



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2000-37  
ОРИ

И.Л. Ажгирей, В.В. Таланов

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛЯ  
ИЗЛУЧЕНИЯ ЗА ПЕРЕДНЕЙ ЗАЩИТОЙ  
ЭКСПЕРИМЕНТА CMS НА LHC.  
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ИНЖЕНЕРНОГО ПРОЕКТА ЗАЩИТЫ**

Направлено в *ИТЭ*

Протвино 2000

**Аннотация**

Ажгирей И.Л., Таланов В.В. Моделирование формирования поля излучения за передней защитой эксперимента CMS на LHC. Исследование эффективности инженерного проекта защиты: Препринт ИФВЭ 2000-37. – Протвино, 2000. – 16 с., 7 рис., 1 табл., библиогр.: 14.

Представлены результаты расчета плотностей потоков частиц для инженерного проекта передней защиты эксперимента CMS на LHC в сравнении с моделью, использованной в проекте мюонной системы CMS. Проведен анализ формирования поля вторичного излучения в области эксперимента в зависимости от конфигурации защиты. Обсуждаются дальнейшие пути оптимизации конструкции и состава материалов защиты.

**Abstract**

Azhgirey I.L., Talanov V.V. Simulation of the Radiation Field Formation Around the CMS Forward Shielding. The Evaluation of the Engineering Design Efficiency: IHEP Preprint 2000-37. – Protvino, 2000. – p. 16, figs. 7, tables 1, refs.: 14.

The results of the particle flux densities calculation for the CMS forward shielding engineering design in comparison with the model used for the CMS Muon Project Technical Design Report are presented. The analysis of the secondary radiation field formation in the zone of experiment for different shielding configurations is performed. Further shielding design and materials composition optimization are under discussion.

## Введение

Ускоритель LHC (Large Hadron Collider, большой адронный коллайдер) [1], сооружаемый в ЦЕРН (Женева, Швейцария), должен обеспечивать столкновения пучков протонов при энергии 14 ТэВ в с.ц.м. и светимости от  $10^{32}$  до  $10^{34}$   $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ , что даст возможность исследовать физические явления вблизи ТэВ-ной шкалы энергий. Ускоритель LHC — первый из сверхпроводящих коллайдеров, который будет работать с высокоинтенсивными пучками. Ток каждого протонного пучка достигнет 0,56 А, а полная энергия — 334 МДж. Пучок ускорителя состоит из 2835 банчей, каждый из которых содержит около  $10^{11}$  протонов. Банчи встречаются в области пересечения пучков каждые 25 нс. Детальная структура пучка зависит от схемы инжекции и свойств системы аварийного сброса пучка.

Максимальная светимость достигается в двух прямолинейных промежутках — IR1, где расположен эксперимент ATLAS, и IR5, где размещается эксперимент CMS. Уровни радиации в залах экспериментов определяются интенсивностью неупругих взаимодействий в точке встреч пучков. Для пиковой светимости и предположительного значения 80 мбарн для величины неупругого сечения протон–протонного взаимодействия при 14 ТэВ в с.ц.м. интенсивность первичных неупругих взаимодействий протонов в точках встреч пучков экспериментов ATLAS и CMS составит  $8 \times 10^8$  Гц.

При рекордных энергиях и интенсивности ускорителя LHC уровень радиационных нагрузок на детекторы и оборудование эксперимента становится одним из определяющих проектных параметров.

### 1. Детектор CMS

Детектор CMS (Compact Muon Solenoid, компактный мюонный соленоид) [2],[3] — многоцелевой детектор, разрабатываемый для исследования физики протон–протонных взаимодействий на LHC. Детектор CMS предназначен для высокоточных измерений энергии и импульса  $\gamma$ -квантов, а также электронов, мюонов и других заряженных частиц, для обеспечения высокого разрешения при оценке масс новых частиц в области энергий в несколько ТэВ. Детектор CMS должен быть расположен в одной из двух точек встреч пучков LHC с высокой светимостью  $10^{34} \text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ .

Основными элементами детектора CMS являются (см. рис.1): центральный трекер [4], система мюонных камер [5] и расположенная внутри магнитного поля соленоида [6] система калориметров, состоящая из электромагнитного [7] и адронного [8]. В состав адронного калориметра входит также передний адронный калориметр, расположенный за торцевой мюонной системой в области больших быстрот.

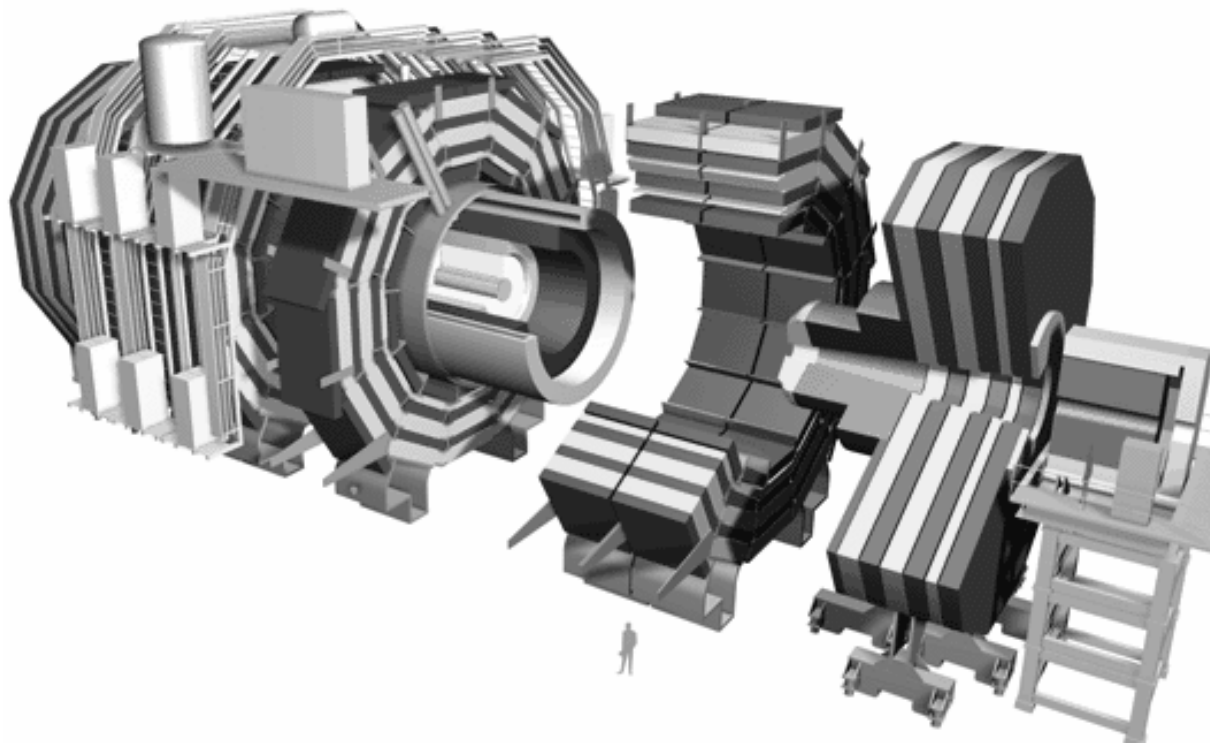


Рис. 1. Общий вид эксперимента CMS.

Область переднего адронного калориметра заканчивается на расстоянии в 14,99 м<sup>1</sup>. За передним адронным калориметром, на расстоянии 19,05 м, располагается коллиматор, имеющий длину 1,8 м. Коллиматор предназначен для защиты первого сверхпроводящего квадрупольного магнита Q1 прямолинейного промежутка LHC от излучения, приходящего из точки встреч под малыми углами. Магнит Q1 располагается<sup>2</sup> на расстоянии 22,5 м, а на расстоянии 26,5 м расположена граница экспериментального зала детектора CMS.

Мюонная система детектора CMS (см. рис.2) перекрывает область быстрот  $|\eta| < 2,4$ , система центральных и торцевых калориметров — область  $|\eta| < 3$ , передний адронный калориметр CMS перекрывает область до  $|\eta| < 4,7$ . Анализ распределения вторичных частиц из точки протон–протонного взаимодействия по энергии и быстроте [5] показывает, что 75% всех частиц попадает в область  $|\eta| < 5$ . В то же время эти 75% всех частиц уносят всего лишь около 5% всей энергии из точки встреч. Из оставшихся 95% около 30% будут перехвачены коллиматором в области быстрот  $|\eta| < 7,9$ , а остальная часть провзаимодействует за коллиматором или в тоннеле LHC.

<sup>1</sup>Здесь и далее расстояния указываются от точки встреч пучков в зоне эксперимента.

<sup>2</sup>Дана отметка начала зоны криогенного оборудования магнита.

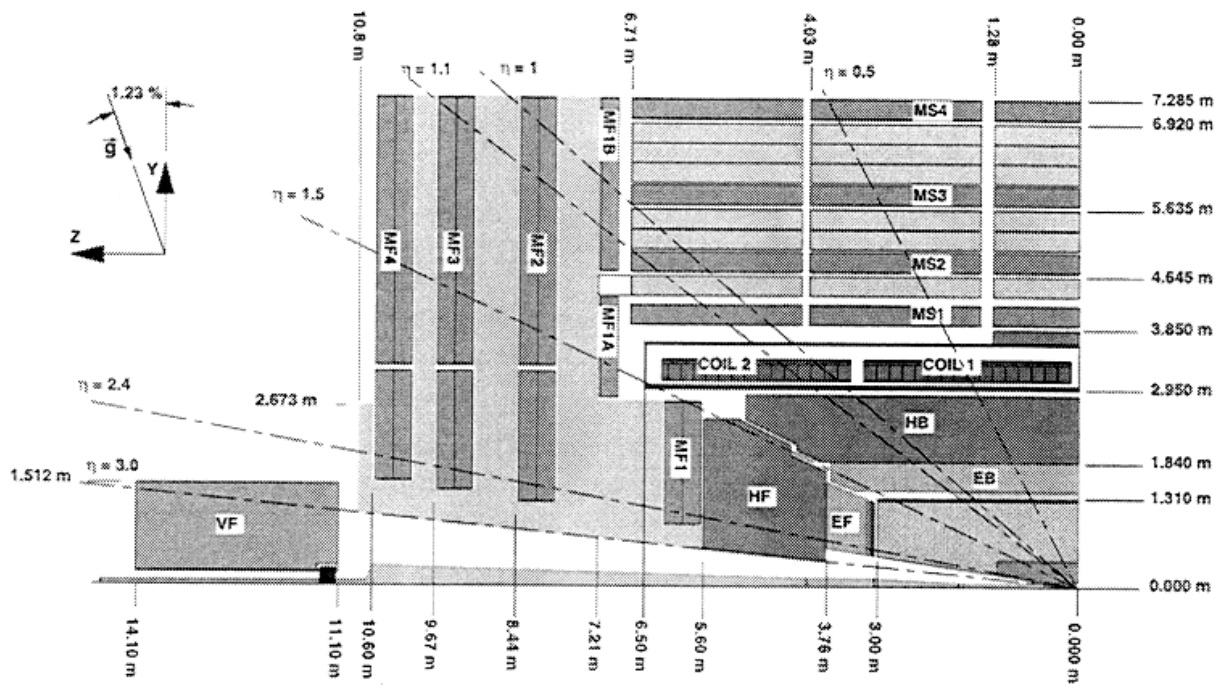


Рис. 2. Продольное сечение эксперимента CMS.

Таким образом, область детектора CMS  $|\eta| > 5$ , включающая вакуумную камеру ускорителя, коллиматор и первый магнит Q1 триплета прямолинейного промежутка LHC, а также вспомогательное вакуумное оборудование, оказывается основным источником радиационного фона в активных элементах детектора CMS и вторичного излучения в экспериментальном зале<sup>3</sup>. Защиту чувствительных элементов и компонентов электроники детектора в первую очередь от этого источника и должна обеспечивать передняя защита экспериментальной зоны CMS.

## 2. Функции передней защиты

Ряд детекторов эксперимента CMS (центральные трекер и калориметры, барельные мюонные камеры) защищены от вторичного излучения из области  $|\eta| > 5$  веществом торцевых мюонного спектрометра и калориметров CMS. Однако в области за передним адронным калориметром необходима специальная защита от вторичного излучения, образующегося на коллиматоре и вблизи него.

При отсутствии защиты в этой области прогнозируемый уровень фона в мюонной системе CMS оказывается на три порядка выше, чем рассчитанный для идеальной модели защиты в техническом проекте мюонной системы CMS [9]. В тех же условиях превысит допустимый уровень радиационная нагрузка на компоненты электроники переднего адронного калориметра CMS, тыловую защиту которой обеспечивает передняя защита [8].

Без передней защиты флюенс нейтронов и поглощенная доза, а, следовательно, радиационное повреждение компонентов электроники детектора, расположенной в эксперимен-

<sup>3</sup>Для сравнения: предполагается, что во всем детекторе CMS будет поглощаться 120 ГэВ на одно событие в точке встреч, в то же время в каждом из коллиматоров — почти в 20(!) раз больше, около 2,3 ТэВ на одно событие [10].

тальном зале, также оказывается на три порядка выше допустимого<sup>4</sup>. По той же причине усложняется защита персонала во время работы и сценарии доступа к элементам детектора и вакуумного оборудования во время останова ускорителя из-за высокого уровня наведенной радиоактивности в результате облучения коллиматора и первого магнита Q1 прямолинейного промежутка ускорителя.

Наконец, передняя защита также предназначена для поглощения частиц, образующихся в результате взаимодействия гало пучка с остаточным газом в вакуумной камере ускорителя и приходящих в область эксперимента из тоннеля и прямолинейного промежутка ускорителя. Выполненные расчеты нагрузок, в частности на мюонную систему CMS, основывались на наличии защиты от ускорительного фона [11] и при отсутствии эффективной защиты в данной области должны быть пересмотрены.

Таким образом, от эффективности передней защиты зависит целый ряд систем детектора CMS. С другой стороны, положение передней защиты в экспериментальном зале накладывает ограничения на возможный максимальный размер и вес частей защиты и сценарий их перемещения. Все это диктует необходимость создания конструкции как механически надежной, так и эффективной с точки зрения защиты от излучения.

### 3. Общая конструкция защиты

Передняя защита экспериментальной зоны CMS состоит из двух подобных частей, которые должны быть расположены у стен подземного зала UXC55 по обе стороны от точки встреч пучков. Система из двух передних защит должна следовать оси пучка, которая наклонена на  $0,707^\circ$  по отношению к горизонтальной плоскости. Передняя защита располагается в экспериментальном зале на расстоянии 14,95 м и на расстоянии 1,508 и 2,149 м от горизонтальной плоскости, проходящей через точку пересечения пучков, в зависимости от стороны эксперимента. Общий внешний вид одной передней защиты приведен на рис.3 (чертеж ЦЕРН CDD LHCTH5S\_0022).

Передняя защита состоит из:

- блиндажа (от 21,7 м) — сборного каркаса из стальных балок, залитого бетоном. Блиндаж устанавливается на платформе над гаражом переднего калориметра и прикрепляется к стене экспериментального зала. Блиндаж поддерживает оси опор раскрывающихся частей защиты;
- неподвижной конической защиты (18÷20,8 м), вмещающей в себя коллиматор. Эта часть защиты с помощью двух регулируемых опор крепится к блиндажу. Она имеет коническую форму для обеспечения максимального отката назад торцевой мюонной системы при открытии всего детектора CMS;
- конической части защиты (18÷21,7 м) — одной из двух раскрывающихся частей. Коническая защита крепится на шарниры блиндажа и представляет из себя стальную оболочку, залитую тяжелым бетоном<sup>5</sup>;
- цилиндрической части защиты (14,9÷18 м) — второй раскрывающейся части, которая крепится к шарнирам на конической части и имеет независимый привод перемещения. Эта часть состоит из стальной вставки и стальной оболочки, также заполненной тяжелым бетоном.

---

<sup>4</sup>В предположении, что в этой части электроники эксперимента будут использованы стандартные, т.е. радиационно нестойкие компоненты.

<sup>5</sup>Описание материалов, использованных в конструкции защиты, приведено в Приложении.

Необходимо отметить, что любая оптимизация проекта защиты должна соответствовать предварительным оценкам стоимости защиты. Это подразумевает, что все изменения должны быть обоснованы, а их количество сведено до абсолютно необходимых для обеспечения требуемого качества защиты.

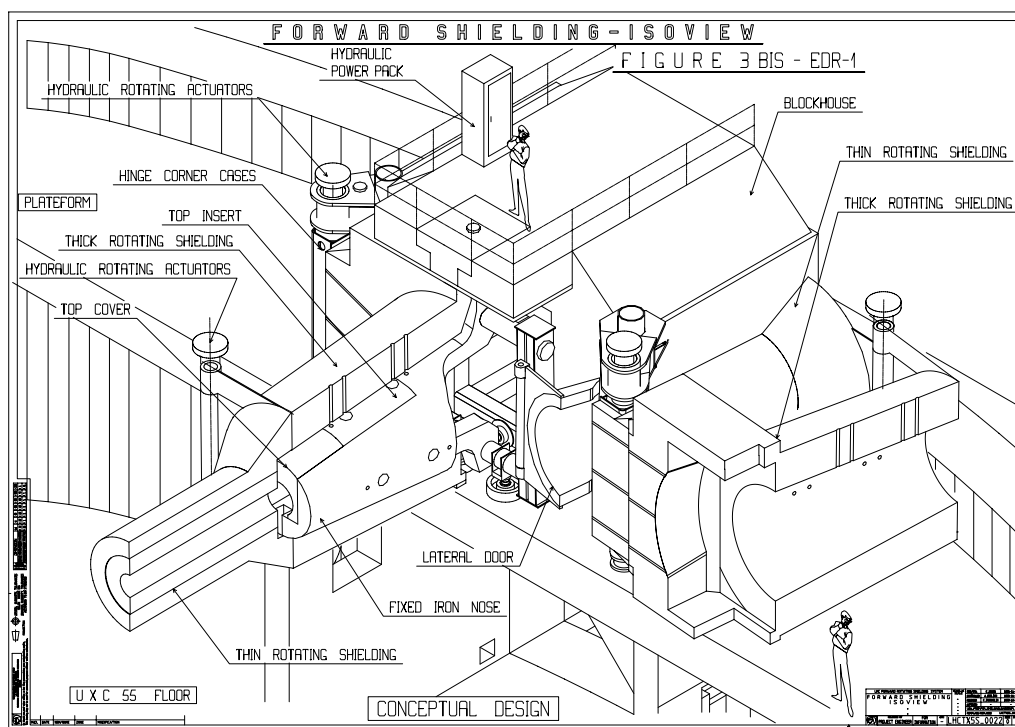


Рис. 3. Общий вид передней защиты CMS.

#### 4. Инженерный проект защиты

Эскизная модель защиты области коллиматора была представлена в техническом предложении эксперимента CMS [3]. Эта достаточно простая модель включала в себя коническую часть толщиной около 1 м и цилиндрическую толщиной 30 см, с внутренней железной вставкой толщиной 10 см. Конструкция неподвижной конической защиты была весьма приближительна, а конструкция соединения конической части с блиндажем, как и конструкция собственно блиндажа, на тот момент не была определена. Материалом заполнения элементов защиты был выбран тяжелый бетон.

Следующая модель защиты в данной области детектора была использована при подготовке технических проектов системы калориметров и мюонной системы. Эта конфигурация показана на рис.4, сверху. По сравнению с моделью из технического предложения в ней были изменены как продольные размеры, так и радиальная толщина отдельных частей. Толщина внутренней железной вставки цилиндрической части защиты была увеличена до 25 см, а внешний радиус бетонной оболочки — до 80 см. В конической части толщина бетона осталась примерно прежней, но все бетонные элементы защиты были покрыты слоем борированного полиэтилена толщиной 10 см для подавления утечки тепловых нейтронов из бетонной защиты и, соответственно, захватного  $\gamma$ -излучения в зале.

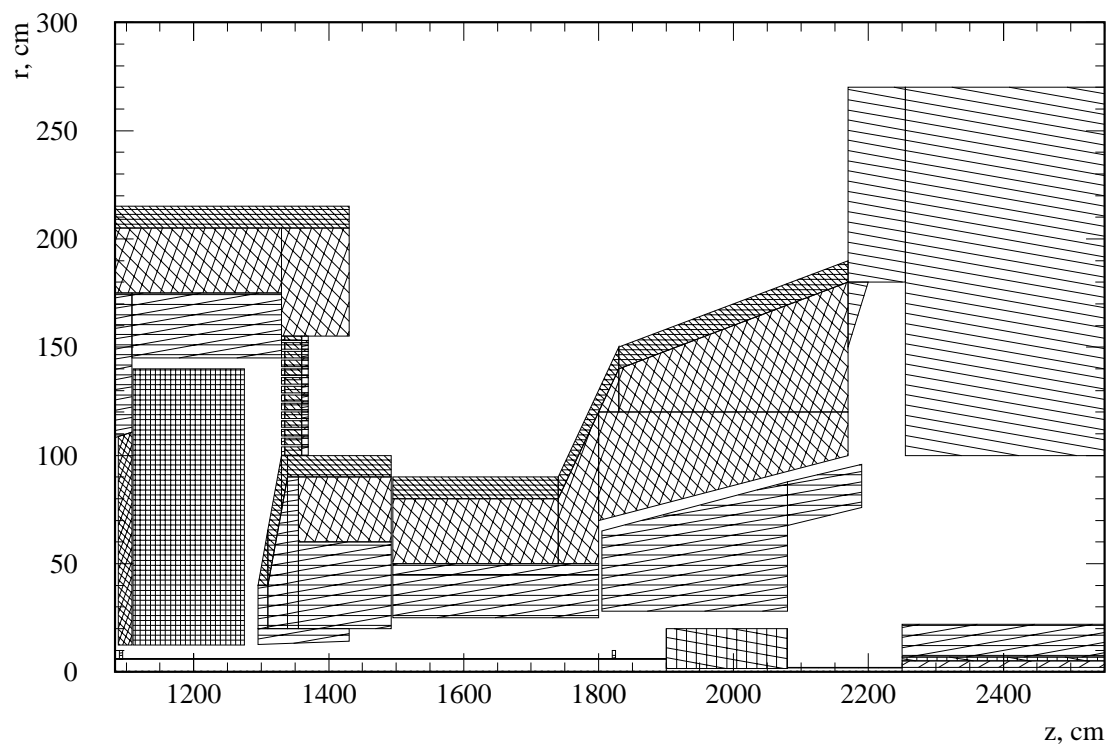
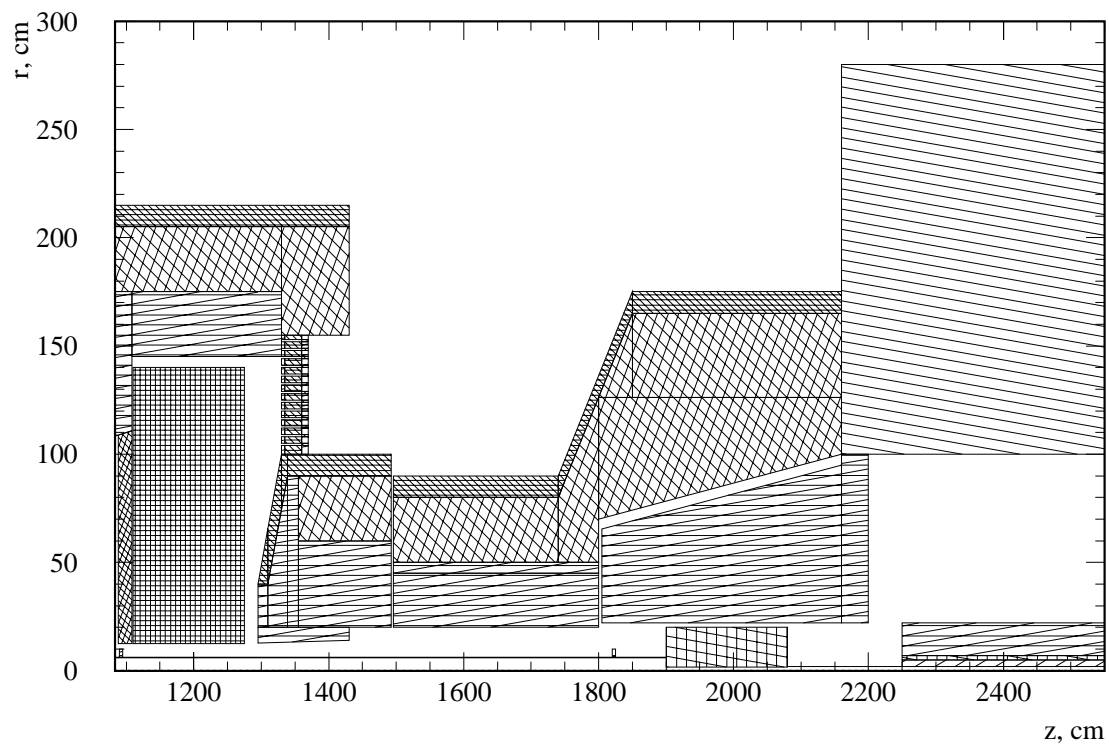


Рис. 4. Конфигурация передней защиты, использованная при расчетах для технического проекта мюонной системы эксперимента CMS (вверху), и модель инженерного проекта передней защиты (внизу).



Следует отметить особо, что в этой модели предполагалась усиленная защита области 21÷23 м. Коллиматор был окружен сплошным железным конусом защиты, заканчивавшимся лишь в 50 см от первого магнита ЛНС. В конструкцию защиты был введен прототип блиндажа в виде сплошного цилиндра с внутренним радиусом 1 м и толщиной 1,8 м, заполненного стандартным бетоном, вплотную примыкающий к конической части защиты. В качестве материала заполнения бетонных частей защиты, как и в техническом предложении эксперимента CMS, предполагалось использовать тяжелый бетон.

При подготовке инженерного проекта в конфигурацию передней защиты были внесены изменения, продиктованные как механическими требованиями к конструкции защиты, так и требованиями интеграции с другими системами (см. рис.4, внизу). Для уменьшения механической нагрузки был уменьшен внешний радиус и изменена форма конической части защиты. Для обеспечения юстировки коллиматора<sup>6</sup> был увеличен до 28 см внутренний радиус окружающего его фиксированного конуса. В результате этих изменений была несколько ослаблена коническая часть защиты.

Самые значительные изменения были внесены в конструкцию области сопряжения конической части защиты с блиндажом. В задней части неподвижной конической защиты коллиматора была сделана ниша глубиной 1,2 м для размещения вакуумного оборудования. Таким образом, толщина железа в этой области составила всего 20 см по радиусу. Одновременно в передней части блиндажа в области 21,8÷22,5 м был увеличен внутренний радиус с 1 м до 1,8 м. Это было вызвано необходимостью выделения места под расположение механизмов разворота защиты и привело к появлению в защите зон, заполнение которых защитным материалом невозможно или возможно лишь частично, при определенных условиях<sup>7</sup>. Совокупность этих изменений привела к ослаблению защиты в данной области и, как будет показано ниже, сделало эту часть основным узким местом защиты.

Для данного инженерного проекта был проведен расчет величин потоков частиц и полученные результаты были сравнены с предыдущими данными для технического проекта мюонной системы [5]. Также в рамках данной работы был проведен сравнительный анализ ряда конфигураций передней защиты для исследования формирования поля излучения в области защиты и определения возможностей дальнейшей ее оптимизации.

## 5. Конфигурации защиты

Сравнительный анализ эффективности был проведен для четырех конфигураций передней защиты, получивших следующие условные номера:

### 200

Начальный базовый инженерный проект передней защиты, включавший в себя все изменения в конструкции защиты по сравнению с техническим предложением эксперимента CMS. Был подготовлен на основании выполненных в ЦЕРН чертежей [12].

### 201

По сравнению с базовой конфигурацией была изменена форма конической части передней защиты в области ее соединения с блиндажом. На расстоянии 20,9 м наклон

---

<sup>6</sup>К передней поверхности которого крепится вакуумная камера в области детектора CMS.

<sup>7</sup>Например, при разработке адекватного сценария доступа к вакуумному оборудованию ускорителя, расположенному в этой области.

конической части был изменен с  $6,58^\circ$  на  $45^\circ$  и полученное усиление защиты было также покрыто слоем борированного полиэтилена толщиной 10 см. Пространство под козырьком блиндажа, между конической частью и блиндажом, было заполнено тяжелым бетоном<sup>8</sup>.

#### 201.А

В конфигурации 201 тяжелый бетон был заменен на стандартный в конструкции цилиндрической и конической частей. Форма бетонных элементов передней защиты была оставлена без изменения. Пространство под козырьком блиндажа было оставлено заполненным тяжелым бетоном.

#### 202

В конфигурации 201 был удален борированный полиэтилен, покрывающий бетонные части защиты. Форма бетонных элементов и заполнение области соединения передней защиты с блиндажом остались теми же.

## 6. Оценка эффективности защиты

При проведении расчетов в конфигурации эксперимента CMS был выбран набор контрольных зон. Изменение величин плотностей потоков частиц в контрольных зонах использовалось для оценки эффективности различных конфигураций передней защиты.

Контрольная зона номер один располагалась на расстоянии 10,3 м от точки встреч. В первой зоне контролировалось радиальное распределение плотности потоков частиц (интегрированное по азимутальному углу). Имея минимальный и максимальный радиусы 2,1 м и 12 м соответственно, зона номер один полностью покрывала предполагаемое расположение четвертой камеры торцевой мюонной системы CMS ME4<sup>9</sup>. Камера ME4, являясь самой удаленной от точки встреч камерой мюонной системы, защищена от излучения ярмом магнита мюонного спектрометра лишь с лицевой стороны, тыловую защиту ME4 должна обеспечивать мобильная защита.

Вторая зона располагалась на радиусе 3 м вокруг передней защиты. В зоне номер два на расстоянии 11÷26 м контролировалось продольное распределение плотности потоков частиц (также интегрированное по азимутальному углу). Вторая зона использовалась для контроля прогнозируемых радиационных нагрузок на различные компоненты электроники системы сбора данных эксперимента CMS. Предполагалось, что два участка системы сбора данных должны быть расположены на расстоянии от точки встреч в 11÷13 м и 24÷26 м соответственно. Вторая зона также использовалась для контроля утечки излучения в экспериментальный зал через стыки частей передней защиты с элементами защиты переднего адронного калориметра CMS и блиндажа.

## 7. Моделирование поля излучения

Для моделирования поля излучения в области передней защиты эксперимента CMS были использованы следующие программы: DPMJET II [13] для генерации первичных частиц из точки протон–протонного взаимодействия и разработанная в ИФВЭ программа

---

<sup>8</sup>Сплошное заполнение бетоном этого пространства нереализуемо, но возможна засыпка его железом и/или бетоном в форме гранул. Тяжелый бетон был выбран как промежуточный между железом и бетоном по композиционному составу материал.

<sup>9</sup>Собственно чувствительная область камеры ME4 заканчивается на радиусе 7,35 м.

MARS [14] для моделирования адронных каскадов и электрон-фотонных ливней. Пороги по энергии, использованные в программе транспорта для различных типов частиц, приведены в таблице.

Результаты расчета плотностей потоков частиц были отнормированы на номинальную светимость  $10^{34} \text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$  в точке встреч эксперимента и значения 80 мбарн для величины сечения неупругого протон-протонного взаимодействия.

Таблица 1. Пороги транспорта частиц, использованные в программе моделирования.

Тип частиц	Порог по энергии
заряженные адроны	10 МэВ
$\gamma$ и электроны	100 кэВ
нейтроны	$10^{-5}$ эВ

## 8. Сравнение с проектом мюонной системы

Результаты расчета плотностей потоков частиц для инженерного проекта передней защиты (конфигурации 200) были сравнены с полученными ранее значениями потоков для технического проекта мюонной системы CMS. На рис.5 приведены рассчитанные радиальное распределение плотности потока нейтронов на мюонной камере ME4 и продольное распределение на радиусе  $r=3$  м вокруг передней защиты.

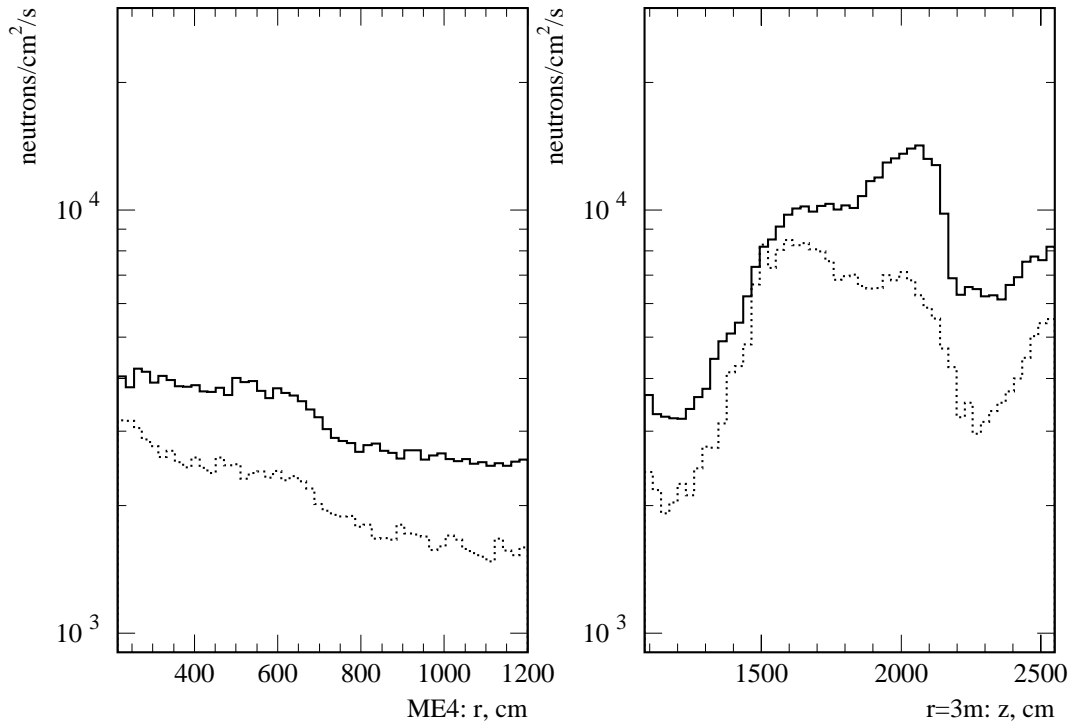


Рис. 5. Сравнение плотностей потоков нейтронов на мюонной камере ME4 (слева) и радиусе  $r=3$  м вокруг передней защиты (справа), рассчитанных для технического проекта мюонной системы (точки) и инженерного проекта передней защиты (сплошная линия).

Сравнение рассчитанных ранее величин с новыми данными показывает, что изменения в конструкции защиты, связанные с переходом к инженерному проекту, приводят к увеличению плотностей потоков частиц. В среднем на мюонной камере ME4 наблюдается увеличение плотности потока нейтронов в полтора раза и от полутора до двух раз — на радиусе 3 м вокруг передней защиты.

Форма радиального распределения плотности потока на камере ME4 остается примерно прежней, разница с расчетом для проекта мюонной системы несколько увеличивается на больших радиусах. Это связано с тем, что величина плотности потока нейтронов на малых радиусах камеры ME4 обусловлена также и эффективностью фронтальной и нижней защиты мюонной системы. При удалении от оси пучка ускорителя излучение с поверхности передней защиты начинает превалировать над прошедшим через фронтальную защиту мюонной системы, приводя к существенной разнице на больших радиусах камеры.

Изменение величин плотностей потоков частиц во второй контрольной зоне имеет принципиально иной характер. Относительное изменение величины плотности потока нейтронов вдоль второй зоны не столь велико, в то время как продольное распределение приобретает другую форму. Нетрудно видеть, что излучение с поверхности цилиндрической части передней защиты ( $z=15\div 17,5$  м) уже не является определяющим компонентом радиационной обстановки. В формировании поля излучения на радиусе  $r=3$  м вокруг передней защиты в инженерном проекте доминирующим оказывается излучение, проникающее в экспериментальный зал через стыки в конструкции передней защиты.

Именно эффект утечки обуславливает характерный пик продольного распределения плотности потока нейтронов на расстоянии 21 м от точки встреч. Как можно видеть из рис.4, в области  $21\div 23$  м располагается сопряжение конической части защиты с блиндажом, существенно ослабленное в плане защиты от излучения при переходе от технического проекта мюонной системы к инженерному проекту передней защиты.

Последующую оптимизацию защиты составило усиление передней защиты в области ее соединения с блиндажом вместе с исследованием влияния компонент защиты на формирование поля излучения в контрольных зонах.

## 9. Усиление передней защиты

Усиление передней защиты было проведено в два этапа. На первом этапе был изменен наклон конической части защиты в области ее соединения с блиндажом (см. п.5). Затем пространство под козырьком блиндажа в области  $21,6\div 22,5$  м и в пределах  $1\div 1,7$  м по радиусу было заполнено тяжелым бетоном. Результаты расчета потоков частиц для новой конфигурации 201 даны на рис.6 штриховой линией для зоны мюонной камеры ME4 и радиуса  $r=3$  м соответственно.

Как видно из рис.6, предложенное усиление защиты позволяет уменьшить плотность потока нейтронов на камере ME4 в среднем на 25% по сравнению с базовым инженерным проектом защиты относительно равномерно по радиусу камеры. В зоне номер два, на радиусе  $r=3$  м, изменение плотности потока нейтронов на краях продольного распределения составляет примерно 25–30% в области  $11\div 13$  м и менее 20% в области  $24\div 26$  м. Вместе с тем, плотность потока нейтронов значительно изменяется в области  $18\div 22$  м, расположенной вокруг конической части передней защиты. Относительное изменение плотности потока в этой области в максимуме составляет более 50%, что позволяет сделать заключение о максимальном увеличении в два раза эффективности защиты.

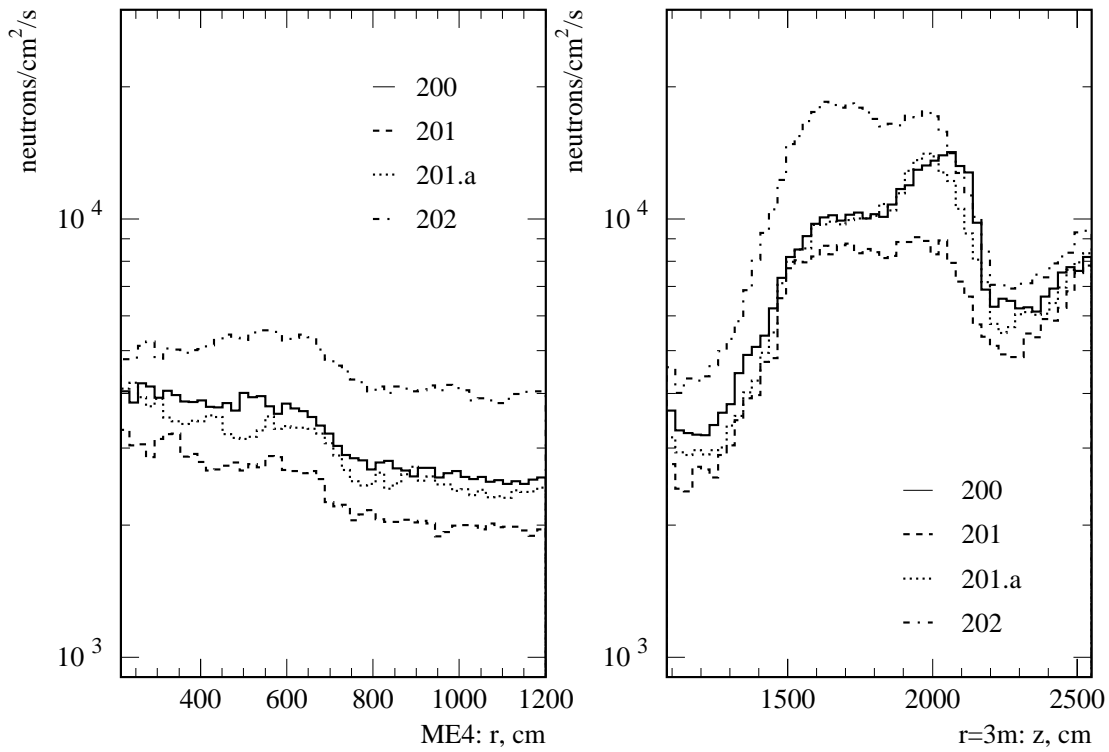


Рис. 6. Сравнение плотностей потоков нейтронов на мюонной камере ME4 (слева) и  $r=3$  м вокруг передней защиты (справа) для четырех исследованных конфигураций защиты (описание конфигураций дано в п.5).

Сравнение приведенных на рис.6 результатов расчетов с соответствующими значениями, полученными для проекта мюонной системы (см. рис.5), позволяет сделать вывод о существенном восстановлении эффективности передней защиты, потерянной при переходе к базовому проекту защиты. Разница значений плотностей потоков нейтронов в чувствительной области камеры ME4 и на радиусе  $r=3$  м для новой конфигурации и проекта мюонной системы составляет в среднем не более 15%. В максимуме разница в значениях плотностей потоков достигает 25% на радиусе  $r=3$  м в области 21 м вокруг соединения конической части защиты с блиндажом. Дальнейшее уменьшение плотности потока нейтронов в этой области представляется затруднительным, поскольку требует либо существенного увеличения толщины по радиусу частей передней защиты, что противоречит ограничению на вес защиты, либо ввода фронтальной защиты первого магнита Q1 триплета прямолинейного промежутка IP5, что невозможно из-за крайне ограниченного пространства в области между криостатом триплета и коллиматором<sup>10</sup>.

Важным моментом с точки зрения механических свойств защиты является то, что предложенное усиление защиты не приводит к значительному увеличению веса защиты (вес дополнительного материала меньше 10% от суммарного веса мобильных частей защиты). Также важно то, что усиление защиты в новой конфигурации производится на минимальном расстоянии от точек крепления подвижной конической части ( $z=21,5$  м), не вызывая критического увеличения нагрузки на механизмы разворота защиты.

<sup>10</sup>Практически полностью использованного для установки вакуумного оборудования.

## 10. Формирование поля излучения

С целью исследования формирования поля излучения вокруг передней защиты был проведен расчет величин плотностей потоков частиц для двух дополнительных конфигураций защиты. В первой из дополнительных конфигураций (201.А, см. п.5) тяжелый бетон в цилиндрической и конической частях передней защиты был заменен на стандартный бетон. При этом конфигурация тыловой защиты переднего адронного калориметра CMS, в состав которой также входит ряд элементов из тяжелого бетона, осталась прежней (область 11÷15 м на рис.2). Во второй дополнительной конфигурации (202, см. п.5) было удалено полиэтиленовое покрытие раскрывающихся бетонных элементов защиты. Материалом заполнения раскрывающихся элементов был оставлен тяжелый бетон.

Результаты расчета плотности потока нейтронов для двух дополнительных конфигураций приведены на рис.6 пунктирной (конф. 201.А) и штрих-пунктирной линиями (конф. 202), для зоны мюонной камеры ME4 и радиуса  $r=3$  м соответственно. Для полноты картины формирования поля излучения вокруг передней защиты на рис.7 в той же нотации, что и на рис.6, приведены нормированные на величину потока<sup>11</sup> спектры нейтронов в исследуемых контрольных зонах.

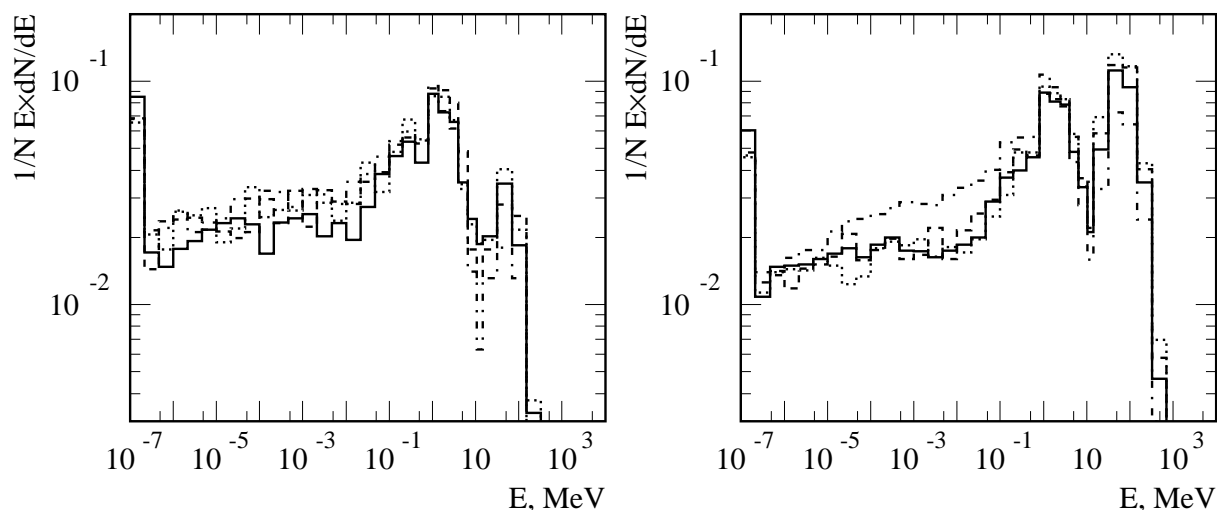


Рис. 7. Сравнение спектров нейтронов на мюонной камере ME4 (слева) и радиусе  $r=3$  м вокруг передней защиты (справа), рассчитанных для четырех исследованных конфигураций защиты (описание конфигураций дано в п.5, обозначения на рисунке те же, что и на рис.6).

### 10.1. Изменение состава бетона

Величины плотностей потоков нейтронов, рассчитанные для конфигурации 201 (усиленный вариант защиты), были сравнены с результатами, полученными для конфигурации 201.А. Сравнение показывает, что замена в бетонных частях передней защиты тяжелого бетона на стандартный приводит к значительному увеличению плотности потоков нейтронов как вокруг защиты, так и в зоне мюонной камеры ME4. В частности, в зоне ME4 практически по всему радиусу контрольной зоны величина плотности потока

<sup>11</sup>Для удобства сравнения форм спектров при разных величинах плотностей потоков частиц.

нейтронов становится близка к рассчитанной для базового (неусиленного) инженерного проекта защиты. Относительное увеличение плотности потока нейтронов при этом составляет 20% в среднем.

Во второй зоне, на радиусе  $r=3$  м, рассчитанные для конфигурации 201.А величины плотностей потоков нейтронов также близки к значениям, полученным для базового инженерного проекта защиты. На краях продольного распределения в области 11÷13 м максимальное увеличение плотности потоков нейтронов составляет примерно 20% и менее 10% в области 24÷26 м. В то же время наблюдается значительное увеличение плотности потока нейтронов вокруг конической части защиты, в области 18÷22 м, где значение плотности потока нейтронов практически возвращается к исходной, до оптимизации, величине.

## 10.2. Удаление полиэтиленового покрытия

Как видно из рис.6, изменение величины плотности потока нейтронов в конфигурации без полиэтиленового покрытия бетонных элементов защиты (конф. 202) оказывается существенно сильнее, чем при изменении состава бетона<sup>12</sup>. Как в зоне мюонной камеры МЕ4, так и на радиусе  $r=3$  м вокруг передней защиты, для данной конфигурации расчеты дают для величины плотности потока нейтронов наибольшие значения среди всех исследованных конфигураций защиты.

В зоне мюонной камеры МЕ4 увеличение плотности потока нейтронов в среднем на 60% наблюдается на малых радиусах камеры, наибольшее увеличение — в два раза — на больших радиусах, начиная с 5,5 м от оси пучка. Во второй зоне, на радиусе  $r=3$  м, на краю продольного распределения в области 11÷13 м максимальное увеличение плотности потока нейтронов составляет примерно 60%. В области 24÷26 м максимальное изменение величины плотности потока нейтронов составляет менее 35%, поскольку основное влияние на формирование поля вторичного излучения в данной области очевидно оказывают размер и состав материала блиндажа.

Интересно отметить, что форма продольного распределения плотности потока нейтронов на радиусе  $r=3$  м вокруг передней защиты разная для конфигураций с разным составом бетона (201 и 201.А), но практически одинакова для усиленной конфигурации 201 и конфигурации 202 без борированного полиэтилена. Это объясняется тем, что при замене тяжелого бетона на стандартный (более легкий, без примеси бора, см. Приложение) коническая часть защиты ослабляется значительно, чем более тонкая цилиндрическая часть. Поэтому на рис.6 видно резкое увеличение плотности потока нейтронов в области 18÷22 м, вокруг конической части, и значительно меньшее — вокруг цилиндрической части защиты. Слой же полиэтиленового покрытия для всех бетонных элементов передней защиты имеет фиксированную толщину в 10 см, поэтому при его удалении происходит относительное увеличение значений плотностей потоков, но сохраняется форма продольного распределения.

## 10.3. Сравнение спектров нейтронов

Сравнение спектров нейтронов, рассчитанных для четырех описанных конфигураций передней защиты, дано на рис.7. Для всех конфигураций спектр нейтронов на радиусе

<sup>12</sup>Напомним, что в конфигурации 202 состав бетона соответствующих частей передней защиты был тот же, что и в базовом проекте защиты.

$r=3$  м жестче, чем для зоны мюонной камеры ME4, и имеет характерный каскадный пик в области 100 МэВ. В зоне мюонной камеры ME4 спектр нейтронов мягче, в нем отчетливо выражен испарительный пик в районе 1 МэВ, однако область низких энергий заселена нейтронами интегрально значительно больше, чем на радиусе  $r=3$  м.

Обращает на себя внимание тот факт, что для зоны мюонной камеры ME4 для всех четырех рассмотренных конфигураций в спектрах нейтронов нет явных отличий. Для второй контрольной зоны, на радиусе  $r=3$  м, очевидно выделяется спектр для конфигурации 202, в которой удалено полиэтиленовое покрытие. В спектре для данной конфигурации видно значительно больше нейтронов в области энергий  $10^{-5} \div 1$  МэВ, тех, которые в других конфигурациях эффективно поглощаются борированным полиэтиленом.

## Заключение

В данной работе выполнен переход от идеальной модели передней защиты, использованной при подготовке технического проекта мюонной системы CMS, к расчетам величин плотностей потоков частиц в детализированном инженерном проекте защиты. Как показано, такой переход ведет к увеличению значений плотностей потоков нейтронов в области эксперимента в полтора раза в зоне мюонной камеры CMS ME4 и в полтора–два раза — на радиусе  $r=3$  м вокруг передней защиты.

Проведенный анализ формирования поля излучения вокруг защиты позволяет выделить зону соединения конической части передней защиты с блиндажом как основной источник вторичного излучения в экспериментальном зале в данной области. Предложенное усиление зоны соединения защиты с блиндажом, вместе с заполнением стыков соединения материалом, средним между железом и бетоном, позволяет уменьшить значения плотностей потоков нейтронов вокруг защиты на 25–50%, снизив их до уровня, близкого к полученным для предыдущей идеальной модели.

В рамках работы выполнено исследование формирования поля излучения в области передней защиты в зависимости от состава бетона, используемого для заполнения раскрывающихся элементов защиты, и наличия полиэтиленового покрытия защиты. Сравнение результатов, полученных для двух дополнительных конфигураций, показывает, что замена в конструкции защиты тяжелого бетона на стандартный приводит к заметному увеличению плотностей потоков нейтронов в обеих контрольных зонах. В то же время удаление полиэтиленового покрытия защиты приводит к значительно большему изменению плотностей потоков — до двух раз в зоне мюонной камеры ME4 и на радиусе  $r=3$  м до 60% на краях<sup>13</sup> продольного распределения.

Следует принять во внимание то, что при изменении состава бетона не был изменен внешний радиус бетонных частей защиты, соответственно вес защиты уменьшился. Ограничение на суммарный вес передней защиты определяется нагрузками на механизмы перемещения защиты, но разница в 1,5 раза по плотности тяжелого и стандартного бетонов позволяет увеличить радиус бетонных частей защиты без изменения механических нагрузок. Такое увеличение толщины по радиусу бетонных частей защиты позволило

---

<sup>13</sup>Изменение значения плотности потока нейтронов, например в области 15–18 м, оказывается еще большим, до двух с половиной раз, но величины плотностей потоков частиц в этой области представляют интерес лишь с точки зрения анализа источника вторичного излучения, поскольку расположение чувствительных элементов и электроники детектора в этой области не планируется.



бы дополнительно уменьшить значения плотностей потоков нейтронов в конфигурации со стандартным бетоном.

Результаты исследования показывают, что наличие полиэтиленового покрытия частей передней защиты является одним из ключевых условий ее эффективности. Борированный полиэтилен, являясь, с одной стороны, материалом с высоким содержанием водорода, с другой — имеющим 5% по весу смеси изотопов бора, успешно справляется с замедлением и последующим поглощением нейтронов. В то же время борированный полиэтилен является дорогостоящим материалом передней защиты. Это позволяет указать как один из возможных путей дальнейшей оптимизации передней защиты поиск или разработку материала, содержащего достаточный, с учетом спектрального состава флюенса нейтронов, весовой процент водорода и бора и имеющего более привлекательное соотношение цена/эффективность.

## Приложение

### Материалы защиты

Ниже приведены плотности и состав материалов, принятых стандартными в эксперименте CMS и использованных при расчетах величин потоков частиц для инженерного проекта передней защиты.

#### Железо (сталь)

На самом деле — составной материал с добавками (вернее, остатками после выплавки) других элементов. Плотность 7.87 г/см<sup>3</sup>. Состав приведен в таблице ниже.

элемент	Fe	C	Si	Mn	Ni	Cu
% веса	98.25	0.1	0.1	0.4	1.0	0.15

#### Стандартный бетон

В данной работе это бетон, отличающийся от стандартного материала, используемого в защите от излучений, уменьшенным содержанием воды. Плотность 2.35 г/см<sup>3</sup>. Состав приведен в таблице ниже.

элемент	H	C	O	Na	Al	Si	K	Ca	Fe
% веса	0.6	3.0	50	1.0	3.0	20	1.0	20	1.4

#### Тяжелый бетон

Стандартный бетон с увеличенным содержанием железа и добавкой 1.3% смеси ( $B^{10}, B^{11}$ ) в соотношении 1:3 по весу. Плотность 3.673 г/см<sup>3</sup>. Состав приведен в таблице ниже.

элемент	Fe	H	$B^{11}$	$B^{10}$	O	Na	Al	Si	Ca
% веса	55.35	0.35	0.975	0.325	35	1.3	2.0	2.0	2.7

#### Борированный полиэтилен

Стандартный полиэтилен с добавкой 5% смеси ( $B^{10}, B^{11}$ ) в соотношении 1:4 по весу. Плотность 0.93 г/см<sup>3</sup>. Состав приведен в таблице ниже.

элемент	H	C	$B^{11}$	$B^{10}$	O
% веса	11.6	61.2	4.0	1.0	22

## Список литературы

- [1] The LHC Study Group. The Large Hadron Collider: Conceptual Design. CERN/AC/95-05 (LHC) (1995).
- [2] The CMS Collaboration. CMS Letter of Intent. CERN/LHCC 92-3 (1992).
- [3] The Compact Muon Solenoid. Technical Proposal. CERN/LHCC 94-38 LHCC/P1 (1994).
- [4] The CMS Collaboration. The Tracker Project Technical Design Report. CERN/LHCC 98-6, CERN, 1998.
- [5] The CMS Collaboration. Muon Project Technical Design Report. CERN/LHCC 97-32, CERN, 1997.
- [6] The CMS Collaboration. Magnet Project Technical Design Report. CERN/LHCC 97-10, CERN, 1997.
- [7] The CMS Collaboration. Electromagnetic Calorimeter Technical Design Report. CERN/LHCC 97-33, CERN, 1997.
- [8] The CMS Collaboration. Hadron Calorimeter Technical Design Report. CERN/LHCC 97-31, CERN, 1997.
- [9] M. Huhtinen. Background in the outer muon system with the staged shielding during the initial years of LHC. CMS IN/98-025, CERN, 1998.
- [10] Engineering Design Review of Forward Shielding System. CERN CMS-GM-RR-0009 INFR-EDR-01.
- [11] I. Azhgirey, V. Talanov and A. Uzunian. Background muons generated in the CMS Detector Area by the beam losses in the LHC. CMS TN/95-202, CERN, 1995.
- [12] CEMESTE Meeting 31 Materials, CERN, July 28, 1999.
- [13] J. Ranft, "DPMJET-II, a Dual Parton Model event generator for hadron-hadron, hadron-nucleus and nucleus-nucleus collisions", in: Proc. of SARE2 Workshop, CERN, October 9-11, 1995; CERN/TIS-RP/97-05.
- [14] Ажгирей И.Л., Курочкин И.А., Таланов В.В. Развитие комплекса программ MARS для решения радиационных проблем ядерно-технических установок. В кн.: Труды 15-го рабочего совещания по ускорителям заряженных частиц, Протвино, 22-24 октября 1996 г.

*Рукопись поступила 16 августа 2000 г.*

И.Л.Ажгирей, В.В.Таланов

Моделирование формирования поля излучения за передней защитой эксперимента  
CMS на LHC. Исследование эффективности инженерного проекта защиты.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X.

Редактор Л.Ф.Васильева.

Технический редактор Н.В.Орлова.

---

Подписано к печати 22.08.2000. Формат 60 × 84/8. Офсетная печать.

Печ.л. 2. Уч.-изд.л. 1,6. Тираж 130. Заказ 184. Индекс 3649.

ЛР №020498 17.04.97.

---

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий  
142284, Протвино Московской обл.

