период LS3 будет крайне загруженным, принято решение заменить накамерную электронику на 108 детекторах MEx/1 в период длительной остановки LS2.

Для обеспечения низковольтного питания электроники камер MEx/1 спроектирован и изготовлен электронный модуль распределения низковольтного питания LVDB5 в количестве 120 штук. На камеры мюонной станции ME1/1 установлены новые платы хDCFEB с повышенным быстродействием. Для замены в период LS3 электроники в периферийных крейтах разрабатываются новые электронные модули управления триггером и считыванием данных (ОТМВ, ОDМВ). Кроме того, существующие оптоволоконные кабели, соединяющие электронику считывания CSC камер с модулями DAQMB в периферийных крейтах, будут заменены во время периода LS3 на оптоволоконные кабели с более высокой пропускной способностью.

В условиях высокой светимости LHC существенно возрастает радиационное воздействие на детекторы и электронику, приводящее к эффектам «старения» элементов конструкции CSC и радиационному повреждению компонентов электронных модулей. Общая доза облучения увеличится в 5 раз (требуемый коэффициент безопасности 3), одновременно в 5 раз увеличится частота событий и фоновая загрузка. В связи с этим, необходимо проверить и сертифицировать детекторы и электронику считывания для работы в условиях высокой светимости HL–LHC. Комплексное исследование старения детекторов проводится на установке GIF++ в ЦЕРН [15,16]. Облучение электронных модулей проводится на различных установках: CERN (CHARM), UC Davis (циклотрон) и TAMU (реактор).

3 Создание торцевых калориметров высокой гранулярности

Создаваемый калориметр с высокой гранулярностью HGCal является результатом глубокой модернизации торцевой части адронного калориметра (HCAL) установки CMS и позволит существенно увеличить пространственную и временную разрешающую способность детектора на следующем этапе работы ускорителя в условиях высокой светимости.

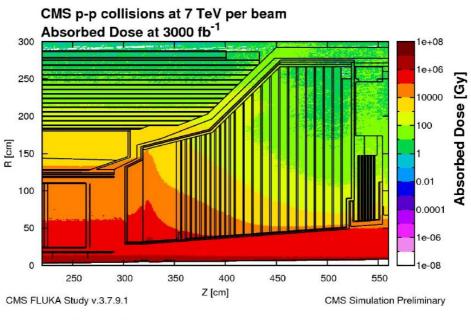
Для достижения точности калибровки на уровне нескольких процентов необходимо обеспечить оптимальное отношение сигнал-шум (S/N) для минимально-ионизирующей частицы (MIPs) во время всего периода набора интегральной светимости 3000 фбн⁻¹ (и выше). Это достигается за счет использования кремниевых ячеек небольшого размера (0.5–1 см²) и сцинтилляционных ячеек достаточно малого размера, позволяющих достичь высокой эффективности сбора света и S/N. Таким образом, увеличение гранулярности калориметра способствует четкой идентификации MIPs в каждой ячейке калориметра. Большая продольная сегментация необходима для обеспечения хорошего энергетического разрешения, особенно при использовании тонких активных слоев (Si-сенсоры толщиной 100–300 мкм). Высокая гранулярность и продольная сегментация приводит к большому количеству ячеек.

Основные требования к модернизации HCAL сформулированы в Проекте эксперимента CMS по созданию HGCal [4]:

- радиационная стойкость: полное сохранение энергетического разрешения после набора интегральной светимости 3000 фбн⁻¹, требуется хорошая межэлементная калибровка (≈3%) с использованием минимально ионизирующих частиц;
- *высокая плотность материала калориметра*: для сохранения поперечной компактности ливней;
- высокая поперечная гранулярность: для получения достаточно высокого соотношение S/N, позволяющего проводить калибровку с помощью MIP, для обеспечения разделения двух ливней и наблюдение узких струй, а также ограничить область, используемую для измерения энергии, чтобы минимизировать примесь энергии от частиц из наложенных взаимодействий (pile-up);
- высокая продольная сегментация: позволяет точно измерять продольное развитие ливней, обеспечивая хорошее энергетическое разрешение электромагнитной энергии (например, для $H \rightarrow \gamma \gamma$), распознавание образов и разделения частиц наложенных взаимодействий (pile-up);
- прецизионное измерение времени высокоэнергетических ливней для выработки решения триггера первого уровня: получение точной временной привязки каждой ячейки со значительным выделением энергии, способствующей детектированию энергии при большом количестве наложенных событий (pile-up), что обеспечивает идентификацию вершины выделенного взаимодействия.

Создаваемый калориметр должен обладать способностью выдерживать интегральные уровни излучения, которые в десять раз выше, чем предполагалось в оригинальной конструкции CMS. Моделирование с использованием FLUKA (рисунок. 3.1) указывает на то, что самый высокий флюенс составляет около 10^{16} н_{эк}/см², а самая высокая доза — около 2 мГр. Исследования, проведенные несколькими группами, показали, что кремниевые датчики сохраняют достаточный сбор заряда даже после того, как были подвергнуты воздействию нейтронов с флюенсом до 1.5×10^{16} н_{эк}/см² (где н_{эк}/см² обозначает число эквивалентных нейтронов с энергией 1 МэВ на квадратный см), что на 50% выше, чем ожидается при интегральной светимости 3000 фбн $^{-1}$. Поэтому

такие детекторы были выбраны в качестве активного материала для основной части модернизации торцевых калориметров. Для того чтобы кремниевые датчики надежно работали после облучения и имели достаточно низкий энергетический эквивалент электронного шума, датчики должны работать при температуре около -30 ° С.



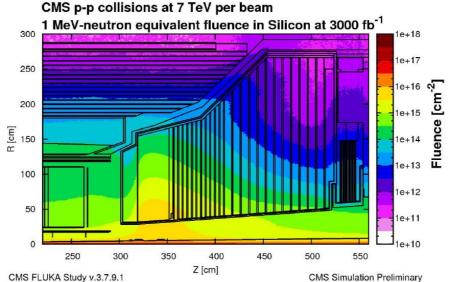


Рисунок 3.1. Доза ионизирующего излучения, накопленная в HGCAL после интегральной светимости 3000 фбн⁻¹ (верхний) и поток нейтронов, параметризованный как поток эквивалентных нейтронов с энергией 1 МэВ (нижний).

Предлагаемая конструкция использует также пластиковые сцинтилляторные ячейки, считываемые SiPMs, в задней части калориметра. В области, покрытой пластиковыми сцинтилляторами, максимальные уровни излучения соответствуют потоку $8\times10^{13}~{\rm H}_{\rm эк}/{\rm cm}^2$ и дозе 3 кГр. Чтобы радиационно-индуцированный энергетический эквивалент электронного шума был достаточно низким, SiPM также должны работать при температуре около -30° C. Следовательно, весь калориметр будет работать при температуре -30° C.

3.1 Структура HGCal

Калориметр HGCal состоит из последовательно расположенных слоев абсорбера, в зазоры между которыми помещены кассеты с активными элементами детектора. Подсистема конструктивно делится на электромагнитную (CE-E) и адронную части (CE-H).

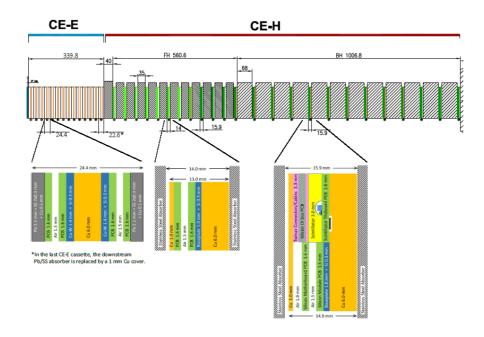


Рисунок 3.2 Продольная структура HGCAL с поперечными сечениями кассет трех типов: кассет СЕ-Е, кассет кремниевых сенсоров СЕ-Н и кассет смешанного типа кремния/сцинтиллятора СЕ-Н.

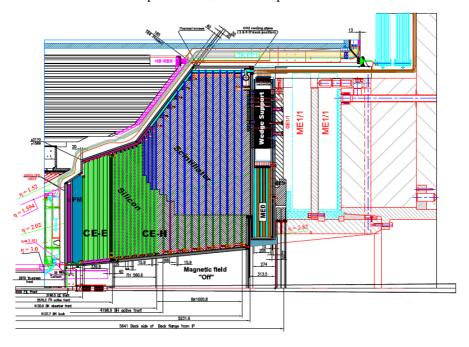


Рисунок 3.3. Продольно-поперечное сечение верхней половины торцевого калориметра: электромагнитный (СЕ-Е) и адронный (СЕ-Н) модули. Части калориметра, показанные как зеленая (слева внизу) и серая (справа внизу) области, оборудованы кремниевыми детекторами.

Продольная структура (вдоль направления пучка) включает 47 слоев (рисунок 3.2). Первые 26 слоев образуют электромагнитную секцию калориметра (СЕ-Е). Следующие 21 слой образуют переднюю часть адронной секции (СЕ-Н): первые 7 слоев внутренней части СЕ-Н аналогичны слоям СЕ-Е, а последние 14 в области малого радиуса (область сильной радиационной нагрузки) включают в себя как кремниевые модули, так и сцинтилляторные ячейки с регистрацией света с помощью SiPM. За счет использования двух технологий изготовления активных элементов — на основе полупроводников (кремневые сенсоры в СЕ-Н и внутренней части СЕ-Н) и сцинтилляторов (в СЕ-Н) — достигается оптимизация стоимости НGCal при сохранении требуемых характеристик.

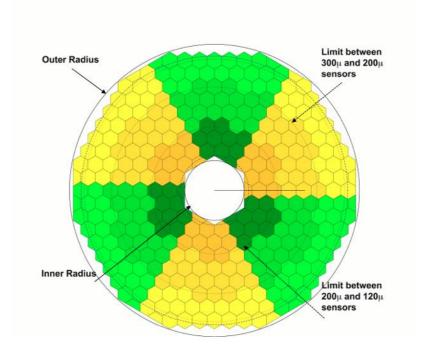


Рисунок 3.4. Схема слоя, в котором присутствуют только кремниевые активные элементы.

Весь калориметр находится в теплоизолированном объеме, который будет охлаждаться двухфазной газовой системой (CO_2) при температуре -30°C. Полное продольное поперечное сечение верхней половины одной торцевой крышки показано на рисунке 3.3.

3.1.1 Кремниевые сенсоры СЕ-Н

Кремниевые сенсоры для СЕ-Е и внутренних частей СЕ-Н представляют собой плоские гексагональные кремниевые датчики, изготовленные на кремниевых пластинах диаметром 8 дюймов. Шестиугольная форма датчиков позволяет более эффективно использовать имеющуюся площадь круглых пластин по сравнению с квадратными или прямоугольными датчиками, минимизируя при этом отношение периферии к активной поверхности (рисунок 3.4). Вершины шестиугольных датчиков усечены, что обеспечивает зазор для установки/фиксации системы и еще больше увеличивает использование поверхности пластины. HGCal включает около 27 000 кремниевых детекторных модулей (АСЕЕ) в его электромагнитной (СЕ-Е) секции и части адронной (СЕ-Н) секции. Модуль АСЕЕ представляет собой набор компонентов, как показано на рисунке 3.5.

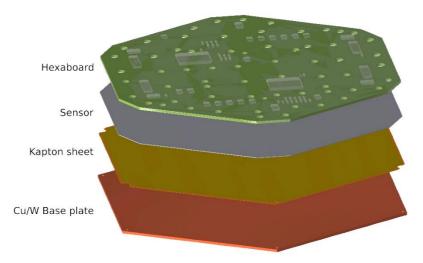


Рисунок 3.5. Конструкция кремниевого активного элемента.

3.1.2 Сцинтилляционные модули СЕ-Н

Наряду с кремниевыми модулями, адронный калориметр будет использовать сцинтиллятор в качестве активного материала в областях, где интегральная доза достаточно низка ($<3~\text{к}\Gamma p$), а поток нейтронов ограничен величиной $8\times10^{13}~\text{н/cm}^2$. Это позволяет обеспечить хорошую общую работоспособность в течение всего срока службы HL–LHC. В результате область $|\eta|>2.4$ покрывается исключительно кремниевыми датчиками.

Сцинтиллятор формируется в маленькие ячейки, и сцинтилляционный свет непосредственно считывается кремниевым фотоумножителем (SiPM), который оптически связан через небольшую "лунку" в центре одной из граней сцинтиллятора. SiPM монтируются на печатной плате, на которую затем устанавливаются сцинтилляторы. Эта система проиллюстрирована на рисунке 3.6.

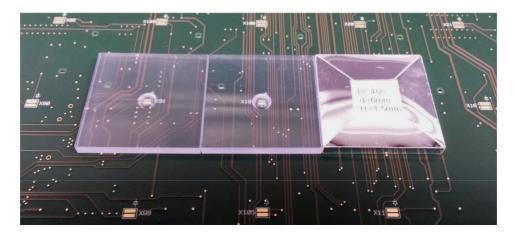


Рисунок 3.6. Пример трех ячеек сцинтиллятора, установленных на печатной плате. Два левых сцинтиллятора развернуты, чтобы показать SiPM внутри небольшого углубления в центре сцинтиллятора, в то время как самая правая пластинка обернута отражающей фольгой.

Технология SiPM-on-tile использует прямой съем света от сцинтилляционной ячейки с помощью SiPM, который собирает свет через лунку на поверхности сцинтиллятора. Лунка обеспечивает механическое пространство для установки SiPM и улучшает равномерность отклика по всей плитке за счет уменьшения отклика для

частиц, которые проходят близко к SiPM, по сравнению с теми, которые находятся на большем расстоянии.

МІР, проходящая через неповрежденную пластину сцинтиллятора, генерирует более 20 фотоэлектронов. Тестовые измерения демонстрируют несколько важных геометрических соотношений: (i) величина сигнала МІР пропорциональна обратному квадратному корню из площади поверхности плитки, поэтому чем меньше плитка, тем больше выход фотоэлектронов из МІР; и (ii) выход фотоэлектронов также линейно увеличивается с площадью SiPM. Измерения также показывают удвоение выхода фотоэлектронов, когда в качестве оберточного материала сцинтиллятора используется пленка усиленного зеркального отражателя VM2000 (ESR).

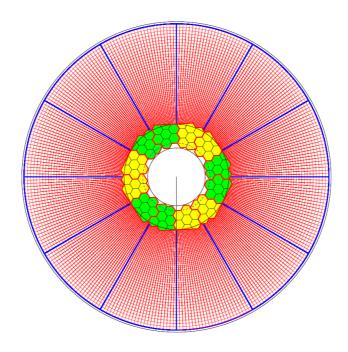


Рисунок 3.7. Расположение кремниевых пластин и сцинтилляционных ячеек в кольцевом слое CE-H.

Чтобы соответствовать геометрии торцевой чести CMS, ячейки сцинтиллятора будут расположены радиально. В результате ячейки ближе к линии пучка будут значительно меньше (4 см²), чем ячейки на внешнем крае (32 см²). Область, измеряемая сцинтиллятором, подразделяется на модули, которые образуют кольцевые сегменты площадью до 40–50 см² (см. рисунок 3.7).

3.1.3 Кассеты

Датчики в каждом слое HGCal сгруппированы в 30^{0} или 60^{0} сектора, называемых кассетами. Это основные узлы детекторов HGCal, которые впоследствии собираются в полные диски в CE-E или вставляются между слоями поглотителя для формирования полных дисков детекторов в CE-H. В электромагнитной секции слои поглотителя являются частью кассеты, а CE-E состоит из стопки кассет, поддерживаемых полнодисковой задней пластиной и внутренним конусом на границе η =3. В адронной секции поглотители и кассеты независимы друг от друга.

В первых восьми слоях адронного калориметра используются кассеты с кремниевыми модулями. На рисунке 3.8 представлена схема кассеты. Она построена путем укладки шестиугольных кремниевых модулей на охлаждающей пластине, которая обеспечивает основную механическую жесткость кассеты. Материнские платы

монтируются на рядах модулей и соединяются друг с другом, образуя непрерывную линию, которая подает низковольтные сигналы питания и управления на отдельные модули. Крышка служит только механическим и электрическим защитным слоем и поэтому изготовлена из меди толщиной 1 мм. При переходе от слоя к слою, хотя внутренний и внешний радиусы кассет изменяются, радиальное положение модулей остается неизменным, ограниченным фиксированной черепицей шестиугольников фиксированного размера. Начиная со слоя 9 СЕ-Н, внешние кремниевые модули заменяются панелями сцинтиллятора/SiPM, и доля используемого сцинтиллятора постепенно растет к задней части СЕ-Н. Доля площади сцинтиллятора колеблется от 40% (в слое 9) до 90% в слое 16-24.

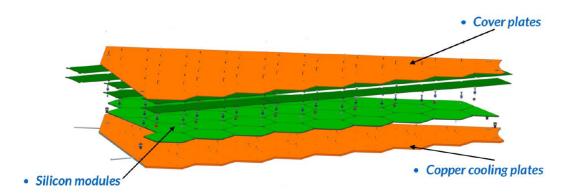


Рисунок 3.8. Схематическое расположение кассеты с кремниевыми модулями, показывающее расположение кремниевых модулей и конфигурацию материнской платы.



Рисунок 3.9. Опытный экземпляр кассеты на испытательном стенде.

3.2 Панели охлаждения калориметра HGCal

Кассеты адронной части калориметра различаются по типу устанавливаемых активных элементов на CE-H (Si) с кремниевыми сенсорами, конструктивно собранными в 6-дюймовые гексагональные модули, и CE-H (mixed) — кассеты со смешанным набором активных элементов: кремниевых модулей на малых радиусах и сцинтилляторных модулей на внешней стороне кассеты. Общее количество слоев в адронной части калориметра — 21 (согласно проекту "Scenario 13", см. рисунок 3.10).

Основным механическим элементом кассет являются медные панели, используемые как конструктивный элемент для монтажа модулей сцинтилляционных и/или

кремниевых детекторов, печатных узлов считывающей электроники, а также как часть абсорбера калориметра. Панели изготавливаются из высокочистой бескислородной листовой меди толщиной 6.3 мм и обеспечивают отведение тепла от активных элементов кассеты.

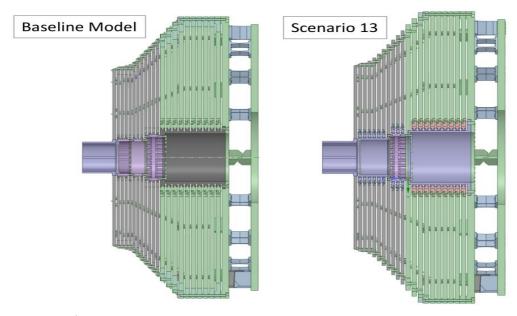


Рисунок 3.10. Общая схема расположения СЕ-Н секции калориметра HGCAL. Серым цветом отмечены поглотители секции СЕ-Н (Si), зеленым – СЕ-Н (Mixed), белым – зазоры для монтажа изготавливаемых кассет. "Scenario 13" – проект калориметра с уменьшенным количеством слоев.

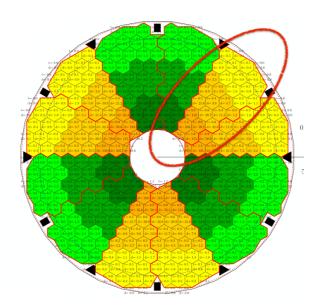


Рисунок 3.11. Общий вид разбиения слоя L29 на отдельные панели.

Панель охлаждения состоит из несущей медной пластины с набором монтажных отверстий и пазом сложной формы, предназначенным для монтажа (пайкой) трубки контура охлаждения. Панель предназначена для обеспечения неравномерности температуры по поверхности в пределах $1-2^{\circ}$ С при номинальной рассеиваемой мощности за счет регулирования расхода охлаждающей жидкости по контуру охлаждения.

Каждый слой калориметра разбит на 12 сегментов, которые попарно составляют идентичные 60-градусные секции (рисунок 3.11).

3.2.1 Производство панелей охлаждения калориметра HGCal

В рамках проекта предполагается изготовление и поставка в CERN панелей охлаждения адронной части (CE-H) калориметра HGCal (рисунок 3.12).

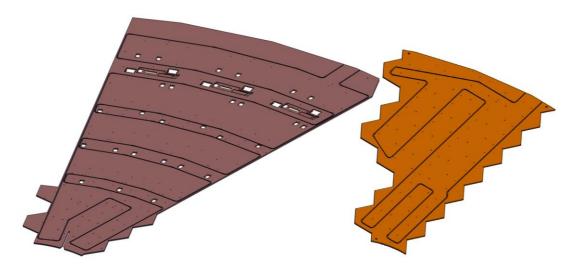


Рисунок 3.12. Общий вид панелей охлаждения (эскизы элемента L49-D и L29-B).

Общее количество требуемых изделий – 546 панелей с учетом запасных изделий из расчета $5{\text -}10\%$ от общего количества.

Требуемый график поставки панелей в CERN:

- первые панели должны быть поставлены в декабре 2022/январе 2023 г.;
- два полных слоя наибольшего размера (24 панели) должны быть поставлены в апреле 2023 г.;
- 50% панелей должны быть поставлены до сентября 2023 г.;
- 100% панелей, с учетов всех требуемых запасных панелей, должны быть поставлены к маю 2024 года.

Материалы, рекомендованные для изготовления изделия:

Полутвердая бескислородная медь марки Cu-PHC (согласно Европейскому стандарту EN 13599), R240 (твердость H065). Допустимы также марки CU-OFE и CU-ETP, а также твердость выше H065. Толщина листовой меди -6.35 мм (0.25 in.) \pm 0.30 мм, допуск по плоскостности в горизонтальном положении — не выше 0.05/200 мм.

Трубка охлаждения: нержавеющая сталь с диаметром 4 мм и толщиной стенок 0,5 мм.

Фитинги для трубки охлаждения: Swagelok SS-2-VCR-1, SS-2-VCR-3-BL.

Припой: оловянно-свинцовый легкоплавкий припой (60%/40% SnPb) с температурой плавления $\sim 180^{\circ}$ С произвольного производителя.

Флюс: рекомендован KESTER 135 в виде пасты, допустим аналог. Недопустимо использование активного/кислотного флюса.

3.2.2 Прототипы панелей охлаждения

За последние годы исполнителями проекта с привлечением предприятия ТЧУП Артмаш (Минск) создано два прототипа панелей охлаждения (рисунок 3.13) и отработаны технологии неразрушающей транспортировки изделия в инструментальном

цеху, точной привязки различных зон обработки, работы с материалом недостаточной плоскостности и др.



Рисунок 3.13. Первый прототип панели охлаждения перед отправкой в CERN.

Экспериментально опробованы различные методы локального нагрева пластины в процессе пайки, различные марки флюса, различные техники лужения. Необходимо отметить, что процесс пайки является наименее автоматизированным и требует дальнейшей доработки перед началом массового производства.

Использование процесса пайки требует предварительного покрытия трубы слоем медно-никелевого сплава, который имеет тенденцию отслаиваться при последующей прецизионной гибке трубки и, следовательно, требует наличия оборудования для покрытия трубы после гибки. В то же время технология монтажа с использованием теплопроводящего клея лишена этих недостатков, однако вопрос ее долговечности требует дополнительного исследования.

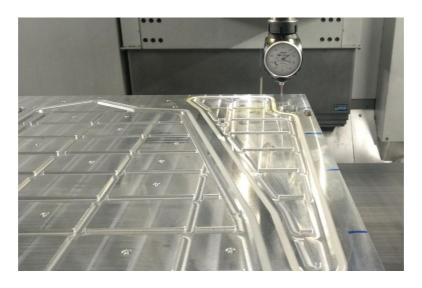


Рисунок 3.14. Вакуумный стол для прототипа панели L29В.

Экспериментально установлены оптимальные толщины гальванического покрытия трубки для исключения сколов покрытия при изгибе. При достаточно тонком слое никеля возможны последующие изгибы трубки. Таким образом размер ванны для гальванического покрытия может быть существенно уменьшен.

Экспериментально определен требуемый допуск по плоскостности в горизонтальном положении — не выше 0.05/200 мм. Установлено, что такая плоскостность обеспечивает правильное положение заготовки в станке.

Установлено, что для изготовления панелей небольших размеров следует использовать вакуумный стол для надежной фиксации изделия (рисунок 3.14). Панели больших размеров достигают нужной плоскостности на станке под собственным весом.

Первый из созданных прототипов прошел успешные испытания в FNAL. Были выдержаны все геометрические допуски, кроме требований к плоскостности панели. В результате было решено ослабить требования по толщине и плоскостности для удовлетворения возможностям производства.

Второй прототип будет представлен для испытаний в апреле 2021 года.

На предприятии Артмаш (Минск), изготовившем прототипы и планирующем принять участие в тендере на изготовление панелей, создана и готова к дальнейшему использованию необходимая оснастка:

- стол предварительного нагрева с автоматизированным контролем температуры; Несколько независимых зон нагрева позволяют работать со всеми типоразмерами изделия;
- координатный стол для прецизионной гибки трубки;
- вакуумный стол для фиксации панелей меньшего размера;
- минимальный стенд для тестирования герметичности сварных швов.

3.2.3 Процедура выбора предприятия-изготовителя и поставщиков материала

Выбор предприятия-изготовителя будет осуществлен на основе тендера, планируемого на начало 2022 года. Возможен выбор нескольких предприятий для выполнения различных технологических процессов.

Предложение участвовать в будущем тендере разослано широкому кругу предприятий, специализирующихся на прецизионной обработке металла. Два белорусских предприятия уже объявили о готовности выполнить массовое производство панелей охлаждения в расчетный срок.

В 2021 году будет изготовлен ряд прототипов для проверки технологических возможностей потенциальных участников тендера.

На различных этапах производства предполагается участие дополнительно 2–3 предприятий для выполнения отдельных технологических операций (гальваническое покрытие, метрологические испытания и др.).

Выбор поставщика листовой меди будет осуществлен на основе предложений не менее 3 поставщиков в 2022 году. Предприятиям-изготовителям меди разосланы запросы на коммерческие предложения с возможностью поставки 1–2 пластин в течение 2021 года для контроля качества и изготовления дополнительных прототипов.

Закупка трубки охлаждения и фитингов предполагается из одного источника – у предприятий-производителей, рекомендованных CERN.

Результаты тендеров могут привести к изменению общей стоимости работ.

3.3 Проведение комплексных испытаний кассет HGCal

Работоспособность и характеристики собранных кассет СЕ-Е и СЕ-Н требуется проверить в охлажденном состоянии до -30° С. Подготовленные для тестирования кассеты планируется размещать в теплоизолированной камере между двумя сцинтилляционными плоскостями, детектирующими космические частицы,

проходящие через весь набор детекторов. В сборочной зоне требуется разместить две таких камеры. Количество камер определяется 14 дневным периодом тестирования кассет в охлажденном до -30° С состоянии. Планируется попеременно использовать камеры для проведения «холодных» испытаний детекторов в одной комнате и параллельно проводить сервисные работы по извлечению исследованных кассет и подготовке к испытаниям новой партии кассет в другой камере. Такой режим обеспечит непрерывный процесс производства и испытания.

Охлаждение кассет планируется осуществлять по рабочей схеме с использованием перфторогексана C6F14 в качестве охлаждающей жидкости вместо CO₂. Внешний вид и расположение холодильных камер показаны на рисунке 3.15. и рисунок 3.16.

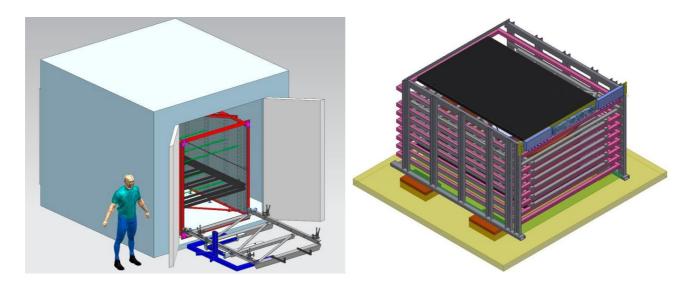


Рисунок 3.15 Схематический вид холодильных камеры и загрузочной платформы.



Рисунок 3.16. Расположение холодильных камер в сборочной зоне HGal в здании SXA5.

Согласно Приложения №14 к Меморандуму о взаимопонимании в области сотрудничества по созданию детектора CMS (Дополнения №3 и №4) [8] и Меморандуму о взаимопонимании по участию ОИЯИ в проекте HGCal CMS [10] областью ответственности ОИЯИ является:

- 1. Проектирование, строительство, ввод в эксплуатацию и эксплуатация испытательной установки двойного назначения (испытания кассет СЕ-Е и СЕ-Н), многокассетной холодильной камеры. Этот объект будет создан в 2021–2022 гг. в здании CERN SXA5. Объект будет эксплуатироваться в 2022–2025 гг.
- 2. Входной контроль и диагностика в здании CERN SX5 CE-Н кассет, поступающих из ФНАЛ в ЦЕРН. Сроки выполнения 2022–2025 гг.
- 3. Сборка и ввод в эксплуатацию детекторов HGCAL, включая установку кассет в поглотитель, интеграцию секций СЕ-Н и холодные испытания полностью собранных торцевых калориметров HGCAL. Эта деятельность должна состояться в 2023–2026 гг. в здании CERN SX5.

3.4 Оценка затрат на участие в создании HGCal

Обязательства по созданию торцевых калориметров высокой гранулярности HGCal установки CMS определены в Приложении №14 к Меморандуму о взаимопонимании в области сотрудничества по создании детектора CMS (Дополнения №3 и №4) [8] и в Меморандуме о взаимопонимании по участию ОИЯИ в проекте HGCal CMS [10].

Общий объем вклада ОИЯИ (RDMS–DMS) в $CORE^1$ на эти работы определен в размере 2200 тыс. шв. франков. ОИЯИ несет ответственность за:

- создание охлаждающих панелей HGCal (вклад по CORE 1210 тыс. шв. франков);
- закупку кремневых сенсоров (вклад по CORE 700 тыс. шв. франков);
- закупку SiPM (вклад по CORE 200 тыс. шв. франков);
- создание стенда для тестирования кассет (вклад по CORE 90 тыс. шв. франков);
- проведение тестирования кассет, сборку и ввод в эксплуатацию HGCal.

Общий объем вклада ОИЯИ (RDMS–DMS) в CORE на работы по созданию охлаждающих панелей HGCal определен в размере 1 210 тыс. шв. франков. Сумма включает оценочную стоимость материала и следующие работы: механическую обработку медных листов, запайку трубки охлаждения и транспортировку в CERN. Отметим, что использованная CERN оценка стоимости медных листов 6 долл./кг существенно уступает рыночной стоимости меди в 2021 году (около 9 долл./кг).

В результате опыта, накопленного на изготовлении прототипов панелей охлаждения, определен ряд дополнительных затрат, необходимых для производства панелей охлаждения, но не предусмотренных в таблице 3.1:

- входные метрологические испытания медных листов для определения оптимальной ориентации панелей;
- метрологический контроль изготовленных панелей для исключения поставки некачественных изделий;
- гальваническое покрытие Ni+Cu и предварительное лужение трубки охлаждения и канавки перед процедурой пайки;
- таможенные пошлины и НДС на ввозимое сырье.

Стоимость изготовления также зависит от стоимости энергоресурсов.

¹ Значение CORE (Cost of Resource Exchange) определяет только прямые затраты; он исключает связанные с этим расходы на рабочую силу, колебания обменного курса, затраты на создание прототипа, затраты на НИОКР и т. д. Он включает такие элементы, как компоненты, производственные материалы (но не материалы института) для производства, внешние компоненты сборки, установку, тестирование и ввод в эксплуатацию.

Наиболее энергозатратным является процесс пайки: мощность стола предварительного нагрева для деталей с линейным размером до 1.5 метра -10 кВт (208 деталей), для деталей большего размера -17 кВт. Ориентировочное время работы стола -1 рабочая смена (8 часов) на деталь.

Предполагается отгрузка изделий партиями по ~40 панелей с периодичностью 1 раз в месяц. Стоимость тары и упаковки будет известна после согласования. В настоящее время идет обсуждение возможностей минимизации расходов на упаковку и транспортировку.

Таблица 3-1. Оценка стоимости изготовления (в долл. США) панелей охлаждения наименьшего СЕ-H(Si) и наибольшего размера СЕ-H(mixed). Затраты на обработку усреднены по этапам производства.

	CE-H(Si)	CE-H(mixed)
Масса деталей кг	41,4	82,8
Стоимость килограмма меди	9,0*	9,0*
Стоимость меди	372,6	745,1
Стоимость меди с учетом отходов (30%**)	484	969
Материал охлаждающей трубки	40	100
Материал – другое (фитинги, припой, флюс,)	30***	30***
Механическая обработка, включая хранение, перемещение, межоперационный контроль, нарезание резьб, калибровка высокоточных отверстий, обработка охлаждающей пластины по контуру, изготовление канавки под трубку.	420	840
Правильно-отрезная операция трубки. Гибка трубки.	10	10
Сварка наконечников орбитальной установкой	5	5
Гальванопокрытие трубки. Лужение.	150	200
Пайка	200	400
Поставщик инжиниринга, в среднем за производство	50	50
Метрология	100****	100****
Итого стоимость изготовления с учетом материала (без таможенных платежей и транспортировки) / изделие	1 489	2 704
Итого стоимость изготовления / изделие	935	1 605

^{*} согласно биржевой цене меди в марте 2021 г. (Для сравнения: в расчете CERN использована стоимость 6,0 долл./кг)

С целью исключить обязательную олату НДС на ввозимые материалы, рассматривается возможность привлечения CERN для организации процедуры закупки материала (в первую очередь, листовой меди) и его последующей передачи производителю в качестве давальческого сырья. Ожидается, что такой подход позволит сократить расходы на сумму более 100 тыс. долл.

Стоимость материалов зависит не только от поставщика, но и от возможности дополнительного раскроя для минимизации отходов.

Прорабатывается возможность организации предварительной резки листовой меди на предприятиях страны происхождения материала. Такой подход позволит сократить на 20–30% вес транспортируемого сырья и размер ожидаемых таможенных пошлин.

^{**} зависит от конфигурации поставляемых листов

^{***} сложно оценить на данном этапе, но не более 50\$ за изделие,

^{****} зависит от необходимости привлечения аккредитованных лабораторий.

Дополнительную экономию представляет возможный возврат обрезков материала заводу-изготовителю.

Для оценки общей стоимости массового производства на основании предварительной спецификации и предоставленных FNAL чертежей двух панелей (29В и 49D) были сделаны следующие допущения.

Из 21 слоя калориметра (в проекте "scenario 13") 6 слоев близки по размерам к изготовленному прототипу СЕ-Н (Si), 15 – к прототипу СЕ-Н (mixed). Расчет стоимости панелей на этапе массового производства приведен в таблице 3.1:

- таможенные пошлины на материал оценены из расчета 10% от стоимости материала. НДС на ввозимый материал не учитывался;
- стоимость упаковки и транспортировки в CERN оценена из расчета отправки 12 контейнеров по 40–60 пластин.

Таблица 3-2. Оценка общей стоимости (в долл. США) изготовления и поставки панелей охлаждения.

	CE-H (Si)	CE-H (mixed)
Стоимость изготовления с учетом материалов / изделие (Табл. 3–1)	1 489*	2 704*
	(для слоя	(для слоя
	минимального	максимального
	размера)	размера)
Стоимость материалов / изделие (Табл. 3–1)	554*	1 099*
	(для слоя	(для слоя
	минимального	максимального
	размера)	размера)
Количество слоев	7	14
Количество запасных пластин	14	28
Общее количество пластин	182	364
Стоимость изготовления с учетом материалов	296 283**	928 021**
В т.ч. стоимость материалов	94 522 **	404 045 **
Таможенные платежи на (на ввозимые материалы)	9 452	40 404
Упаковка, транспортные расходы 48 000		000
Итого стоимость изготовления	1 32	2 161

^{*} см. замечания к табл. C1 о неопределенности в оценке. В частности, для оценки стоимости меди использована биржевая стоимость в марте 2021 г. Результаты тендеров на закупку материалов и изготовление могут привести к изменению общей стоимости работ.

Согласно расчетам, представленным в таблицах 3.1 и 3.2, стоимость работы составляет 1 322 161 долл. США. Результаты тендеров на закупку материалов и изготовление могут привести к изменению общей стоимости работ.

Средства, выделенные в 2022 году, преимущественно будут израсходованы на закупку материалов и изготовление первой партии панелей (предварительно – 2 полных слоя, 24 панели). Средства 2023–2024 гг. будут израсходованы на изготовление и транспортировку панелей в CERN.

Оценка необходимости финансирования по годам (см. таблицу 3.3):

^{**} В расчете использованы масштабные факторы для учета различия в геометрических размерах слоев. Объем части работ пропорционален площади детали, части –линейному размеру, части – не зависит от размера. Внешние радиусы слоев согласно проекту "Scenario 13": 1646,7; 1676,2; 1705,7; 1735,2; 1776,6; 1870,9; 1965,1 (все – CE-H/Si); 2059,3; 2153,5; 2247,7; 2341,9; 2436,2; 2530,4; 2624,6; 2624

- 2022: до 100% стоимости материалов и 10% стоимости производства, 10% транспортных расходов;
- 2023: 60% стоимости изготовления, 50% транспортных расходов;
- 2024: 30% стоимости изготовления, 40% транспортных расходов.

Таблица 3-3. Оценка объема финансирования по годам выполнения проекта (долл. США).

	2022	2023	2024
Закупка материалов (включая таможенные пошлины)	548 424*	0	0
Изготовление пластин охлаждения	72 576*	435 440*	217 721*
Упаковка и транспортные расходы	4 000	24 000	20 000
Итого	625 000	459 440	237 721

^{*} Результаты тендеров на закупку материалов и изготовление могут привести к изменению общей стоимости работ.

В рамках соглашения между ОИЯИ и ЦЕРН об участии в создании торцевых калориметров высокой гранулярности, областью ответственности ОИЯИ является участие в работах по созданию адронной части HGCal кассет смешанного типа СЕ-Н [10]. Они включают следующие разделы:

- создание низкотемпературных камер для испытания кассет после сборки и транспортировки в ЦЕРН, 96 тыс. долларов США, включая 90 тыс. долларов США гранта дирекции ОИЯИ на 2021 год. Транспортировка камер в ЦЕРН, монтажные и эксплуатационные расходы составляют 50 тыс. долларов США;
- проектирование и конструирование триггерных счетчиков и связанной с ними электроники для проведения испытаний активных модулей HGCal с помощью космических лучей в низкотемпературных камерах. Для этого требуется проектирование сцинтилляционных счетчиков и механической конструкции триггерной системы, разработка системы высоковольтного питания фотоумножителей и связанной с ними регистрирующей электроники, оценочная стоимость материалов и оборудования составляет 20 тыс. долларов США. Работы по обслуживанию и эксплуатации оборудования непосредственно во время проведения тестовых испытаний кассет в течение 4-х лет составляет 42 тыс. долларов США;
- проведение испытаний кассет CE-H перед установкой в поглотитель HGCal. Согласно план-графику, для выполнения работ потребуется участие специалистов от ОИЯИ в течение 4-х лет, 264 тыс. долларов США;
- проведение Монте-Карло расчетов отклика калориметрических модулей на приходящую минимально-ионизирующую частицу и разработка алгоритмов для выделения сигналов от частиц на шумовом фоне.

3.5 План-график работ по сборке и установке торцевых калориметров

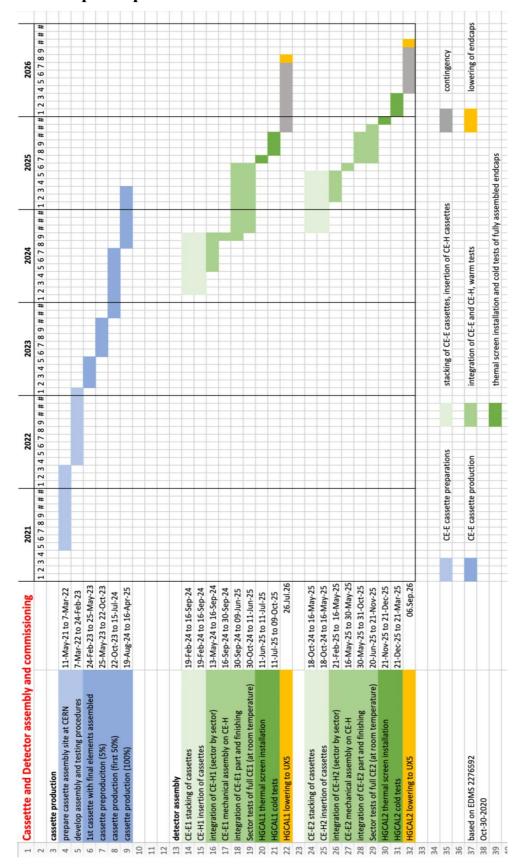


Рисунок 3.17. План-график работ по сборке и установке торцевых калориметров.

4 Модернизация детекторов торцевой мюонной системы

Основной задачей модернизации торцевой мюонной системы CMS в период LS2 является замена электроники считывания CSC внутренних мюонных станций MEx/1 (всего 180 камер).

Период LS3 посвящен существенной модернизации CMS — созданию новых детекторных систем: мюонной станции ME0 на основе детекторов GEM, адронного калориметра с высокой гранулярностью HGCAL и торцевой станции временной синхронизации (Endcap Timing Layer, ETL). Интеграция кабелей и сервисов, указанных выше детекторов, подразумевает значительную модернизацию и реинтеграцию торцевого диска YE1, так как имеющиеся на диске радиальные кабельные лотки не смогут вместить все коммуникации систем HGCAL, ME1/1, ME0, RE. Наряду с этим, потребуется модернизация распределительных панелей камер ME1/1, расположенных на дисках YE1. Для освобождения пространства для укладки кабелей HGCAL, которые планируется проложить поверх ME1/1 камер, требуется уменьшить высоту разъединительных панелей.

Основные направления и задачи участия группы ОИЯИ в модернизации торцевой мюонной системы CMS состоят в следующем.

- Модернизация электроники в период LS2 и подготовка к периоду LS3.
 - проектирование и производство 120-ти новых электронных модулей распределения низкого напряжения (LVDB-5);
 - изготовление 120 кабелей референсного напряжения;
 - проектирование и изготовление испытательного стенда для плат LVDB;
 - модернизация и производство высоковольтных фильтров для ME1/1 CSC планируется установить на камеры в период LS3 (всего 72 платы);
 - модернизация и производство 36 разъединительных панелей ME1/1 (планируется установить на YE1 диски).
- Переоборудование CSC, расположенных на внутренних кольцах мюонных станций MEx/1, тестирование, сборка и монтаж CSC в течение периода LS2.
 - проектирование и создание инфраструктуры для модернизации камер MEx/1 CSC (зона и стенды для испытаний);
 - демонтаж камер МЕ1/1;
 - установка и испытание высоковольтных фильтров для камер МЕ1/1;
 - замена и испытание оптических кабелей камер ME1/1 планируется в период LS3;
 - модернизация системы охлаждения камер МЕ1/1;
 - производство и установка новых кабелей и сервисов камер МЕ1/1;
 - переоборудование, установка и ввод в эксплуатацию мюонных камер MEx/1.
- Продолжение разработки и тестирования алгоритма реконструкции трек-сегмента в CSC.
- Продолжение исследования старения CSC на установке GIF++ ЦЕРН.
 - изучение характеристик CSC в пучке мюонов в режиме HL-LHC с некоррелированным фоном;
 - изучение методов устранения эффекта Мальтера в CSC.
- Участие в исследованиях новых газовых смесей для CSC торцевой мюонной системы.

4.1 Модернизация, тестирование, сборка и установка MEx/1 CSC

Всего 180 камер должны быть демонтированы из CMS, перемещены в "наземную" лабораторию модернизации CSC (рисунок 4.1), оснащены новой электроникой,

протестированы и, наконец, повторно установлены в экспериментальном зале CMS. Инфраструктура лаборатории по модернизации камер включает в себя: зону хранения; зону переоборудования; зону испытаний, включая стенд долгосрочного испытания детекторов с подачей напряжением питания. Детекторы, прошедшие все испытания, маркируются как "готовые" к монтажу в экспериментальную установку CMS.

Для повышения надежности накамерной системы охлаждения мюонной станции ME1/1 разработана система охлаждения, не содержащая промежуточных соединений водяных труб, которые оказалась негерметичными. В период с июня по ноябрь 2019 года было изготовлено 72 новых контура охлаждения (рисунок 4.2). В настоящее время новые системы охлаждения установлены на все камеры ME1/1.



Рисунок 4.1. Лаборатория для модернизации CSC.

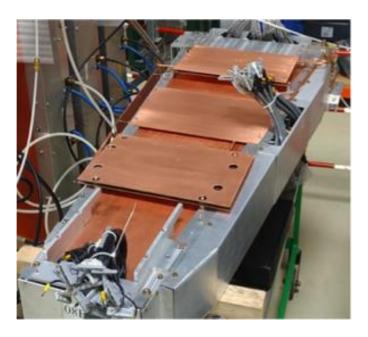


Рисунок 4.2. Система охлаждения на камере МЕ1/1.

На рисунке 4.3 показано пространственное разрешение CSC ME-1/1, полученное в экспериментах с космическими мюонами в течение 2-х периодов модернизации: LS1 (2013) и LS2 (2019, 2020). Данные ME1/1а и ME1/1b получены с «узкой» и «широкой» части CSC соответственно. DCFEB — это электронная плата считывания с катодных стропов, позволяющая получить точное пространственное разрешение CSC. Новая плата хDCFEB является улучшенной версией DCFEB. На рисунке видно, что результаты, полученные с разной электроникой, хорошо согласуются.

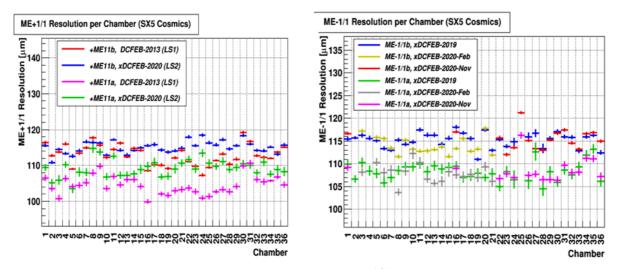


Рисунок 4.3. Пространственное разрешение CSC ME1/1, полученное в экспериментах с космическими мюонами в течение 2-х периодов модернизации: LS1 (2013) и LS2 (2019, 2020).

4.2 Модернизация электроники в период LS2

В рамках проекта по модернизации электроники для MEx/1 CSC в период LS2, сотрудники ОИЯИ приняли участие в проектировании, изготовлении и испытании 120 плат LVDB5 для распределения и контроля параметров низковольтного питания накамерной электроники модернизированных CSC. LVDB5 (рисунок 4.4) вырабатывает 22 выходных напряжения для питания пяти плат DCFEB и одной ALCT–288, расположенных на камере. Общий номинальный выходной ток платы LVDB5 составляет ~30A.



Рисунок 4.4. Плата распределения низковольтного питания LVDB5.

Автоматизированный стенд (рисунок 4.5) на базе процессорной платы Raspberry Pi3, разработан для функционального контроля и измерения параметров плат LVDB в процессе производства и обслуживания. Конструкция стенда позволяет проводить испытания всех типов распределительных модулей, используемых для различных CSC камер (LVDB, LVDB5 и LVDB7).

Радиационная стойкость LVDB5 исследована на специальной испытательной установке (стенд CHARM), расположенной на линии пучка Т8 в экспериментальном зале ускорителя PS в ЦЕРН (восточный зал), где первичный пучок протонов с энергией 24 ГэВ/с выходит из кольца PS.



Рисунок 4.5. Стенд для тестирования LVDB.

Внутри установки CHARM протоны облучают тестируемый объект, окруженный хорошо рассчитанной конфигурацией мобильно изменяемого экранирования. Различные области для размещения тестируемого образца, в которых симулируются реальные условия туннеля LHC, характеризуются разными типами облучения, которые, соответственно, приводят к различным типам радиационных повреждений. В туннеле БАК преобладают повреждения, вызванные частицами с очень высокой энергией, а также для экранированных экспериментальных залов характерны нейтроны, которые доминируют в энергетическом спектре радиационного облучения. Благодаря возможности изменять экранировку на установке CHARM возможно с высокой точностью моделировать различные условия облучения в реальных условиях на LHC.

Облучение платы LVDB проводилось в 2 этапа: ~ 1 неделя облучения до TID1 = 15 крад, перерыв 3 месяца и второй шаг до TID2 = 15 крад. Общая интегрированная доза облучения составила TID1 + TID2 = 30 крад. Эквивалентный поток нейтронов с энергией 1 МэВ составил $\sim 1.80 \times 10^{12}$ см⁻², а поток высокоэнергетических адронов $\sim 2.15 \pm 12$ см⁻². За оба периода облучения радиационного повреждения платы LVDB не наблюдалось.

Для продолжения НИР по исследованию радиационной стойкости плат распределения и контроля параметров низковольтного питания LVDB для CSC камер, планируется разработать и изготовить прототип платы на базе современных радиационно-стойких компонентов.

4.3 Модернизация высоковольтного фильтра для камер МЕ1/1

Анализ экспериментальных данных, полученных за время Run 1 и Run 2 для некоторых камер CSC, показывает, что ток утечки превышает номинальное значение в 10 раз и составляет ~ 300 нА. Это превышение не влияет на основные параметры камеры и качество регистрируемой информации, но уведомляет о проблеме старения компонентов и материалов фильтра, таких как: изоляционный состав заливки фильтра, печатная плата и соединительные провода. Планируется провести НИР по разработке и испытанию нового фильтра высокого напряжения для камер ME1/1, изготовить фильтры

и оснастить ими 72 камеры в течение периода LS3 (см. рисунок 1.1).

4.4 Модернизация соединительной панели МЕ1/1

Соединительные панели камер ME1/1 (ME1/1 ПП), расположенные на диске YE1, обеспечивают возможность отключения кабелей и сервисных соединений (газ и охлаждающая жидкость) при необходимости демонтажа камер ME1/1. МЕ1/1 ПП представляет собой сложное устройство, которое наряду с разъемами кабелей и сервисных соединений двух CSC включает в себя 2-е активные интерфейсные платы (PPIB) для обмена информацией с электронными модулями в периферийных крейтах (рисунок 4.6 и 4.7).

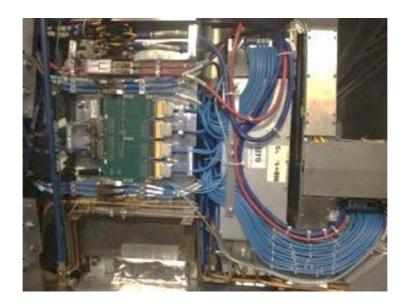


Рисунок 4.6. Соединительная панель МЕ1/1.

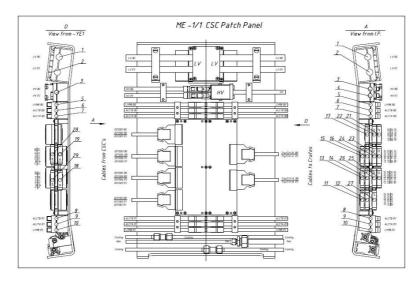


Рисунок 4.7. Чертеж соединительной панели МЕ1/1.

Модификация ME1/1 ПП требуется, чтобы освободить место для прокладки кабелей и сервисов нового калориметра HGCal. Доступное пространство над существующей ME1/1 ПП в пределах огибающей по радиусу R=2725 мм (рисунок 4.8) является основной проблемой в решении вопроса расположения кабелей HGCal.

Модернизированные коммутационные панели ME1/1 должны быть спроектированы и изготовлены до начала остановки БАК LS3 в $2024~\rm r.$, а установлены на дисках YE1 во время демонтажа камер ME1/1 в период LS3.

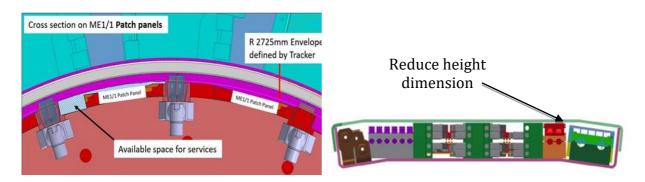


Рисунок 4.8. Расположение на диске YE1 и поперечное сечение соединительной панели ME1/1.

4.5 Развитие алгоритмов реконструкции трек-сегментов в CSC

Для улучшения качества реконструкции в CSC был разработан и протестирован алгоритм реконструкции трек-сегментов в CSC [17]. Новый алгоритм реконструкции трек-сегментов был имплементирован в официальный пакет программ CMS и используется как основной при реконструкции экспериментальных данных и моделировании. В мае 2019 года было произведено обновление алгоритма для повышения эффективности реконструкции сегментов в ME1/1 станции (см. рисунок 4.9). Результаты были доложены на нескольких совещаниях в ЦЕРН.

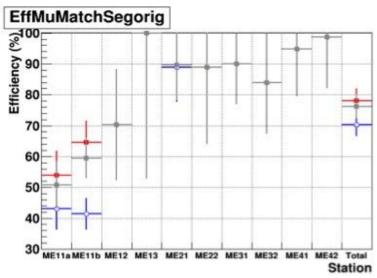


Рисунок 4.9. Эффективность реконструкции в CSC торцевой мюонной системы CMS для выбранных проблемных событий. Красный – предыдущий алгоритм, синий – актуальная версия RU алгоритма, серый – обновленный RU алгоритм.

В условиях большой множественности срабатываний стриповая координата с отдельно взятой плоскости СSC, которая должна обеспечить точность 2-5% от ширины стрипа, часто восстанавливается с плохой точностью (30–60% от ширины стрипа). Это связанно с тем, что для кластера, состоящего из перекрывающихся сигналов, при вычислении координаты используется обычный алгоритм центра масс.

Для улучшения точности реконструкции стриповой координаты, был разработан новый алгоритм с использованием «вэйвлет-анализа». Он способен разделять до 4-х перекрывающихся сигналов с высокой точностью (рисунок 4.10).

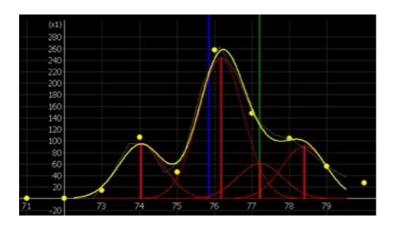


Рисунок 4.10. реконструкции перекрывающихся сигналов на отдельно взятой камере (зеленая линия — моделированная координата мюона; желтая — исходное распределение сигнала; синяя — координата, восстановленная стандартным алгоритмом; красная — перекрывающиеся сигналы, распознанные предложенным алгоритмом).

Среднеквадратичное отклонение реконструированной координаты от мюонной при использовании нового алгоритма в 2.5 раза меньше, чем при использовании стандартного алгоритма (рисунок 4.11).

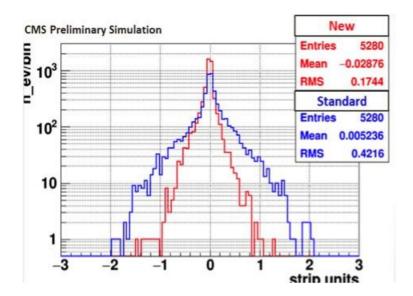


Рисунок 4.11. Разница между реконструированной и симулированной стриповыми координатами. Красным представлены результаты для нового алгоритма реконструкции, синим – для стандартного.

В связи с обновлением электроники, на камере ME1/1, которая обладает особой геометрией, была произведена настройка алгоритма по реконструкции координаты траектории частицы для отдельно взятой камеры. На рисунке 4.12 представлена частота реконструкции трек-сегментов в ME1/1 камере в зависимости от радиальной координаты R (расстояния до оси пучка) для стандартного алгоритма реконструкции сигнала (синяя линия) и модифицированного алгоритма с учетом особенностей геометрии камеры ME1/1 (красная линия). Как видно из рисунка, ликвидирована

неэффективность в узкой части камеры (R=115 см) и области разреза по стрипам ($R\sim150$ см).

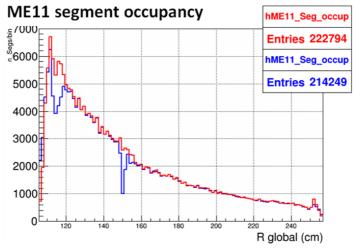


Рисунок 4.12. Частота реконструкции сегментов в ME1/1 камере в зависимости от R-координаты. Стандартный подход – синей линией, модифицированный – красной.

Дальнейшие планы по оптимизации алгоритма реконструкции сегментов треков:

- изучение пространственного разрешения CSC с экспериментальными данными Run 3;
- расчет фоновой загрузки CSC, индуцированной нейтронами, и оценка величины фона для условий работы LHC с высокой светимостью (HL–LHC);
- оптимизация временного разрешения CSC для подавления ложных срабатываний вне временного окна;
- определение "супер-сегмента" мюона в станциях ME1/1+ME0 для триггера первого уровня L1;
- определение сегментов в станции ME0 в области η>2,4 и поиск совпадений с детекторами HGCal и трекер;
- анализ данных GIF++ 2021–2022 гг. Подавление некоррелированного фона в CSC с помощью нового алгоритма построения сегментов;
- изучение разрешения и эффективности CSC с экспериментальными данными GIF++.

4.6 Участие в изучении эффектов «старения» CSC CMS на GIF++

Повышение светимости в результате будущей модернизации LHC приведет к значительному росту фоновых событий в детекторах частиц. В связи с этим представляется очень важным исследование эффектов "старения" в материалах и газах координатных детекторов. Такое исследование для CSC проводится группой сотрудников ОИЯИ, начиная с февраля 2016 г. на установке GIF++ (CERN) [15,16], имеющей источник гамма–квантов Cs137 активностью 14 ТБк (рисунок 4.13).

Мощность поглощенной дозы на расстоянии $0.5\,\mathrm{m}$ от источника составляет $1\,\mathrm{Гр/час}$. Система фильтров позволяет пошагово ослаблять поток гамма-квантов вплоть до $46\,\mathrm{тыc}$. раз. По территории GIF++ проходит выведенный канал пучков SPS CERN, что делает возможным проводить сеансы по тестированию детекторов, расположенных в зоне пучка на мюонах SPS. Установка имеет $2\,\mathrm{конусa}$ облучения — вдоль пучка и навстречу пучку с общей зоной экспозиции $100\,\mathrm{m}^2$. В качестве тестовых были выбраны камеры станций ME1/1 и ME2/1, как имеющие наибольший поток фоновых событий в CMS.

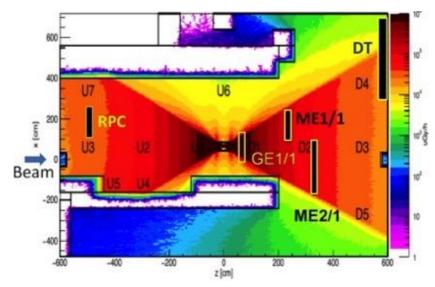


Рисунок 4.13. Радиационное поле источника установки GIF++.

Расчеты показывают, что при работе HL—LHC в течение 10 лет заряд, выделившийся на единицу длины анодной проволоки ME1/1, составит приблизительно 110 мКл/см. Доза, набранная на ME1/1 в 2016—2020 гг. превысила величину в 576 мКл на см анодной проволочки (см. рисунок 4.14, слева).

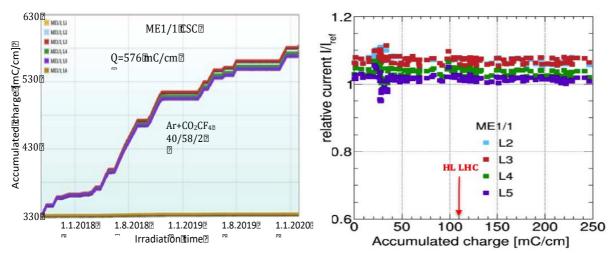


Рисунок 4.14. Накопленный заряд на единицу длины проволоки ME1/1 во времени (слева). Величина относительного тока в 4х облучаемых плоскостях в зависимости от накопленного заряда (справа).

В соответствии с оценками, набранная в 2017 г. доза соответствует дозе, которая могла быть получена за 3 периода 10-летней работы ускорителя HL-LHC. Рисунок 4.14 (справа) показывает величины относительного тока в камере ME1/1 – I/Iref. в зависимости от накопленного заряда для 4х облучаемых плоскостей камер. Iref. – это средняя величина токов в 2х мониторных плоскостей камер в момент кратковременного теста с включенным гамма-источником. Деградации относительного тока, в зависимости от дозы облучения, не наблюдается. Таким образом, можно заключить, что газовое усиление в камерах, в зависимости от накопленного заряда стабильно и СSC могут работать без радиационной деградации их параметров весь период HL-LHC.

В настоящее время облучение камеры ME1/1 на источнике установки GIF++ продолжается с газовой смесью $Ar+CO_2+CF_4$ с процентным содержанием компонентов (40/58/2). В смеси используется только 2 % CF_4 вместо обычных 10% для номинальной

газовой смеси. Считается, что добавление именно этого газа в рабочую смесь камеры позволяет связывать радикалы кремния и в газообразном состоянии удалять их из рабочего объема детектора. Это препятствует осаждению соединений кремния на анодные проволоки и продлевает жизнь камеры. Однако, вопрос необходимого количества СF₄ в смеси для предотвращения эффекта «старения» является открытым, так как в значительной степени этот процесс зависит от материала детектора, скорости продува газовой смеси, тока в зазоре анод-катод и т. д. Кроме того, использование CF₄, газа с высоким коэффициентом парникового потенциала равным 6500, в ближайшее время будет сильно ограничено и минимизация его расхода — важная задача для CMS. Проведение тестов с использование смеси с пониженным содержанием CF₄ — новый шаг в исследовании эффекта "старения" катодно-стриповых камер.

Изучение характеристик CSC в условиях HL-LHC при наличии некоррелированного фона

Как было отмечено выше, нейтронный фон в условиях HL-LHC приведет к росту ложных событий в мюонных камерах, что в свою очередь приведет к ухудшению пространственного разрешения мюонных станций CMS. В отличие от фоновых событий, связанных с регистрацией камерой дельта-электронов, сопровождающих мюоны высоких энергий, нейтронный фон считается некоррелированным с мюоном. По имеющимся экспериментальным данным были сделаны оценки средней величины тока в камере при достижении мгновенной светимости 5×10^{34} см $^{-2}$ с $^{-1}$. Для камер станции МЕ1/1 величина тока составила 10 мкА. На протяжении 2016-2018 гг. периодически проводились тестовые сеансы с набором данных мюонов без и в присутствии источника 4.15 представлены гамма-квантов. Ha рисунке результаты демонстрирующие пространственное разрешение CSC в зависимости от интенсивности облучения гамма-квантами при различных величинах заряда, аккумулированного на единицу длины анодной проволочки Q = (132-400) мКл/см. Для условий HL-LHC (на рисунках отмечены стрелками) можно ожидать, что пространственное разрешение станции МЕ1/1 ухудшится на 10%, а МЕ2/1 – на 16%. Кроме того, ухудшения пространственного разрешения, в зависимости от накопленной дозы, не наблюдается.

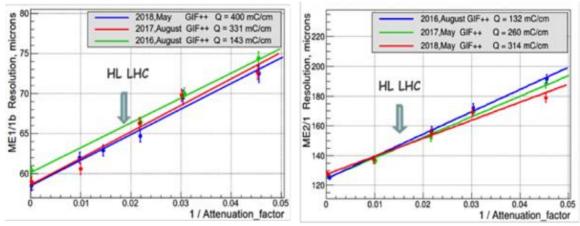


Рисунок 4.15. Пространственное разрешение камер ME1/1 (слева) и ME2/1 (справа) в зависимости от интенсивности облучения (по оси х отложена величина, обратная коэффициенту ослабления пучка гамма—квантов) при различных величинах заряда, аккумулированного на единицу длины анодной проволочки Q.

4.6.1 Изучение методов устранения токов Мальтера в CSC

Эффект Мальтера был описан Л. Мальтером в 1936 г. [18]. Данный эффект наблюдается в проволочных координатных детекторах, работающих в полях

ионизирующих излучений. Проблема возникает при наличии на катоде камеры пятна — к примеру изолирующего окисла, препятствующего рекомбинации ионов, образующихся при развитии лавины Таунсенда. При определенных условиях суммарный заряд данных ионов может создать поле, достаточное для электронной эмиссии из катода в газовый объём камеры. Возникает так называемый ток Мальтера, который существует в самоподдерживающемся режиме и значительно превосходит номинальный ток в зазоре анод-катод камеры.

На рисунке 4.16 красным показан Мальтер—ток в одной из 6 камер катодностриповой камеры ME1/1. Данные получены на сеансе в протон—протонных столкновениях на установке CMS. Остальные 5 камер имеют ток на уровне 3–4 мкА. Очевидно, что подобные токи являются разрушительными для поверхности анодных проволок и могут приводить к их обрыву.

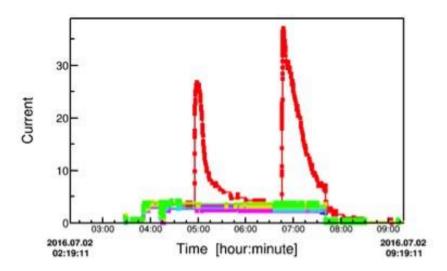


Рисунок 4.16. Мальтер—ток (красным) в одной из 6 плоскостей катодно—стриповой камеры ME1/1.

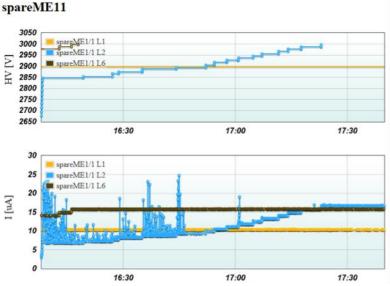


Рисунок 4.17. Высоковольтная тренировка камеры L2 (синим), имеющей Мальтер-ток.

Установка GIF++ является уникальным инструментом для изучения Мальтер- эффекта, так как позволяет облучать всю рабочую область камеры и менять ток в зазоре анод-катод при помощи поглощающих фильтров. В 2017–2018 гг. группой сотрудников ОИЯИ проводились тестовые сеансы с целью разработать методику подавления

Мальтер-токов в камерах МЕ1/1.

Пример успешного устранения Мальтер—эффекта приведен на рисунке 4.17. Для камеры L2 (синим) рабочее напряжение постепенно повышалось с шагом $\sim 5-10~\mathrm{B}$ по мере того, как ток в камере уменьшался. В результате вплоть до напряжения 3000 В (на 100 В выше рабочего) Мальтер—токов не наблюдалось. В качестве развития методики «лечения» камер предполагается автоматизация процесса тренировки напряжением и использование добавки 1-2% кислорода в газовую смесь.

4.7 Участие в исследованиях новых газовых смесей

Планируется протестировать альтернативные газовые смеси, которые позволили бы работать без газовой составляющей CF₄. Эти исследования будут выполняться на специально созданных мини-CSC с помощью космических лучей, в качестве монитора будет использован полноразмерный прототип детектора ME1/1, который будет установлен на установке GIF ++ и снабжен отдельной газовой системой.

Для НИР потребуется следующий вклад группы ОИЯИ:

- создание нового газосмесительного стенда, приобретение предварительно смешанного газа в баллонах и необходимой комплектации для газовых соединений;
- строительство новых мини CSC (приобретение необходимой комплектации).

4.8 Оценка затрат на модернизацию торцевой мюонной системы.

Обязательства по 2ой фазе модернизации мюонной системы CMS определены в дополнении №3 Приложения №13 к Меморандуму о взаимопонимании в области сотрудничества по создании детектора CMS [8]: «Электроника детектора и ОТМВ» и «Камеры RE3/1 RE4/1».

Общий вклад ОИЯИ в $CORE^2$ (Приложение 4 к Меморандуму о взаимопонимании) составил 151 тыс. шв. франков (76 тыс. шв. франков – из бюджета ОИЯИ и 75 тыс. шв. франков — из бюджета Грузинского технического университета и Тбилисского государственного университета).

Кроме того, дополнительные расходы ОИЯИ на создание новых систем охлаждения для ME1/1 камер и на систему контроля утечки воды, составили 63 тыс. шв. франков. Расходы будут зачтены в качестве дополнительного вклада ОИЯИ в бюджет М&О-В мюонной системы в 2021 году.

Как было показано во 2-м параграфе проекта, физики ОИЯИ активно участвуют в других задачах и программах НИР Фазы 2.

Оценка бюджета расходов на НИР в рамках 2ой фазы модернизации мюонной системы в период с 2022 г. по 2026 г. включает следующее*:

- подготовка и проведение модернизации CSC камер в период LS3 (2023–2026 гг.). Оборудование рабочей зоны для реконструкции камер, создание испытательных стендов, сервисных коммуникаций и т. д. 12 тыс. шв. франков;
- изготовление кабелей и сервисных коммуникаций для CSC (2023–2026 гг.).
 Приобретение инструмента, кабелей, разъемов, водяных и газовых труб и т. д. 13 тыс. шв. франков;

_

² Значение CORE (Cost of Resource Exchange) определяет только прямые затраты; он исключает связанные с этим расходы на рабочую силу, колебания обменного курса, затраты на создание прототипа, затраты на НИОКР и т. д. Он включает такие элементы, как компоненты, производственные материалы (но не материалы института) для производства, внешние компоненты сборки, установку, тестирование и ввод в эксплуатацию.

- модернизация соединительной панели ME1/1 (2023–2025 гг.). Приобретение компонентов, материалов и изготовление механических деталей 8 тыс. шв. франков;
- модернизация высоковольтного фильтра для ME1/1 CSC (2023–2024 гг.). Затраты на комплектующие, изготовление печатных плат и монтаж компонентов 6 тыс. шв. франков;
- разработка и создание прототипа электронной платы LVDB со встроенным модулем управления и контроля LVMB (2022–2023 гг.). Испытание на радиационную стойкость платы LVDB. Приобретение комплектующих для опытных образцов, кабелей и разъемов, Изготовление тестовых плат для испытаний на радиационную стойкость 5,0 тыс. шв. франков;
- модернизация стенда для НИР по исследованию старения CSC на GIF++ (2022–2024 гг.). Сборка тестовой ME1/1 CSC, монтаж камеры на установке GIF++. Закупка кабелей, разъемов, и др. компонентов 4 тыс. шв. франков;
- участие в НИР по исследованию новых газовых смесей:
 - создание газосмесительного стенда для исследования свойств новых газовых смесей. Приобретение флоуметров для контроля скорости потока газов, насосов, разъемов, труб, баллонов с различными газовыми смесями (2022 г.) 28 тыс. шв. франков;
 - изготовление тестовых камер (мини-CSC) (2022–2023 гг.). Приобретение материалов и сборка 4 тыс. шв. франков.

^{*)} Затраты на реконструкцию мюонной системы в 2024—2026 гг. могут увеличится после детальной проработки проекта модернизации в период LS3.

5 Оценка кадровых ресурсов

Вклад ОИЯИ в эксперимент CMS хорошо известен с момента образования CMS. Участники ОИЯИ в CMS внесли существенный вклад в проектирование, создание и модернизацию торцевой мюонной системы и системы торцевых адронных калориметров.

Авторы проекта имеют большой научный опыт. В список участников входят 2 действительных члена национальных Академий Наук РФ и Узбекистана (В.А. Матвеев и Б.С. Юлдашев), 8 докторов наук (И.А. Голутвин, В.Ю. Каржавин, В.В. Кореньков, А.И.Малахов, Г.А. Ососков, В.А. Смирнов, О.В. Теряев, С.В. Шматов), 11 кандидатов наук (В.Ю. Алексахин, С.В. Афанасьев, Н.И. Замятин, А.В. Зарубин, И.Н. Горбунов, Н.В. Горбунов, А.В.Ланев, В.В. Пальчик, Т.А. Стриж, А. Хведелидзе, З. Цамалаидзе). Доля молодых сотрудников младше 35 лет превышает 20%. Все молодые сотрудники активно работают над подготовкой кандидатских диссертаций.

Общее количество участников от ОИЯИ – 44 сотрудника, 21.5 FTE.

FTE участников проекта от ОИЯИ

Дирекция (0.1)

В.А. Матвеев (0.1)

Группа советников и консультантов

Б.С. Юлдашев (0,1)

ЛФВЭ (27 участников, 15.3)

В.Ю. Алексахин (0.2), С.В. Афанасьев (0.3), Д.В. Будковский (0.2), П.Д. Бунин (1.0),

М.Г. Гавриленко (0.4), А.О. Голунов (0.8), И.А. Голутвин (1.0), И.Н. Горбунов (0.2),

Н.В. Горбунов (1.0), Н.Н. Евдокимов (1.0), Ю.В. Ершов (1.0), И.А. Жижин (0.2),

Н.И. Замятин (0.1), А.В. Зарубин (1.0), А.Ю. Каменев (1.0), В.Ю. Каржавин (1.0),

А.М. Куренков (1.0), А.В. Ланёв (0.1), А.И. Малахов (0.2), А.М. Маканькин (0.3),

В.В. Перелыгин (1.0), В.А. Смирнов (0.9), Е.В. Сухов (0.5), О.В.Теряев (0.1),

Е.В.Устинов (0.5), В.В. Шалаев (0.2), С.В. Шматов (0.1)

ЛИТ (13 участников, 5.5)

Н.Н. Войтишин (0.8), А.О. Голунов (0.5), В.В. Кореньков (0.4), В.В. Мицын (0.8),

Д.А. Олейник (0.1), Г.А. Ососков (0.1), В.В. Пальчик (0.8), А.Ш. Петросян (0.1),

Р.Н. Семенов (0.1), Т.А. Стриж (0.4), В.В. Трофимов (0.8), А. Хведелидзе (0.5), И.А.Филозова (0.1)

ЛЯП (2 участника, 0.5)

Г. Адамов (0.3), З. Цамалаидзе (0.2)

Количество участников от стран-участниц ОИЯИ: 5 человек из Ереванского физического института им. А. Алиханяна (Ереван, Армения), 7 человек из Институт ядерных проблем БГУ (Минск, Беларусь), 4 человека из Института сцинтилляционных материалов НАН Украины (Харьков, Украина), 4 человека из Харьковского физикотехнического института (Харьков, Украина), 3 человека из Института ядерной физики Узбекской академии наук (Ташкент, Узбекистан).

Также предусмотрено привлечение к работам по модернизации студентов и аспирантов Университета "Дубна" и других образовательных центров.

6 Бюджет проекта

Оценка стоимости и структура расходов связана с официальными обязательствами ОИЯИ по участию в эксперименте согласно с Меморандум о взаимопонимании по созданию детектора CMS между ЦЕРН и ОИЯИ (Memorandum of Understanding for Collaboration in the Construction of the CMS Detector), соответствующих Приложений (Addendum №10 [6], Addendum №13 [7], Addendum №14 [8], Addendum №15 [9]), Меморандумом о взаимопонимании по участию ОИЯИ в проекте HGCal CMS [9]:

- расходы на общий фонд (Common Fund) модернизации CMS по фазе 2 (вклад в CORE 289.855 тыс. шв. франков согласно Addendum №10 [6], полный объем в 2020–2025 гг. 434.783 тыс. шв. франков³);
- расходы на создание охлаждающих панелей HGCal (вклад в CORE 1210 тыс. шв. франков согласно Addendum №14 [8]);
- расходы на закупку кремневых сенсоров (вклад в CORE 700 тыс. шв. франков согласно Addendum №14 [8]);
- расходы на закупку SiPM (вклад по CORE 200 тыс. шв. франков согласно Addendum №14 [8]);
- расходы на создание стенда для тестирования кассет (вклад в CORE 90 тыс. шв. франков согласно Addendum №14 [8] и Меморандуму [9]);
- расходы на проведение тестирования кассет, сборку и ввод в эксплуатацию HGCal (согласно Addendum №14 [8] и Меморандуму [9);
- расходы на модернизацию мюонных станций CSC (вклад в CORE 76 тыс. шв. франков согласно Addendum №13 [7]);
- расходы на проведение тестирования и ввода в эксплуатацию камер ME1/1, проведение R&D;
- операционные расходы на обслуживание установки в рамках ответственности ОИЯИ и персонала, в соответствии с Меморандумом об обслуживании и эксплуатации экспериментального комплекса (М&О категория В) по проекту HGCal (179 тыс. шв. франков в 2022–2026 гг.)⁴.

Полный объем вклада в CORE составляет 2276 тыс. шв. франков, с учетом Common Fund -2565.855 тыс. шв. франков.

Предлагаемый план-график, необходимые ресурсы и смета затрат по проекту «МОДЕРНИЗАЦИЯ ДЕТЕКТОРА CMS» приведены в формах 26 и 29. Результаты тендеров на закупку материалов и изготовление могут привести к изменению общей стоимости работ.

-

³ В 2020-2021 гг. был осуществлен вклад на сумму 144.928 тыс. шв. франков.

⁴ В 2020-2021 гг. был осуществлен вклад на сумму 5.9 тыс. шв. франков. В настоящее время стоимость расходов М&О категория В оценивается, исходя их сумму вклада в CORE. В коллаборации обсуждается переход на формулу расчета, исходя из количества участников проекта (PhD), что повлечет изменение цены расходов по этой категории.

Предлагаемый план-график и необходимые ресурсы для осуществления проекта «МОДЕРНИЗАЦИЯ ДЕТЕКТОРА CMS»

		ия затрат, ресурсов, ринансирования	Стоимость тыс. долл.		пределен		ратории ансирова ов 2025 год	2026
		Материалы и оборудование	2407	940	865	590	7	год 5
Затраты	-	Взнос по эксплуатации установок	507	98	109	118	130	52
, iii		Командировочные расходы	575	65	119	136	128	127
Необходимые ресурсы	Нормо-час	Ресурсы – конструкторского бюро лаборатории, – опытного производства ОИЯИ, – опытного производства лаборатории, – ускорителя, – реактора, – ЭВМ. Эксплуатационные расходы	LHC	LHC	LHC	LHC	LHC	LHC
ансирования	Бюджетные средства	Затраты из бюджета, в том числе инвалютные средства	3489*	1103	1093	844	265	184
Источники финансирования	Внебюджетные средства	Вклады коллаборантов. Средства по грантам. Вклады спонсоров. Средства по договорам. Другие источники финансирования и т.д.						

^{*)} Без учета гранта дирекции ОИЯИ в размере 90 тыс. долларов США, выделенного в 2021 г.

Руководитель проекта

Jmm

В.Ю. Каржавин

Смета затрат по проекту «МОДЕРНИЗАЦИЯ ДЕТЕКТОРА СМЅ»

Nº nn	Наименование статей затрат	Полная стоимость тыс. долл.	2022 год	2023 год	2024 год	2025 год	2026 год
	Прямые расходы на Проект						
1.	Материалы и оборудование	2407	940	865	590	7	5
2.	Взнос по эксплуатации установок	507	98	109	118	130	52
3.	Командировочные расходы, в т.ч. а) в страны не рублёвой зоны б) в города стран рублевой зоны	575	65	119	136	128	127
	Итого по прямым расходам:	3489	1103	1093	844	265	184

Комментарий: расходы включают все затраты на модернизацию детекторных систем согласно MoU, взносы в общий фонд (Common Fund) модернизации CMS, операционные расходы на обслуживание HGCal (M&O категория B), R&D по модернизации детектора и командировочные расходы. Расходы не учитывают колебания обменного курса.

Руководитель проекта *Дими* В.Ю. Каржавин Директор лаборатории *Г. Г.* Р. Ледницки Ведущий инженер-экономист лаборатории *Велу* Г.Г. Волкова

7 SWOT-анализ

7.1 Преимущества проекта

После модернизации детекторных систем проект, реализуемый на "машине открытий" LHC, обладает высоким потенциалом совершить открытие мирового уровня, как это было сделано во время первого этапа работы (открытие бозона Хиггса). Эксперименты на LHC привлекательны для ученых всего мира, полезны для популяризации науки и для вовлечения молодого поколения в науку.

CMS является одним из крупнейших международных инновационных проектов, во многих основных областях науки, а также в области технологии для проектирования и создания аппаратуры для экспериментальных исследований в области физики высоких энергий.

Международное сотрудничество в рамках коллаборации CMS с большим количеством научных центров, лидирующих в области ФВЭ, дает возможность передачи современных технологий в домашний институт. Хорошим примером такого сотрудничества является:

- передача в ОИЯИ технологии создания детекторов GEM (Gas Electron Multiply) для изучения свойств барионной материи на эксперименте (BM @ N) в ОИЯИ;
- реализация алгоритма реконструкции треков для анализа экспериментальных данных эксперимента BM@N в ОИЯИ.

Вычислительный центр TIER-1 в ОИЯИ построен на основе современных Gridтехнологий и обеспечен надлежащей вычислительной инфраструктурой для получения, обработки и хранения экспериментальной информации эксперимента CMS в ОИЯИ и в российских институтах, сотрудничающих с CMS.

Эксперимент обладает одним из самых высоких показателей публикаций по экспериментальным результатам в физике высоких энергий. В 2020 г. опубликовано более 100 статей. Большая цитируемость работ.

Вклад ОИЯИ в эксперимент CMS хорошо известен с момента образования CMS. Участники ОИЯИ в CMS внесли существенный вклад в проектирование, строительство и модернизацию торцевой мюонной системы. Наряду с этим ученые ОИЯИ активно участвуют в физическом анализе, реконструкции и отборе событий, проверке качества данных, разработке основного программного обеспечения. В рамках исследований и оптимизации параметров работы детекторов торцевой мюонной системы физики ОИЯИ внесли существенный вклад в разработку и реализацию алгоритма реконструкции физических объектов. Разработка проектов CMS по модернизации детекторных систем проводилась с активным участием сотрудников ОИЯИ.

7.2 Слабые стороны и риски проекта

Ввиду недопустимости нарушения сроков поставки панелей охлаждения для своевременного монтажа элементов детектора, а также большого объема параллельных технологических процессов на этапе массового производства, требуется строгий контроль всех этапов работ, выполняемых на предприятии-изготовителе.

Также должны быть подготовлены резервные производственные мощности на случай форс-мажора у основного изготовителя.

Расходы не учитывают возможного подорожания материалов и комплектующих, а также колебания обменного курса. Может потребоваться корректировка сметы расходов с учетом этих обстоятельств.

На момент подачи проекта отсутствуют как финальные чертежи всех требуемых панелей охлаждения, так как окончательная спецификация на изготовление пластин. В то же время сторона, отвечающая за разработку конструкторской документации (FNAL), обещает не вносить существенных изменений в проект. Предполагаемый срок получения финальной документации — лето 2021 года.

Незапланированный дефицит финансирования проекта может повлиять на выполнение обязательств ОИЯИ по проекту, а также ограничить возможность вовлечения участников проекта в решение дополнительных задач.

В связи с глобальной пандемией коронавируса и введением ряда стран жестких ограничений на коммерческую деятельность, приведшей к замедлению производственных процессов и нарушению логистических цепочек, существует опасность увеличения временного периода, отведенного на выполнение проекта.

8 Список литературы

- 1. CMS Collaboration, CMS, the Compact Muon Solenoid: Technical Proposal, CERN/LHCC 1994-038 (1994).
- 2. CMS Collaboration, Technical proposal for the upgrade of the CMS detector through 2020, CERN-LHCC-2011-006; CMS-UG-TP-1; LHCC-P-004. Geneva, CERN, 2011.
- 3. CMS Collaboration, Technical Proposal for the Phase-II Upgrade of the CMS Detector, CERN-LHCC-2015-010; LHCC-P-008; CMS-TDR-15-02. Geneva, CERN, 2015.
- 4. CMS Collaboration, The Phase-2 Upgrade of the CMS endcap calorimeter Technical Design Report, CERN-LHCC-2017-023, CMS-TDR-019. Geneva, CERN, 2019.
- 5. CMS Collaboration, The Phase-2 Upgrade of the CMS Muon Detectors The Phase-2 Upgrade of the CMS Muon Detectors, CERN-LHCC-2017-012; CMS-TDR-016. Geneva, CERN, 2017.
- 6. Addendum No. 10 to the Memorandum of Understanding for Collaboration in the Construction of the CMS Detector Common Items for the Phase II Upgrade of the CMS Detector, CERN-RRB-2017-060.
- 7. Addendum No. 13 to the Memorandum of Understanding for Collaboration in the Construction of the CMS Detector (comprising an Upgrade of the Muon Subsystem), CERN-MoU-2019-008.
- 8. Addendum No. 14 to the Memorandum of Understanding for Collaboration in the Construction of the CMS Detector (comprising an Upgrade to the HGCal Subsystem), CERN-MoU-2019-009.
- 9. Addendum No. 15 to the Memorandum of Understanding for Collaboration in the Construction of the CMS Detector, CERN-MoU-2019-036.
- 10. Memorandum of Understanding (MoU) on participation of the Joint Institute for Nuclear Research in the Compact Muon Solenoid (CMS) Phase-2 High Granularity Calorimeter (HGCal) Project at CERN, CMS-2020-010.
- 11. CMS Collaboration, Projected Performance of an Upgraded CMS Detector at the LHC and HL-LHC: Contribution to the Snowmass Process. CMS-NOTE-13-002. arXiv:1307.7135.
- 12. И.А. Голутвин, С.В. Шматов, "Планы и перспективы физики на LHC", в сб. Очерки по современной физике частиц. Под общ. ред. В.А. Матвеева, И.А. Голутвина Дубна: ОИЯИ, 2020 с. 99-111, ISBN 978-5-9530-0506-7; И.А. Голутвин, С.В.

- Шматов, "Результаты и перспективы исследований эксперимента CMS на LHC", ЭЧАЯ 48 №5 (2017) 604.
- 13. М.В. Савина, С.В. Шматов, "В поисках новой физики", в сб. Очерки по современной физике частиц. Под общ. ред. В.А. Матвеева, И.А. Голутвина Дубна: ОИЯИ, 2020 с. 133-215, ISBN 978-5-9530-0506-7.
- 14. CMS Collaboration, "Particle-flow reconstruction and global event description with the CMS detector", JINST 12 (2017) P10003, arXiv:1706.04965.
- 15. D. Pfeiffer et al. The radiation field in the Gamma Irradiation Facility GIF++ at CERN. Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 866 (2017) 91–103.
- 16. M.R. Jäkel et al.CERN GIF++: A new irradiation facility to test large-area particle detectors for the high-luminosity LHC program. PoS (TIPP2014) 102.
- 17. V. Palichik, N. Voytishin. New CSC segment builder algorithm with Monte-Carlo TeV muons in CMS experiment. Physics of Particles and Nuclei, v.48, №5 (2017) 786-788.
- 18. L. Malter "Thin Film Field Emission", Phys.Rev. 59, 48 (1936).