

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
Федеральное государственное бюджетное учреждение
Государственный научный центр Российской Федерации
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

На правах рукописи

Соловьянов Олег Владимирович

**Система калибровки и мониторинга
сцинтилляционного адронного калориметра
установки ATLAS радиоактивными источниками**

01.04.23 – физика высоких энергий

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Научный руководитель

к. ф.-м. н. Старченко Евгений Александрович

Протвино – 2015

Оглавление

Введение	4
Обзор литературы	6
Глава 1. Адронный калориметр установки ATLAS	15
1.1. Ускоритель LHC	15
1.2. Установка ATLAS	17
1.3. Адронный калориметр TileCal	18
1.4. Системы калибровки TileCal	21
Глава 2. Цезиевая система калибровки и мониторинга TileCal 24	
2.1. Принцип работы	24
2.2. Архитектура системы	26
2.3. Цезиевые источники	32
2.4. Система перемещения	36
2.5. Управление и контроль	44
2.6. Система сбора данных и программное обеспечение	54
2.7. Обработка данных	65
Глава 3. Калибровка и мониторинг TileCal	75
3.1. Инструментация и сертификация модулей	75
3.2. Калибровка модулей на тестовом пучке	78
3.3. Эквиализация и мониторинг калориметра	80
3.4. Мониторинг тестовых модулей	88
Глава 4. Методические работы	90
4.1. Спектрометрия гамма-источников	90
4.2. Оптические характеристики нестандартных модулей	95
4.3. Измерение характеристик сцинтилляционных счетчиков	115

Заключение	119
Список литературы	121

Введение

Актуальность темы. Современные эксперименты в физике высоких энергий предъявляют высокие требования к надежности производимых измерений и точности получаемых данных. Увеличение масштабов проведения экспериментов вместе с повышением используемых энергий, времён экспозиции, и усложнением вовлечённого оборудования, естественным образом, усиливает значение соответствующих калибровок детекторов, а всестороннее наблюдение (мониторинг) за их состоянием в процессе набора статистики, становится особенно важным.

В диссертации представлена система калибровки и мониторинга сцинтилляционного адронного калориметра установки ATLAS с помощью радиоактивных источников (Cs MonSys). Описана её структура, создание, практика использования, основные свойства и достигнутые результаты.

Научная новизна. Впервые создана система калибровки и мониторинга калориметра с помощью миниатюрных капсул с радиоактивными источниками перемещаемыми потоком жидкости по трубкам проложенным внутри рабочего объема детектора, накоплены и анализируются данные об изменении отклика калориметра в зависимости от времени и загрузки, вызванной увеличением светимости столкновений.

Практическая значимость. Результаты, изложенные в диссертации, используются для точной энергетической калибровки, выравнивания откликов ячеек адронного калориметра TileCal, последующего наблюдения и оперативной корректировки калибровочных коэффициентов в процессе набора статистики. Принципы и технические решения выработанные при создании Cs MonSys использованы в аналогичной системе калибровки адронного калориметра эксперимента LHCb. Произведённые дополнительные методические исследования позволили уточнить оптические свойства нестандартных ячеек адронного калориметра и вспомогательных сцинтилляционных счетчиков установки ATLAS,

используемых для триггера на физическое взаимодействие.

Положения, выносимые на защиту: Разработка и создание системы калибровки и мониторинга сцинтилляционного адронного калориметра с помощью радиоактивных источников перемещаемых потоком жидкости внутри рабочего объема калориметра. Создание программного обеспечения контроля и управления системой, сбора и обработки данных. Результаты методических исследований оптических свойств сцинтилляционных пластин стандартной и нестандартной конфигурации.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на рабочих совещаниях сотрудничества ATLAS, на международных конференциях, публиковались в периодической литературе.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 8-ми печатных работах, из них 3 статьи в рецензируемых журналах [27, 46, 51], и 3 статьи в сборниках трудов конференций CHEP2007 [34], CALOR2008 [43], INSTR14 [54].

Личный вклад автора. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в создание системы и опубликованные работы. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами. Все представленные в диссертации результаты получены лично автором или в соавторстве с другими членами эксперимента ATLAS.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, обзора литературы, четырех глав, заключения и библиографии. Общий объем диссертации — 126 страниц, из них 117 страниц текста, включая 77 рисунков и 6 таблиц. Библиография включает в себя 58 наименований на 6-ти страницах.

Обзор литературы

В современных экспериментах физики высоких энергий важную роль играют детекторы, позволяющие измерить энергию частиц или групп частиц (струй) по их взаимодействию с веществом — калориметры полного или частичного поглощения. Очевидно, что определение энергии с требуемой точностью и в соответствии с задачами эксперимента невозможно, без специализированных калибровок. Кроме того, работа детекторов длительное время, при значительных радиационных нагрузках, вызывает необходимость наблюдения (мониторинга) калориметра в условиях изменения регистрируемой интенсивности и возможного изменения качества самого калориметра (например, старения).

В работе [1] Wigmans выделяет следующие вопросы затрудняющие калибровку калориметров в зависимости от их конструкции и принципа регистрации:

- Зависимость отклика калориметра от типа частицы (струи);
- Зависимость калибровочных констант от энергии частицы;
- Зависимость отклика калориметра от «возраста» регистрируемого ливня;

Эти эффекты могут приводить к систематическим ошибкам при измерении энергии калориметром. Там же приводятся общепринятые методы калибровки калориметрических детекторов, которые могут быть использованы и для целей мониторинга:

- Калибровка частицами во время набора данных (*in situ*);
- Калибровка пучками частиц известной энергии (*test beams*);
- Калибровка светом (светодиодами или лазером);
- Калибровка радиоактивными источниками;

Каждый из перечисленных способов имеет как преимущества, так и недостатки, поэтому обычно применяется в комплексе с другими, что позволяет осуществлять интерполяцию и перепроверку данных полученных разными методами, различными частями детектора, в том числе и при наблюдении их изменения во времени. Такой подход существенно повышает надежность и точность результатов, как калибровки, так и мониторинга.

Для калориметров, основанных на транспортировке и регистрации света скинтиллятора, система калибровки с помощью радиоактивных источников является вполне естественной, поскольку процессы генерации калибровочного сигнала наиболее близки к реальным регистрируемым процессам и позволяют проверить сразу всю оптическую схему детектора вплоть до регистратора. Кроме того, радиоактивные источники, наиболее распространенные из которых приведены в таблице 1, дают стабильный и хорошо предсказуемый калибровочный сигнал, при правильной организации взаимодействия с активным материалом детектора. Подобные системы калибровки применялись во множестве различных экспериментов в физике высоких энергий, и зарекомендовали себя своей точностью и стабильностью. Рассмотрим далее несколько примеров систем калибровки калориметров радиоактивными источниками.

Нуклид	Время полураспада (лет)	Частицы
^{60}Co	5,3	γ 1,333 МэВ
^{90}Sr	28,5	β 0,546 МэВ
^{137}Cs	30,2	γ 0,662 МэВ

Таблица 1. Основные характеристики некоторых радионуклидов применяемых для калибровки калориметров.

В своей работе, описывающей создание и работу калориметра для эксперимента CERN UA2, Веер и др. [2] приводят описание системы калибровки и мониторингования калориметра с помощью перемещаемого радиоактивного источника ^{60}Co . В дополнение к системе мониторингования коэффициентов уси-

ления фотоумножителей, с помощью подсвечивания ксеноновой лампой сцинтилляционных пластин, каждый модуль был откалиброван путем точного позиционирования капсулы с радиоактивным источником перед торцом модуля и считывания интегрированного тока от соответствующих фотоумножителей. Капсула с источником ^{60}Co (период полураспада 5,2 года) мощностью ~ 4 мКи передвигалась вручную на проволоке внутри направляющей трубки, с остановкой напротив каждого модуля. Калибровка требовала длительного времени (12 часов) и непосредственного доступа к детектору. Тем не менее, применение подобного метода позволило наблюдать и независимо подтвердить дрейф отклика калориметра в течение работы эксперимента и осуществить его точную калибровку.

Другим примером использования кобальтовых источников является система калибровки калориметра в эксперименте CERN WA-70, описанная Bonesini и др. в работе [3]. В ней, в дополнение к системе калибровки фотоумножителей с помощью импульсов света от лазера, использовалась система автоматического перемещения 16-ти источников ^{60}Co интенсивностью 5 мКи. Каждый источник был заключен в сферическую капсулу из нержавеющей стали диаметром 2,5 мм и закреплен на цепи, приводящейся в движение электромотором. Цепь обеспечивала перемещение источника по «квадратной» траектории напротив модуля калориметра. Для хранения источников вне процедуры калибровки использовались свинцовые «гаражи». Для безопасности персонала и детектора, в случае нештатных ситуаций, была предусмотрена система блокировки на микро-переключателях. Система движения источников управлялась компьютером. Точность позиционирования источника была лучше 1 мм, а повторяемость результатов двух последовательных сканов составляла менее 1,5 %. Кроме мониторинга отклика калориметра, эта система использовалась также для выравнивания амплитуды сигналов от разных фотоумножителей, что позволило снизить неравномерность отклика с изначальных 15 % до менее чем 4 %. Также с помощью этой системы удалось оценить уменьшение прозрачности

сцинтиллятора на 3–4 % в год в результате старения.

Vamberger [4] и Behrens [5] описывают систему калибровки источниками ^{60}Co калориметров установки DESY ZEUS. Особенностью калориметров данной установки является применение урановых пластин, обладающих собственной активностью, которая может быть еще одним источником калибровки. Высокие требования к точности измерения (не более 1 % систематической ошибки) обусловили сложную многокомпонентную систему калибровок, следящую за характеристиками системы сцинтиллятор \rightarrow сместитель-спектра \rightarrow фотоумножитель \rightarrow регистрирующая электроника. Необходимость использования системы с кобальтовым источником была вызвана неоднозначностью интерпретации причин изменения отклика на излучение урана, например нельзя было разделить изменения от механических повреждений от старения сцинтилляционных пластин. Источник ^{60}Co мощностью 2 мКи, заключен в конце тонкостенной трубки из нержавеющей стали внешним диаметром 1,08 мм и длиной 7 м. Эта трубка в свою очередь перемещается внутри направляющей медной трубы с внешним диаметром 2,5 мм. Привод источника позволяет выбрать по какой направляющей передвигаться и на какое расстояние переместить источник внутри неё. В основной фазе измерения источник перемещается с линейной скоростью 5 мм/с. Одним из важных применений данной системы стал контроль качества модулей калориметра, поскольку с помощью подобной системы была видна структура оптической системы калориметра, в частности сопряжения сцинтилляционных пластин со спектро-смещающими световодами. Функция отклика модуля в зависимости от положения источника позволяла выделить такие дефекты изготовления калориметра, как относительное смещение световодов и сцинтилляционных пластин. Кроме того, как сообщает Vohnet [6], использование системы в течение 10 лет и мониторинг стабильности, позволил также заметить ухудшение равномерности отклика калориметра вследствие радиационного повреждения и старения сцинтилляционных пластин.

Для калибровки и мониторинга калориметра установки Fermilab CDF

была создана система с механически перемещаемым источником ^{137}Cs , описанная в работе Hahn и др. [7]. Система перемещения позволяла передвигать ^{137}Cs источник мощностью 3 мКи со скоростью ~ 7 мм/с и считывать интегрированный ток с фотоумножителя каждые 0,3 с. За каждым из 48-ми модулей калориметра закреплялся свой источник. В отличие от предыдущих систем, где источник точно позиционировался для калибровки калориметра, разработчики отказались от системы обратной связи в пользу простого перемещения источника с постоянной скоростью. Источники были заключены в медные капсулы и передвигались проволокой внутри медных трубок и трубок изготовленных из нержавеющей стали. Модули могли калиброваться одновременно и полный скан занимал всего 1 час. Между сканами источники хранились в небольших «гаражах» из свинца, закрепленных на торце модулей калориметра. Высокая стабильность (период полураспада более 30 лет) и малая проникающая способность гамма-квантов источника ^{137}Cs позволяли делать регулярные сканы во время сеансов набора статистики (при отсутствии пучка). В то время как токи фотоумножителей считывались стандартной системой сбора данных, для перемещения радиоактивных источников использовалась отдельная система управления и контроля. Для контроля качества, во время скана операторам выводился график отклика фотоумножителей в виде развертки во времени. Система калибровки позволила точно откалибровать модули калориметра и наблюдать эффект увеличения световыхода сцинтиллятора под воздействием магнитного поля от сверхпроводящего соленоида установки. Вместе с системой калибровки на светодиодах и ксеноновых лампах, цезиевая калибровка позволила установить, что причина эффекта лежит именно в сцинтилляторе, а не в изменении характеристик фотоумножителей в присутствии магнитного поля.

В дальнейшем Barnes [8, 9, 10, 11] описывал возможности и преимущества подобной системы на основе ^{137}Cs для калибровки сцинтилляционных калориметров.

Аналогичная система использовалась для калибровки прототипов сцин-

тилляционного калориметра установки SDC в Fermilab. Harty [12] и Green [13] сформулировали следующие применения системы: контроль качества производства модулей; перенос калибровки на тестовых пучках от одних модулей к другим; наблюдение за стабильностью отклика системы и последующие перекалибровки. Были рассмотрены плюсы и минусы использования различных радиоактивных изотопов для системы калибровки, и выбор был остановлен на ^{137}Cs , как наиболее подходящим для задач системы и особенностей конструкции калориметра. В работе Barnes [14] приводится описание дальнейших требований и первых результатов работы системы. «Точечный» радиоактивный источник ^{137}Cs мощностью ~ 5 мКи перемещался тонкостенной металлической трубкой внутри нейлоновых трубок, которые пронизывали каждый сцинтилляционный тайл модуля калориметра. Длина приводной трубки могла достигать 11 м. Скорость считывания токов фотоумножителей не превышала 10 Гц. Источник перемещался с минимальной скоростью 8 мм/с. Перемещение источника поперек сендвича железо-сцинтиллятор позволяло увидеть изменение отклика вследствие коллимирования гамма-квантов источника железными пластинами. Система позволила добиться повторяемости калибровки в 0,3 % с систематической погрешностью 1,3 %-1,8 %.

В отличие от предыдущих систем, построенных на перемещаемых точечных радиоактивных источниках, система абсолютной калибровки калориметра эксперимента ВаВаг в SLAC, описанная в работах Button [15] и Bauer [16], в качестве источника излучения использует нейтронно-активированную жидкость излучающую фотоны. Нейтронный генератор производит поток нейтронов с энергией 14 МэВ мощностью до 10^9 частиц/с, который облучает инертную фторсодержащую жидкость FluorinertTM FC-77, вызывая реакцию активации $^{16}\text{F} + n \rightarrow ^{16}\text{N} + \alpha$ и последующий распад $^{16}\text{N} \rightarrow ^{16}\text{O} + \gamma$, с периодом полураспада 7 с. и фотоном с энергией 6,13 МэВ. Насос прокачивает жидкость по алюминиевым трубкам по замкнутому контуру через активационную баню и змеевик перед модулями калориметра, с производительностью 150 л/мин. От-

клик калориметра на калибровочные фотоны регистрируется с помощью той же самой системы сбора данных, используемой для набора статистики. Данные считываются с частотой 20 кГц, что дает возможность получать достаточно точные формы сигнала. Калибровка производится в течение 30 минут каждые 10 дней, в момент отсутствия пучка от ускорителя частиц. Данная система позволила осуществлять калибровку кристаллов калориметра с точностью до 0,5 % и провести длительное наблюдение за изменением световыхода кристаллов вследствие радиационных повреждений в течение 4-х лет работы.

Эксперимент CMS в CERN использует источники ^{137}Cs и ^{60}Co для калибровки своих калориметрических детекторов. Hazen [17] и Abdullin [18] описывают систему калибровки сцинтилляционного адронного калориметра (сэндвич медь-сцинтиллятор) перемещаемым источником ^{137}Cs , аналогично системе использовавшейся на CDF. Источник перемещается над сцинтилляционными пластинами со скоростью 10 см/с. Сигнал с фотодетекторов оцифровывается с частотой 40 МГц, как и в случае основного набора данных. Данные с АЦП аккумулируются в гистограммы, соответствующие 2 мм перемещения источника вдоль сцинтилляционной пластины. Дальнейшая обработка гистограмм позволяет получить необходимые характеристики для каждого сцинтиллятора. Akchurin[19] описывает систему калибровки переднего калориметра установки CMS с помощью источника ^{60}Co перемещаемого внутри калибровочных трубок со скоростью 10 см/с. Аналогично предыдущей системе, данные оцифровываются со стандартной частотой 40 МГц и затем гистограммируются для извлечения калибровочных характеристик. Удалось достичь точности калибровки в 5 %, с проверкой результатов на тестовом пучке частиц.

Как видно, системы калибровки калориметров на основе использования радиоактивных источников довольно широко представлены в мировой практике, основные характеристики вышеупомянутых систем сведены в таблицу 2. Естественно, возможность этого подхода рассматривалась в применении к адронному калориметру TileCal эксперимента ATLAS.

Детектор	Нуклид	Перемещение	Данные
CERN UA2	^{60}Co	вручную на проволоке	интегрированный ток
CERN WA70	^{60}Co	мотором на проволоке	интегрированный ток
DESY ZEUS	^{60}Co	мотором на трубке	интегрированный ток
Fermilab CDF	^{137}Cs	мотором по трубкам	быстрая оцифровка
Fermilab SDC	^{137}Cs	мотором по трубкам	быстрая оцифровка
SLAC BaBar	^{16}N	насосом по трубкам	быстрая оцифровка
CERN CMS	^{60}Co	мотором по трубкам	быстрая оцифровка
CERN CMS	^{137}Cs	мотором по трубкам	быстрая оцифровка

Таблица 2. Системы калибровки перемещаемыми радиоактивными источниками.

Ещё на ранних этапах проектирования TileCal, были сформулированы основные задачи и требования к системе его калибровки и мониторинга, в соответствии с ролью и задачами калориметра в установке:

- Возможность контроля всей оптической системы, всех ячеек модулей калориметра, с точностью и повторяемостью не хуже 1 %;
- Обеспечение возможности распространения энергетической калибровки отдельных модулей на реальных частицах, на все модули калориметра;
- Поддержание энергетической калибровки в течение длительного времени (годы);
- Возможность выравнивания отклика от различных сегментов калориметра для обеспечения однородности модулей калориметра на уровне лучше 10 %;
- Обеспечивать наблюдение и измерение возможных изменений характеристик калориметра во времени и способствовать определению причин подобных эффектов;

- Система должна быть автоматизирована, позволять работать в удалённом доступе и обеспечивать калибровку всего калориметра за достаточно короткое время (часы);
- Конструкция и принципы системы должны обеспечивать её безопасное использование и соблюдать все геометрические ограничения, вытекающие из конструкции калориметра;

В силу конструктивных и геометрических особенностей TileCal, применение радиоактивных источников для целей его калибровки и мониторинга, выглядит привлекательным. Используя радиоактивные источники система, представленная в данной работе и отвечающая вышеприведённым задачам и требованиям, была спроектирована и создана для сцинтилляционного адронного калориметра TileCal установки ATLAS.

Адронный калориметр установки ATLAS

1.1. Ускоритель LHC

Large Hadron Collider (LHC) [20] является в настоящее время самым большим и наиболее мощным ускорителем частиц в мире. Он представляет собой два пересекающихся ускорительно-накопительных кольца для разгона и столкновения протонов и расположен в тоннеле длиной 26.7 км, построенного для ускорительного комплекса LEP в 1984–1989 годах в CERN.

Основной задачей экспериментальных установок на LHC является поиск новой физики за пределами Стандартной Модели, при энергиях столкновения в центре масс до 14 ТэВ со светимостью до 10^{34} см⁻²с⁻¹.

Главные характеристики ускорителя LHC приведены в таблице 1.1.

Перед тем как попасть в адронный коллайдер, пучки протонов предварительно ускоряются в нескольких ускорителях с увеличивающейся энергией, до 470 ГэВ, и далее наращивают энергию внутри коллайдера вплоть до 7 ТэВ¹. Схема ускорительного комплекса представлена на рисунке 1.1.

Во время работы ускорителя пучок проходит несколько фаз - инжекции, ускорения, настройки и оптимизации, стабильных столкновений и, наконец, сброса пучка. Время между сбросом и новыми столкновениями пучка может составлять менее двух часов, что налагает определенные рамки на длительность возможной калибровки детекторов между циклами ускорителя.

Изначально предполагалось что коллайдер будет работать по 6 месяцев подряд в году, с остановкой на следующие 6 месяцев для проведения текущего ремонта и модернизации. Затем эти планы были скорректированы в сторону увеличения времени работы и уменьшения числа и длительности технических

¹ 3,5 ТэВ в 2010, 4 ТэВ в 2012 и 6,5 ТэВ в 2015

Энергия инжекции	450 ГэВ
Энергия столкновения	7 ТэВ
Число частиц в сгустке	$1,15 \times 10^{11}$
Число сгустков	2808
Длина сгустка	7,5 см
Светимость	$10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$
Частота столкновений	40,08 МГц
Частота оборотов	11,15 кГц
Размер пучка	16 мкм
Длина кольца	26,66 км
Радиус кольца	4,24 км
Число дипольных магнитов	1232
Магнитное поле	8,33 Тл

Таблица 1.1. Основные параметры ускорителя LHC [20]

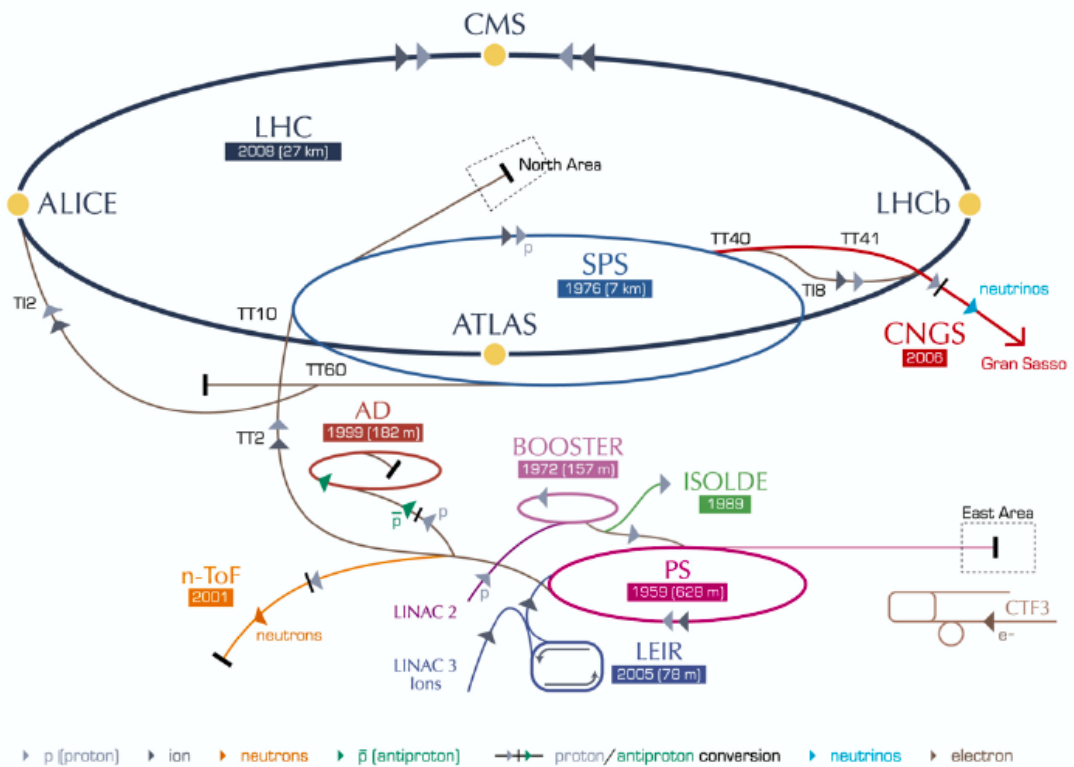


Рис. 1.1. Схема ускорительного комплекса LHC

остановок. Во время этих остановок пучок отсутствует в течение недели, что позволяет выполнять длительные процедуры калибровки или работы по ремонту и замене оборудования.

Ускорительный комплекс LHC предполагается использовать в более или менее неизменном виде с 2009 до, ориентировочно, 2024 года, когда планируется его модернизация с целью многократного повышения светимости — проект HL-LHC. Для проработки перспективных ускорителей, в CERN создана группа будущих кольцевых коллайдеров (Future Circular Colliders, FCC) [21].

1.2. Установка ATLAS

Установка ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS) [22] является одним из детекторов общего назначения, сконструированного таким образом, чтобы максимально использовать потенциал возможных открытий на ускорителе LHC.

Условия работы на LHC налагают следующие достаточно высокие требования на детекторы установки:

- быстрая радиационно-стойкая электроника;
- большой аксептанс, сочетающийся с высокой гранулярностью детекторов;
- высокое разрешение момента заряженных частиц;
- электромагнитный калориметр высокого разрешения для идентификации фотонов и электронов вместе с адронным калориметром для точного измерения энергии струй и недостающей энергии;
- мюонная идентификация в большом диапазоне импульсов;
- высокоэффективный триггер для объектов с малым поперечным импульсом;

Общая схема детектора ATLAS показана на рисунке 1.2.

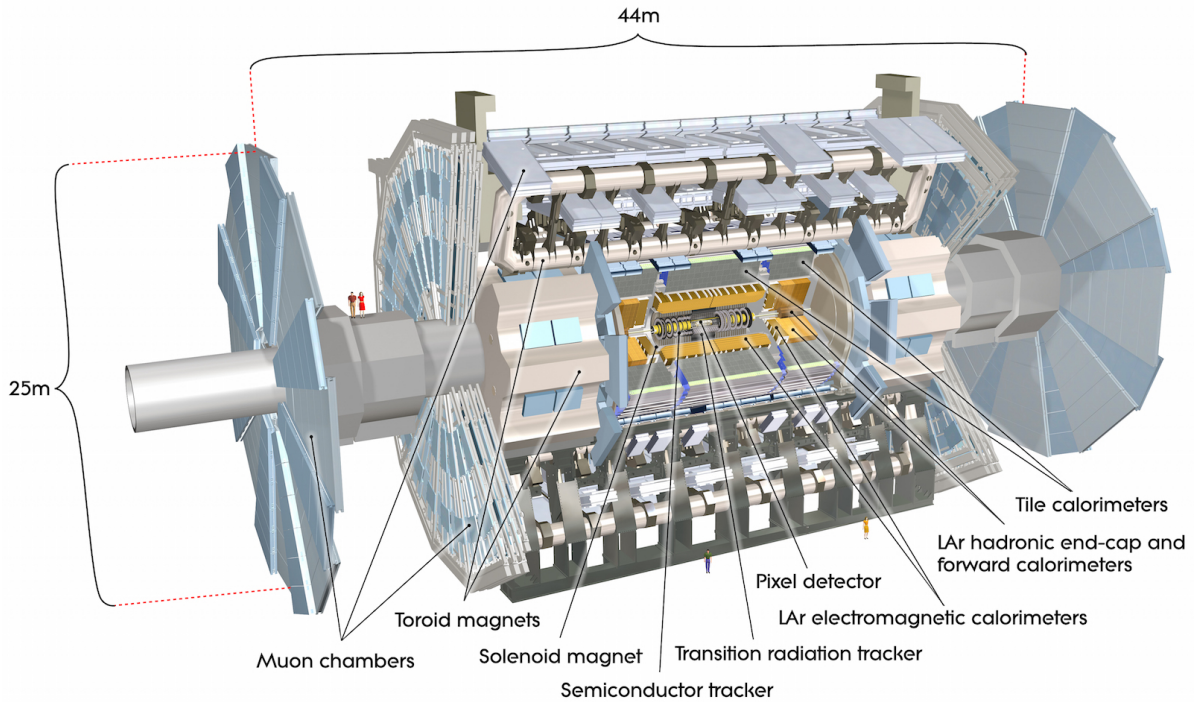


Рис. 1.2. Структура детектора ATLAS [22]

Детектор ATLAS имеет цилиндрическую структуру с передне-задней симметрией и состоит из следующих крупных подсистем: внутренней трековой системы, калориметров и мюонного спектрометра.

Одной из отличительных особенностей установки ATLAS является система магнитов [23, 24], состоящая центрального соленоида, центрального воздушного тороида и двух торцевых тороидов.

Калориметрическая система покрывает зону по псевдобыстроте в $|\eta| < 4,9$, и состоит из электромагнитного жидкоаргонового калориметра (LAr) и сцинтилляционного адронного калориметра (TileCal). Торцевые адронные калориметры так же выполнены по жидкоаргоновой технологии. На рисунке 1.3 представлена калориметрическая система установки ATLAS.

1.3. Адронный калориметр TileCal

Сцинтилляционный адронный калориметр (Tile Calorimeter, TileCal) создан по слоистой схеме с использованием стальных пластин в качестве поглощи-

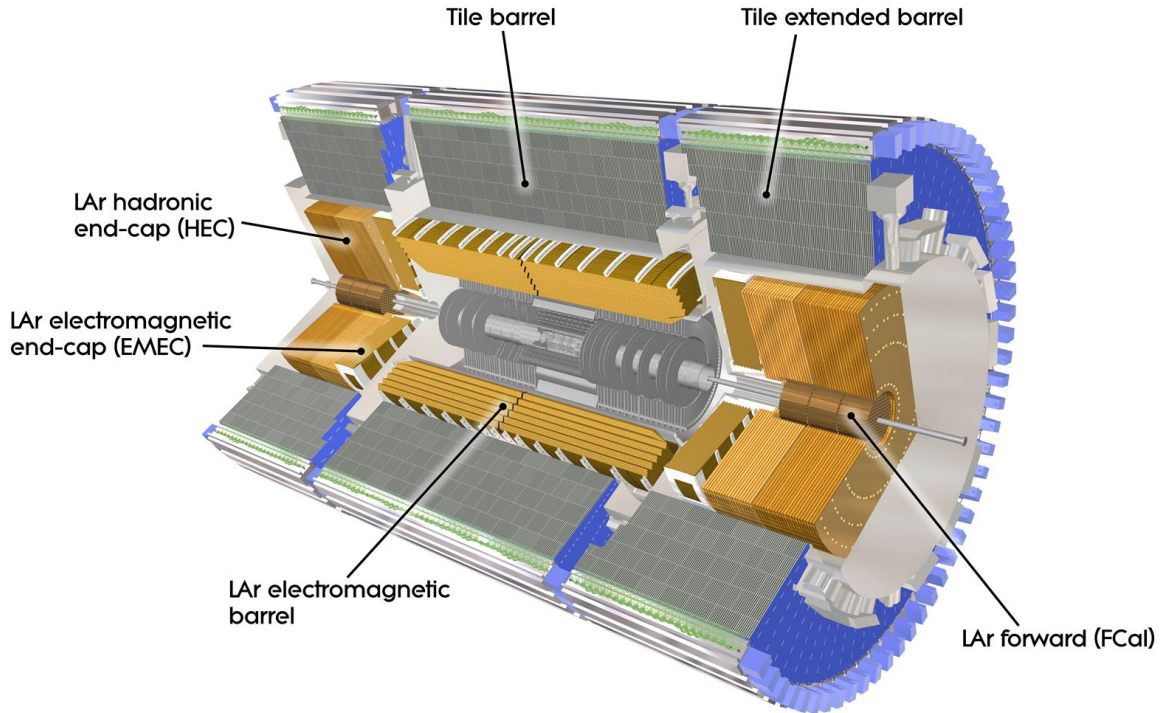


Рис. 1.3. Калориметры установки ATLAS [22]

теля и пластин (tiles) из органического сцинтиллятора в качестве активного материала. Конструкция калориметра, и технические параметры описаны в [25], а достигнутые результаты и основные свойства — в [26, 27].

TileCal состоит из одной центральной (Tile long barrel, LB), и двух боковых (Tile extended barrel, EB) цилиндрических секций с внутренним и внешним радиусами 2280 и 4230 мм соответственно (см. рис. 1.3). Длина LB по оси пучка — 5440 мм, а двух боковых секций поименованных как ЕВА и ЕВС — 2910 мм. Внутри адронного калориметра расположен криостат электромагнитного калориметра, поддерживаемый механической структурой TileCal.

Каждый из трёх цилиндров, в свою очередь, разбит на 64 независимых модуля в азимутальном плане, а трёх-миллиметровые пластины сцинтиллятора каждого модуля, расположенные в $r - \phi$ плоскости на расстоянии 18,2 мм друг от друга, образуют матрицу чувствительных элементов калориметра (рис. 1.4).

В зависимости от расположения относительно оси пучков, сцинтилляционные пластины разделяются по размеру и пронумерованы от 1 (малые) до

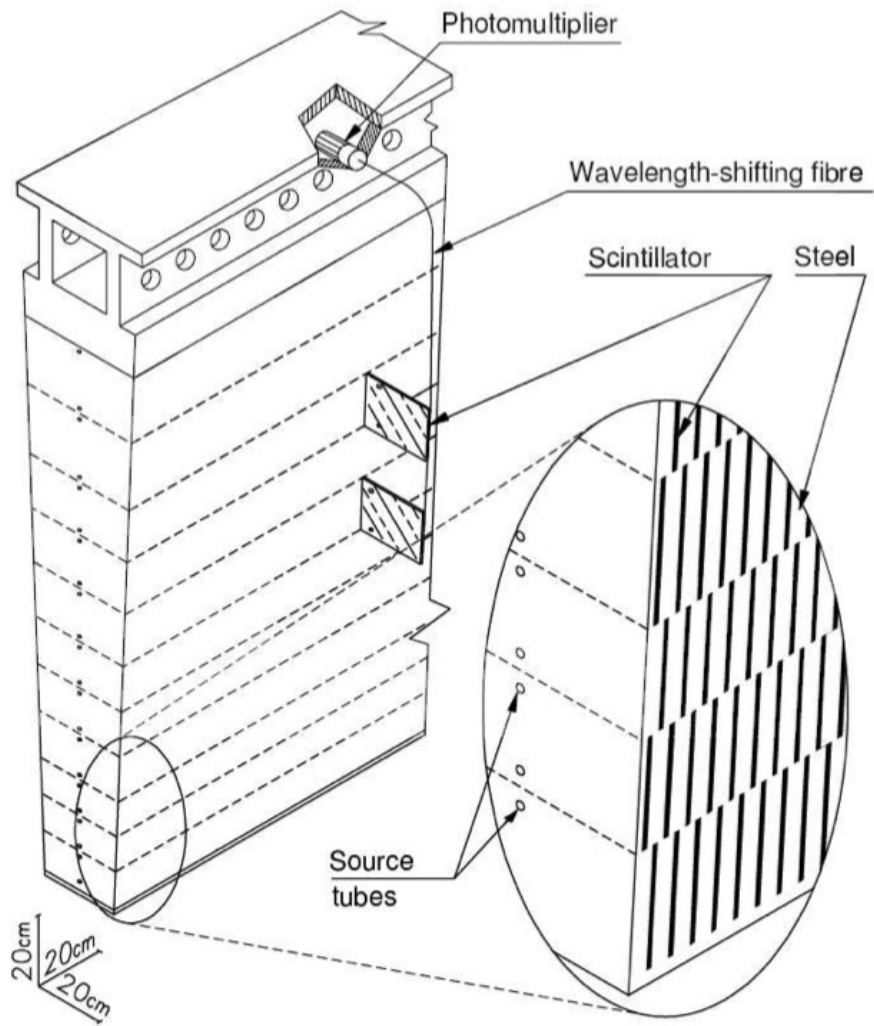


Рис. 1.4. Модуль калориметра TileCal. Показаны сцинтилляционные тайлы, слоистая структура сталь-сцинтиллятор, спектросмещающие волокна и фотоумножители [25]

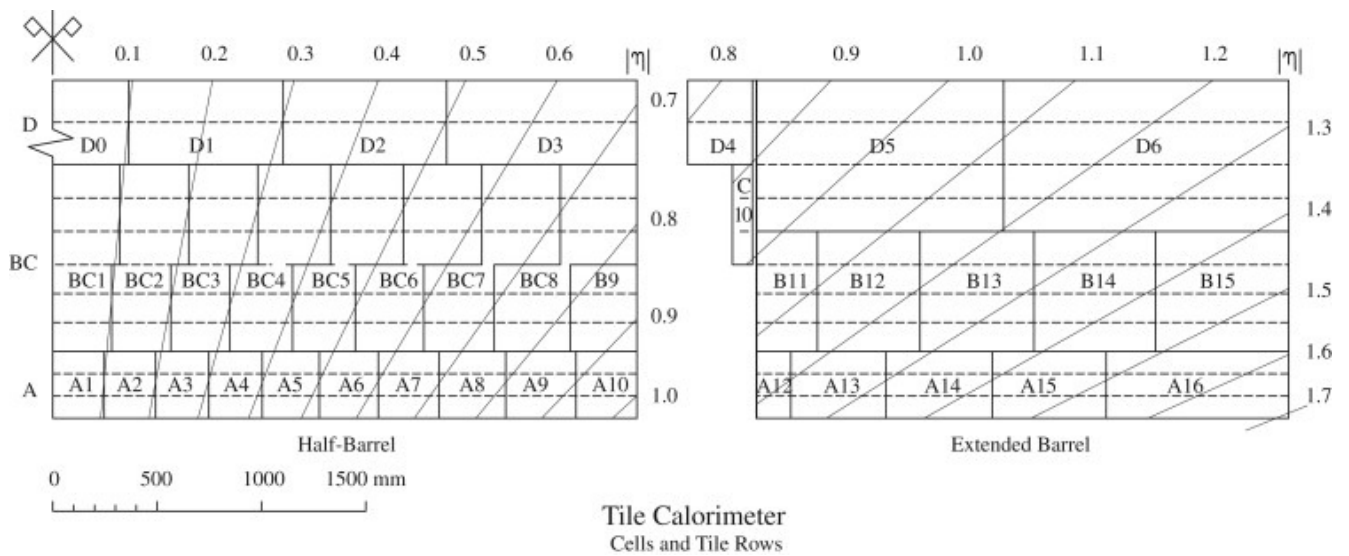


Рис. 1.5. Разбиение калориметра на ячейки и ряды тайлов в плоскости Z-Y [25]

11 (большие) начиная от малого радиуса. В пластинах поглотителя и сцинтиллятора имеются отверстия $\varnothing 9$ мм для прохождения калибровочных трубок и фиксирующих стержней (см. рис. 1.4).

Рождённый в сцинтилляционных пластинах прохождением заряженных частиц свет собирается с их обеих граней пучками спектросмещающего (WLS) волокна (Kugaгау Y11), размещённого в непрозрачных пластиковых «профилях» на обеих сторонах каждого модуля. Сгруппированные пучки волокна доставляют свет к фотоумножителям (ФЭУ) Hamamatsu R7877, формируя ячеистую структуру каждого модуля калориметра как по радиусу, так и в продольном плане (рис. 1.5). При этом каждая из 45 ячеек LB модуля и 14 ячеек EB модуля просматривается двумя ФЭУ, что увеличивает надёжность и качество сбора света, улучшает физическую однородность калориметра. Общее число каналов адронного калориметра достигает 10 тысяч. Проектное энергетическое разрешение струй составляет $\Delta E/E = 50\%/\sqrt{E} \oplus 3\%$.

1.4. Системы калибровки TileCal

Для калибровки адронного калориметра установки ATLAS используется ряд систем, позволяющих подавать тестовый сигнал на различных стадиях считывающей цепочки, эти системы в деталях описаны в работах [28, 29, 30]

Для лучшего понимания особенностей и необходимости калибровок рассмотрим путь прохождения сигнала в калориметре до его регистрации. Поток частиц, взаимодействуя со сцинтилляционными тайлами, производит свет, который транспортируется спектросмещающими волокнами к фотоумножителям. Сигнал от фотоумножителей формируется и затем дополнительно усиливается. Далее этот сигнал оцифровывается АЦП и передается в систему сбора данных где, используя набор калибровочных коэффициентов для каждого индивидуального канала, вычисляется выделенная энергия в ГэВ:

$$E(\text{GeV}) = A(\text{ADC}) \times C_{\text{ADC} \rightarrow pC} \times C_{pC \rightarrow \text{GeV}} \times C_{Cs} \times C_{\text{Laser}} \quad (1.1)$$

Все эти коэффициенты могут меняться во времени, в связи с чем необходимо иметь ряд калибровочных систем для получения этих коэффициентов и наблюдения за их стабильностью.

В адронном калориметре калибровочные системы образуют функциональную последовательность (рис. 1.6) в соответствии с конструкцией оптической и электрической части прохождения сигнала.

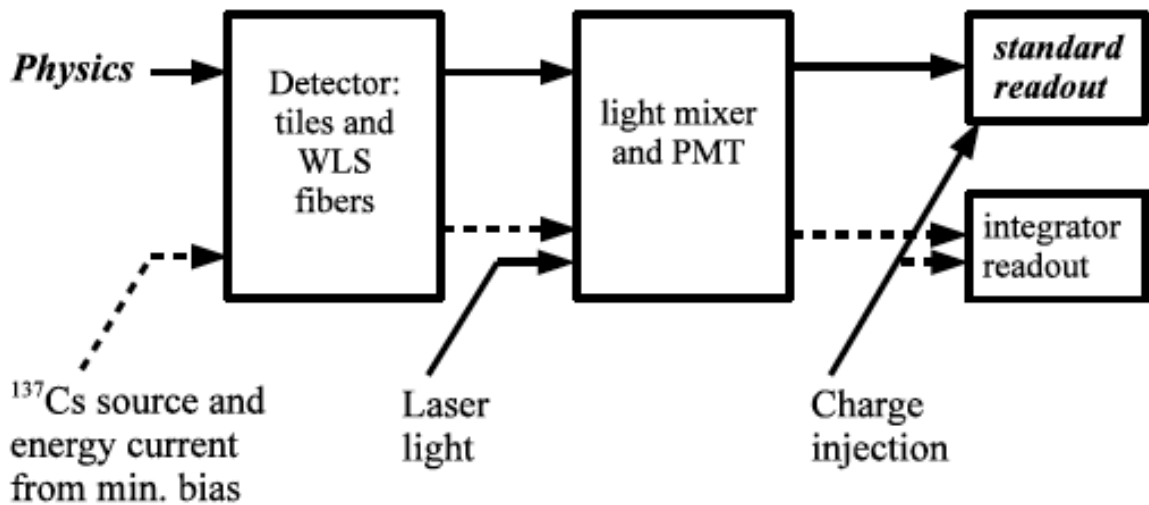


Рис. 1.6. Схема регистрации и обработки сигнала с сопутствующими системами калибровки [27]

Для калибровки АЦП используется система впрыска заряда (CIS) [31]. На вход каждого усилителя подаётся точно отмеренное количество заряда из калибровочного конденсатора, имитируя сигнал от ФЭУ. Кроме собственно калибровки, эта система позволяет выявить нелинейность работы АЦП, неработающие каналы и такие проблемы, как «залипающие биты», а так же дополнительную проверку стабильности настройки временных задержек в системе. Точность калибровки составляет в среднем 0,7 % для каждого канала.

Следующий уровень калибровки осуществляется с помощью лазерной системы [32], которая позволяет наблюдать отклики индивидуальных фотоумножителей на импульсы лазерного света, доставляемые к каждому фотоумножителю по разветвлённой системе световодов. Эта система позволяет наблюдать

за стабильностью коэффициента усиления фотоумножителя и, кроме того, используется для настройки временных задержек АЦП [33, 34].

Для мониторинга загрузки калориметра во время набора статистики используется система считывания интегрированных токов с фотоумножителей каждой из ячеек калориметра [35]. На основе этой информации вычисляется также мгновенная светимость, в дополнение и для проверки основных детекторов светимости установки.

Эти калибровочные системы, в силу своих особенностей, не могут тестировать сцинтиллятор и собирающее свет WLS волокно, имеют внутренние нестабильности и далеки по природе от «реальных» процессов формирования отклика калориметра. Cs MonSys позволяет донести калибровочный сигнал от радиоактивного источника ко всем тайлам калориметра и проследить весь путь прохождения света до ФЭУ.

Глава 2

Цезиевая система калибровки и мониторинга TileCal

2.1. Принцип работы

Исходя из общих требований, предъявляемых к адронному калориметру [25], система его калибровки и мониторинга должна иметь возможность контролировать весь оптический тракт от сцинтиллятора до ФЭУ, имея точность не хуже 1 % в течении длительного времени.

Для выполнения этих требований было предложено [36] использовать ^{137}Cs источник, перемещающийся внутри тела калориметра и доставляющий в каждую ячейку известную и стабильную порцию энергии, отображающую усреднённый ожидаемый отклик ячейки к реальным событиям (частицам, струям и т.п.). Схематически принцип работы системы показан на рисунке 2.1.

Поток гамма квантов с энергией $E = 0,662$ МэВ от ^{137}Cs источника рождает в сцинтилляторе и окружающем поглотителе электроны производящие свет, доставляемый через спектросмещающие (WLS) волокна к ФЭУ. Средняя длина поглощения гамма квантов в железе хорошо согласуется с характерной структурой калориметра (18.2 мм), так что картина взаимодействия источника и калориметра позволяет разрешить как отклик отдельной пластины, так и восстановить усреднённые характеристики всей ячейки. Величина отклика определяется по току ФЭУ, принцип измерения которого описан в [35]. Период полураспада изотопа ^{137}Cs (30,2 лет, что соответствует 2,3 % уменьшению интенсивности в год) достаточно большой для обеспечения работы системы в течении всего планируемого времени работы установки ATLAS.

Как уже было описано выше, две другие системы используются при калибровке и мониторинге калориметра: лазерная и система впрыска заряда,

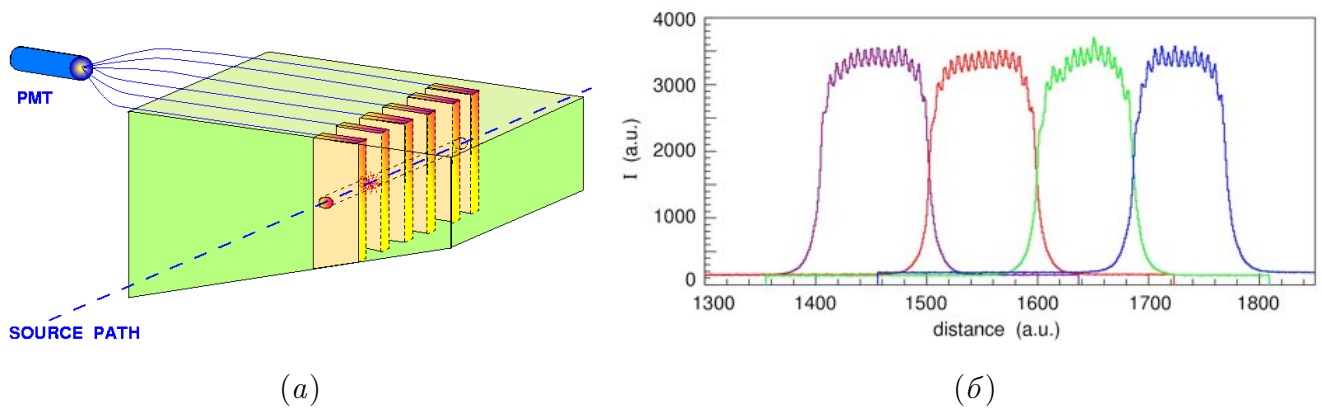


Рис. 2.1. Принцип работы калибровочной системы ^{137}Cs (а); пример отклика ФЭУ четырёх соседних ячеек на ^{137}Cs источник в зависимости от его положения (б) [36]

однако, они не могут обеспечить мониторинг качества оптического тракта полностью (сцинтиллятор, спектросмещающее волокно, сопряжение с ФЭУ), тогда как использование ^{137}Cs источника даёт эту возможность.

Использование реальных событий (физическая калибровка) или космических мюонов позволяют частично дополнить возможности по калибровке и мониторингу калориметра (и используются в TileCal), но, естественно, имеют свои ограничения по доступности, применимости, апертуре, точности и т.п.

Всё это делает использование перемещаемых ^{137}Cs источников важным методом калибровки и мониторинга калориметра. Однако, чтобы измерить отклики от всех 463000 пластин сцинтиллятора во всех 192 модулях калориметра, соблюдая при этом все ограничения геометрии, доступности и безопасности, система должна быть достаточно продумана и развита во всех отношениях, как механико-техническом, электронном, так и архитектурном, достаточно надёжно контролируема и управляема.

Такая система (Cs MonSys) для калибровки и мониторинга TileCal, основанная на использовании перемещаемых потоком жидкости источников, была спроектирована, создана и установлена [37]. В системе несколько миниатюрных контейнеров (капсул) содержащих ^{137}Cs источники с активностью до 10 мКи перемещаются, проходя сквозь все ячейки всех модулей, в то время как величины токов ФЭУ регистрируются синхронно с движением капсул.

2.2. Архитектура системы

Все три подсистемы калибровки Cs MonSys TileCal для секций ЕВА, ЕВС и ЛВ являются функционально независимыми и обладают идентичной архитектурой. На рисунке 2.2 представлена схема работы гидравлической части системы одной из секций, состоящей в основном из следующих объектов:

- Последовательности калибровочных трубок для прохождения источника сквозь все ячейки секции вместе с устройствами хранения источника в нерабочем состоянии («гаражи»);
- Эта последовательность разбита тройниками на несколько сегментов (контуров) разделяющих её на подсекции в 4–8 модулей. Тройники соединяют общий объём калибровочных трубок с подводными трубками, в то же время, отделяя ту его часть, где происходит перемещение источника от внешнего объёма;
- Подводящие трубки служат для подачи потока жидкости в тройники, создавая тем самым движущую силу перемещающую капсулу с источником внутри текущего контура;
- Насосное и распределительное устройства (гидропривод), создающие необходимое давление в тройниках и поток жидкости в текущем контуре в желательном направлении;
- Ёмкости для хранения жидкости между заполнениями системного объёма;

Тройники позволяют капсуле с источником пройти из калибровочных трубок одного контура в трубки другого и, в то же время, служат точками ввода и вывода жидкости из контура. Комбинируя точки входа-выхода жидкости и прилагаемое давление, как это показано на том же рисунке 2.2, создаётся временный поток жидкости в малом объёме (контуре), достаточный для движения

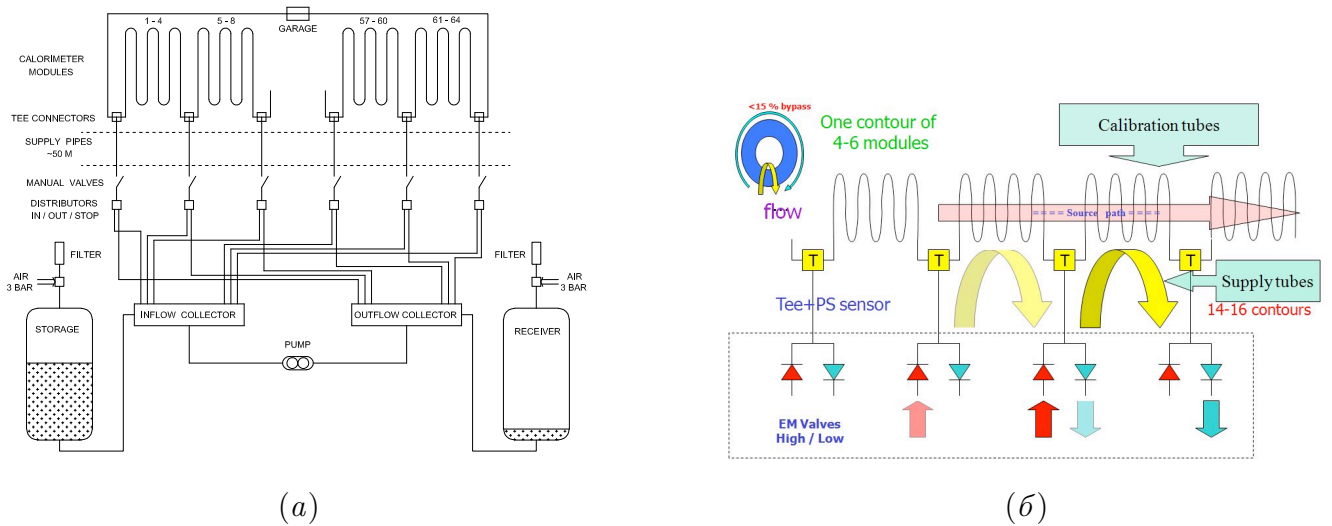


Рис. 2.2. Схема гидравлической части системы (а); принцип переключения контуров (б)

источника в нужном направлении. В целом этот подход позволяет оперировать разностью давлений на достаточно низком уровне, так как в движение приходит только малая часть от общего объёма жидкости.

Движение жидкости в остальном объёме остаётся при этом на пренебрежимо малом уровне, принимая во внимание разницу в массах, и небольшое перемещение жидкости в трубках при отсутствии в них капсулы с источником не сильно искажает картину движения источника в текущем контуре. Предполагается, естественно, что весь объём заполнен и жидкость является несжимаемой.

Капсула с источником двигается в желаемом направлении до тех пор, пока сохраняется равномерный поток жидкости в калибровочных трубках текущего контура. Скорость и равномерность движения определяются прилагаемой разностью давлений и стабильностью работы основного насоса, а также массой вовлечённой в процесс жидкости, её вязкостью и смазывающими свойствами на фоне сопротивления трения капсулы о внутреннюю поверхность трубок. Переключение контуров распределительным устройством гидропривода синхронизированное с движением источника обеспечивает переход из контура в контур через соответствующий тройник.

Секция калибровочных трубок состоит из прямых, гнутых (U-shaped) и межмодульных соединительных трубок. Схема разводки калибровочных тру-

бок в паре соседних модулей секций LB и EB показана на рисунке 2.3. Картина расположения трубок LB секции выглядит достаточно просто (11 трубок), тогда как в EB модулях она несколько сложнее (12 трубок). Сложность картины разводки калибровочных трубок в EB модулях вызвана необходимостью иметь вход и выход с одной стороны модуля и наличием в его составе части под названием «промежуточный» калориметр (ИТС), имеющую сложную геометрию. В частности, это приводит к тому, что один ряд пластин в EB модулях пересекается трубками дважды (ряд 7, оба отверстия в пластинах задействованы для калибровки).

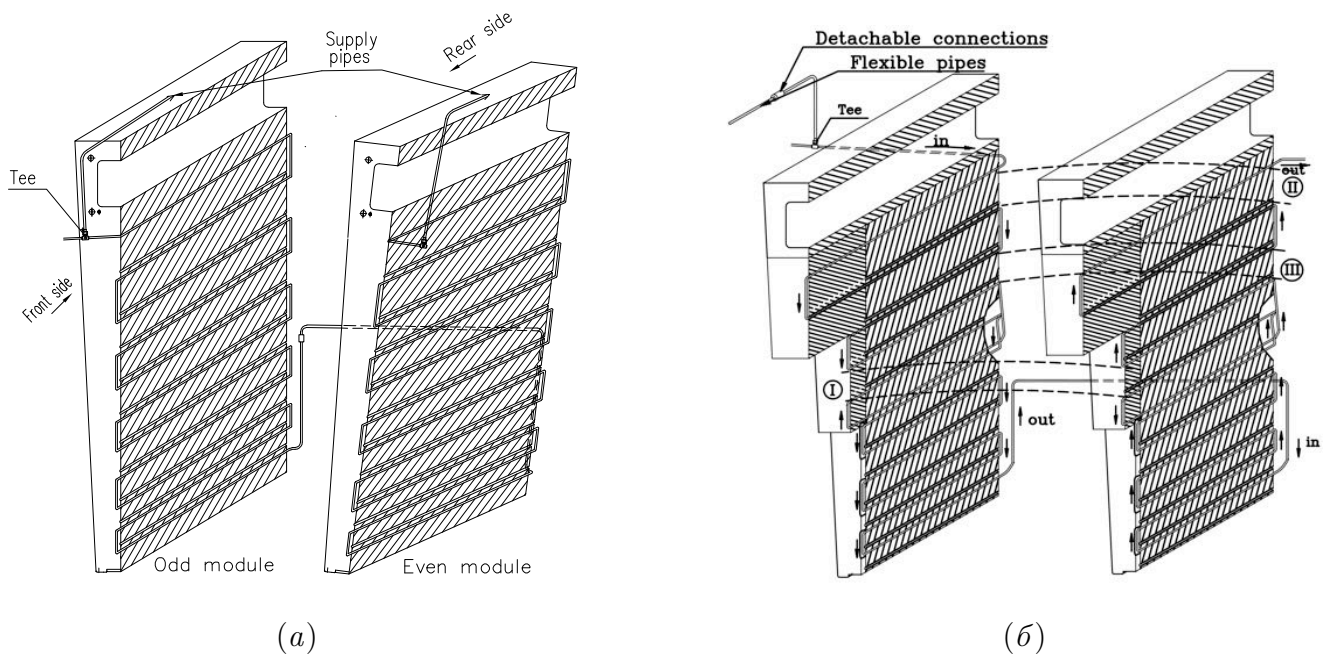


Рис. 2.3. Разводка калибровочных трубок в модулях. Имеется 11 прямых трубок в LB, центральной, секции (а) и 12 трубок в EB — боковой (б). Прямые трубки соединены последовательно с помощью U-shaped трубок

Для производства калибровочных трубок использована трубка из нержавеющей стали $\text{Ø}6,0 \times 8,0$ мм. Технология изготовления гнутых трубок (U-shaped и более сложных межмодульных) позволяет обеспечивать неизменность внутреннего сечения (рис. 2.4) для беспрепятственного прохождения капсулы с источником.

Развальцованные концы трубок служат для их соединения с прямыми



Рис. 2.4. Примеры гнутых (U-shaped) трубок используемых для соединения прямых. Резиновый колпачок служит в качестве защиты соединения прямых и гнутых трубок внутри концевых пластин модулей

трубками склеиванием (эпоксидным двухкомпонентным клеем Araldite 2011). Использование клея (вместо сварки, к примеру), позволило избежать повреждения близко расположенных к местам соединения трубок пластин сцинтиллятора.

Все изгибы трубок имеют радиус 15 мм по оси и проверялись на проходимость капсулой-пробником диаметром 6,00 мм на этапе производства, и 5,85 мм на всех этапах сборки, для обеспечения гарантированного свободного прохода капсулы с источником имеющим наружный диаметр 5,60 мм. На рисунке 2.5 показаны некоторые этапы склейки прямых и изогнутых трубок.

Более 2200 гнутых трубок различных размеров и формы использованы для оснащения 192 (+2 запасных) модулей калориметра и более 250 для межмодульных соединений, подключения «гаражей» и тройников. Полная длина калибровочных трубок всех трёх секций калориметра составляет величину близкую к 9 км: 4300 метров (LB) и 2 раза по 2400 метров (EVA, EVC).

Все модули калориметра были оснащены калибровочными трубками в процессе их оснащения оптическими компонентами (инструментации) и сертифици-



(a)



(б)

Рис. 2.5. Этапы склейки двухкомпонентным эпоксидным клеем типа Araldite прямых и гнутых (U-shaped) трубок. Проходимость зоны склейки проверялась калиброванными капсулами кации оптики, с использованием ^{137}Cs источника как инструмента финального контроля. При сборке всех трёх секций калориметра в шахте установки ATLAS, калибровочные трубки были соединены в три независимые последовательности (LB, ЕВА, ЕВС). Все операции по установке и соединении трубок сопровождались регулярными проверками на прохождение калиброванными капсулами, тестам на давление (до 5 атм.) и соответствию геометрии всего калориметра как части установки.

Промежуточный результат разводки калибровочных трубок для части ЕВА модулей показан на рисунке 2.6 включая соединения между модулями. При сборке часть трубок была прикрыта временной защитой (жёлтые пластины), в некоторых местах видны также резиновые колпачки защиты мест соединения трубок (как чёрные кружки) и тройник отделяющий калибровочный объём от подводящей трубки. Часть соединительных трубок находится в прорезях конечных пластин модулей в зонах тесного прилегания механической поддержки криостата электромагнитного калориметра.

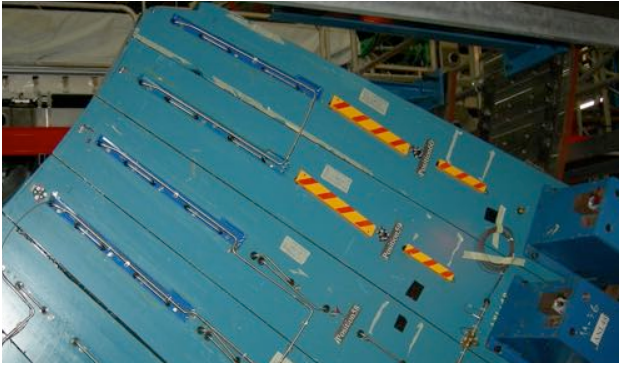


Рис. 2.6. Часть калибровочных трубок секции ЕВА во время сборки в шахте. Можно видеть U-shaped трубки соединяющие прямые трубки внутри модулей и модули между собой, тройник

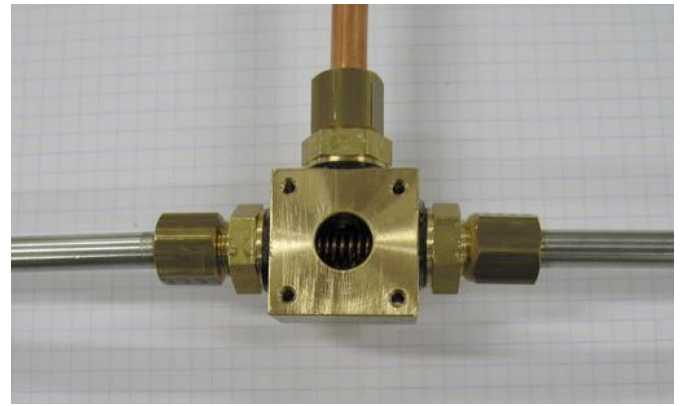


Рис. 2.7. Тройник, соединяющий калиброванные трубки (нерж. сталь) и подводящие (медь). Пружина (бронза) обеспечивает свободное прохождение капсулы через тело тройника

На рисунке 2.7 показано внутреннее устройство тройника со снятой верхней крышкой со встроенным датчиком давления (PS). Пружина из бронзы обеспечивает свободное прохождение капсулы с источником из одного контура в другой (стальные трубки) и, в то же время, служит сепаратором для жидкости, поступающей из подводящей (медной) трубки.

Всего используется 16 тройников в центральной (LB), и по 14 тройников в боковых (EVA and EBC) секциях по числу логических «контуров», все тройники расположены по внешним сторонам калориметра на большом радиусе от центра.

Для подводящих трубок используется медная трубка $\text{Ø}6,0 \times 8,0$ мм в качестве основной, 16 трубок (длина 35–50 метров) для центральной секции и по 14 трубок для боковых, сопряженных с гибкими резиновыми (Nitrile Butadiene Rubber, NBR) шлангами $\text{Ø}7,7 \times 13,5$ мм (общая длина 50–65 метров, рис. 2.8). Необходимость использования гибких шлангов обусловлена подвижностью боковых секций калориметра во время раскрытия установки ATLAS для ремонта. Полная длина подводящих трубок всех секций составляет более 2000 метров.

Пневматическая часть системы состоит из ограничивающих подводящих



(a)



(б)

Рис. 2.8. Медные подводящие трубки в нижней части LB секции (а) и соединительная панель сопряжения медных трубок и резиновых (NBR) шлангов одной из боковых секций EB (б)

клапанов и электромеханических запирающих вентилей (встроенных в гидропривод), соединительных трубок (полиамид $\text{Ø}2,7 \times 4,0$ мм) и соответствующих разъёмов типа LEGRIS. Привод замков каждого из 9-ти гаражей осуществляется через две 70-ти метровые трубки давлением воздуха до 5 атм., несколько сотен метров использовано для управления сосудами хранения жидкости (давление до 2,8 атм.). Полная длина пневматических трубок достигает 2 км.

2.3. Цезиевые источники

В системе используется несколько ^{137}Cs источников одной и той же конструкции и примерно одинаковой активности. Собственно источник представляет радиоактивную субстанцию, помещённую в герметически заваренную трубку из специальной нержавеющей стали с размерами $\text{Ø}2,0 \times 9$ мм и толщиной стенок 0,2 мм, что даёт около 10 мм^3 полезного объёма. Активный материал получен спеканием со стеклом химических продуктов обработки отработанного топлива ядерного реактора и содержащий нужное количество ^{137}Cs изотопа [38].

Очевидно, что источник должен быть надёжно защищён при движении в калибровочных трубках. На рисунке 2.9 показано устройство и размеры защитной капсулы из упрочнённого алюминиевого сплава в форме гантели, покры-

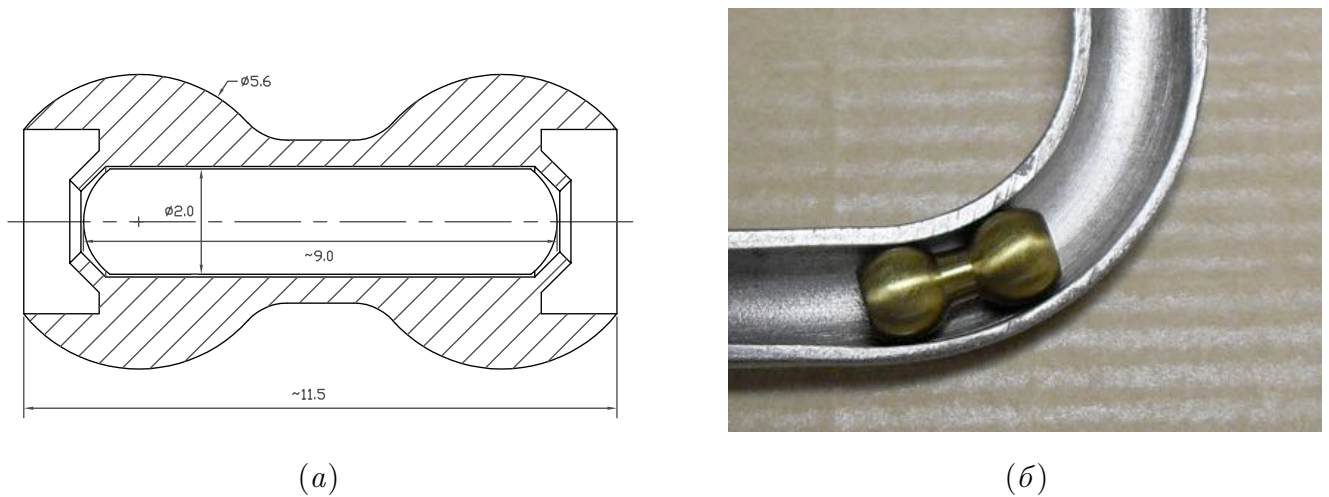


Рис. 2.9. Устройство источника и его контейнера (капсулы) (а); Прохождение капсулы в форме «гантели» внутри изогнутой трубки (б) Максимальный диаметр капсулы 5,60 мм оставляет в калибровочной трубке диаметром 6,0 мм зазор порядка 0,4 мм

той 2–4 мкм слоем нитрида титана (TiN). Сферы капсулы имеют диаметр до 5,60 мм и соединены цилиндрической полый перемычкой при общей длине не более 12 мм. Источник фиксируется в капсуле обжатием концевых фланцев с помощью специального приспособления, обеспечивающего безопасность операции.

Форма и размеры капсулы позволяют ей свободный проход через изгибы калибровочной трубки с 15 мм радиусом кривизны, а защитное покрытие уменьшает трение капсулы о стенки трубки. Капсула надёжно предохраняет источник от любых механических повреждений во время движения в трубке и проведении других вспомогательных операций. Малый вес капсулы обеспечивает близкую к нулю плавучесть, а хорошая электрическая проводимость алюминия используется для регистрации капсулы в трубке.

Вместе с тем, капсула не герметична и не защищает источник от возможного химического воздействия окружающей среды. Чтобы исключить любой риск коррозии, как источника, так и тела самой капсулы, используются специальные добавки к рабочей жидкости.

Только что изготовленный источник показан на рисунке 2.10 вместе с аналогичным, использовавшимся более четырёх лет в реальных условиях калиб-

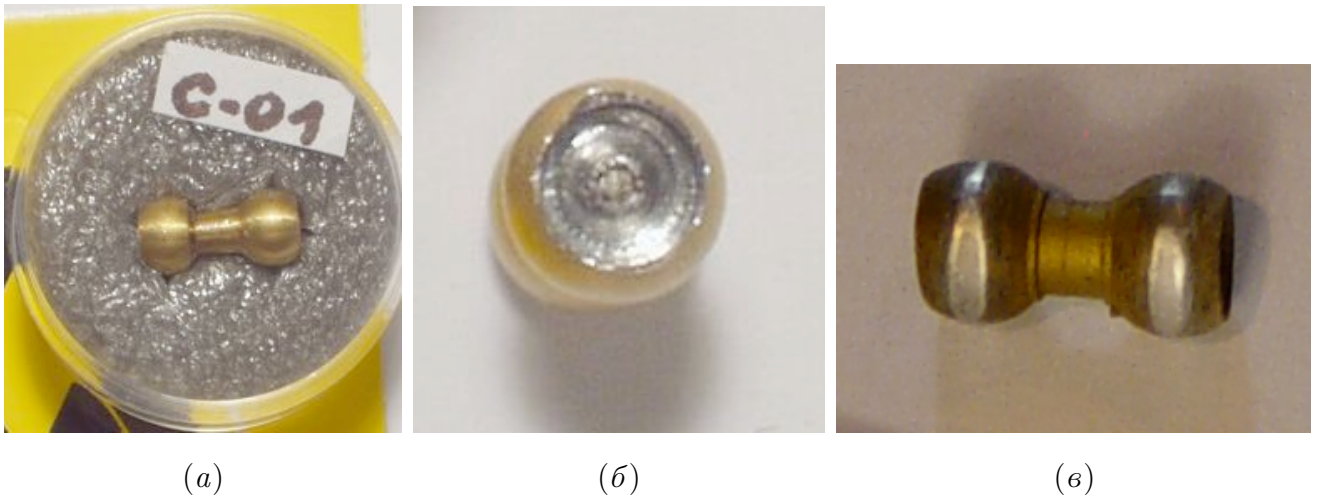


Рис. 2.10. Только что изготовленный источник в капсуле (а) и его фиксация (б). Реальный источник (алюминиевый сплав покрытый нитридом титана) после более чем 4-х лет эксплуатации и прохождения более чем 250 км расстояния через калибровочные трубки (в) — износ составил 0,1 мм от стандартных 5,60 мм

ровочной системы. Два левых снимка: вид сбоку и сверху — виден заваренный конец источника и область фиксации; правый — капсула прошедшая более 250 км в калибровочных трубках. Можно видеть, что износ внешней поверхности капсулы совсем не большой и, в целом, состояние капсулы достаточно удовлетворительное.

В системе используются пять ^{137}Cs источников примерно одной активности 250–400 миллионов распадов в секунду (МБк), и их отношения измерены с точностью до 10^{-4} , многократным прогоном через одни и те же тестовые модули (LB и EB). Такой набор позволяет получать измерения всех трёх секций calorimetра в одном динамическом диапазоне и иметь возможность замены источников при необходимости. Абсолютная и относительная активность источников приведена в таблице 2.1.

Типичный энергетический спектр только что произведённого источника показан на рисунке 2.11. ^{137}Cs гамма пик при 0,662 МэВ доминирует, а возможная примесь короткоживущих изотопов (к примеру, ^{134}Cs) пренебрежимо мала, менее чем 0,1 %.

Номер источника	Оценка активности на апрель 2009 (МБк $\pm 15\%$)	Измеренная γ -активность к источнику 3713RP на март 2009	История использования
3712RP	319	$1,2200 \pm 0,0005$	Инструментация
3713RP	264	1,0000	Тесты на пучках
RP4089	377	$1,2180 \pm 0,0007$	ЕВС мониторинг
RP4090	363	$1,1590 \pm 0,0005$	ЕВА мониторинг
RP4091	372	$1,1860 \pm 0,0005$	ЛВ мониторинг

Таблица 2.1. ^{137}Cs источники используемые в системе калибровки адронного калориметра установки ATLAS

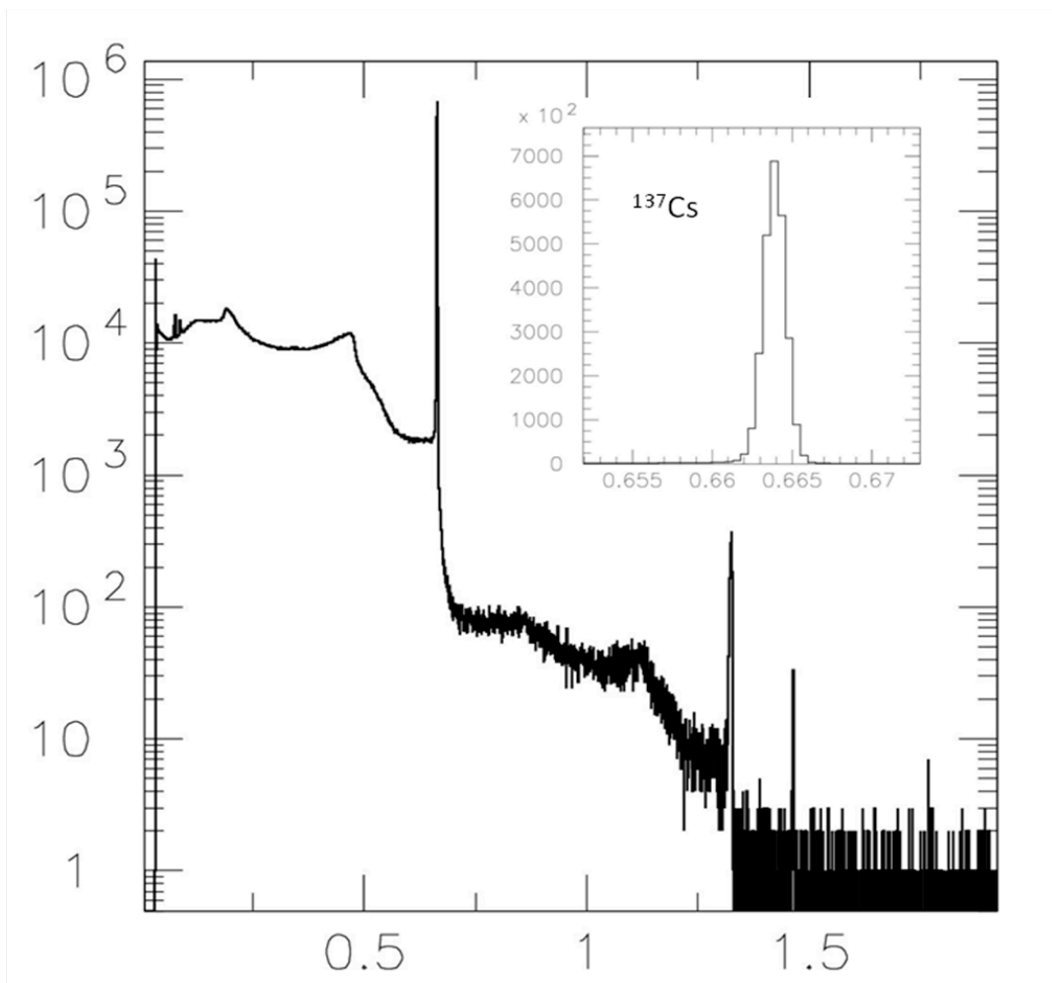


Рис. 2.11. Спектр энергий одного из ^{137}Cs источников, полученный сразу после изготовления

2.4. Система перемещения

2.4.1. Гараж

«Гаражом» называется устройство, где может храниться источник в промежутках между периодами использования (калибровочные «прогоны» или «сканы»). По три гаража установлены в каждой из трёх секций калориметра (ЕВА, ЕВС, LB), более или менее равномерно распределённых по окружности 64 модулей каждой секции. Внутренние объёмы гаражей составляют единое целое с калибровочными трубками.

Капсула с источником может быть загружена в гараж, отправлена в обоих направлениях в калибровочные трубки или принята из них, храниться в гараже неопределённо долго и, наконец, извлечена из гаража при необходимости. Функционально это часть калибровочных трубок, оснащённая парой замков для удержания капсулы, несколькими датчиками и окружённая надёжной радиационной защитой.

Индивидуальный электронный модуль в стандарте 6U обеспечивает удалённый доступ к гаражным сенсорам и отображает на месте светодиодами текущий статус устройства: состояние замков, присутствие или отсутствие капсулы, наличие активного источника (счётчик Гейгера) и т.п. Информация может передаваться по запросу извне, циклически и при каждом изменении статуса гаража (выход капсулы, закрытии замков и т.п.).

В каждой из трёх секций используется только один источник, так что только один гараж из трёх, задействован для хранения, два других постоянно свободны и готовы к приёму капсулы. Это позволяет практически в любой момент прервать калибровочный скан (по причине недостатка времени, например) и поместить источник в ближайший доступный гараж. Сканирование 20–24 модулей при нормальной скорости источника (30–35 см/сек) занимает менее двух часов, и, следовательно, источник может быть помещён в ближайший гараж за вдвое меньшее время.

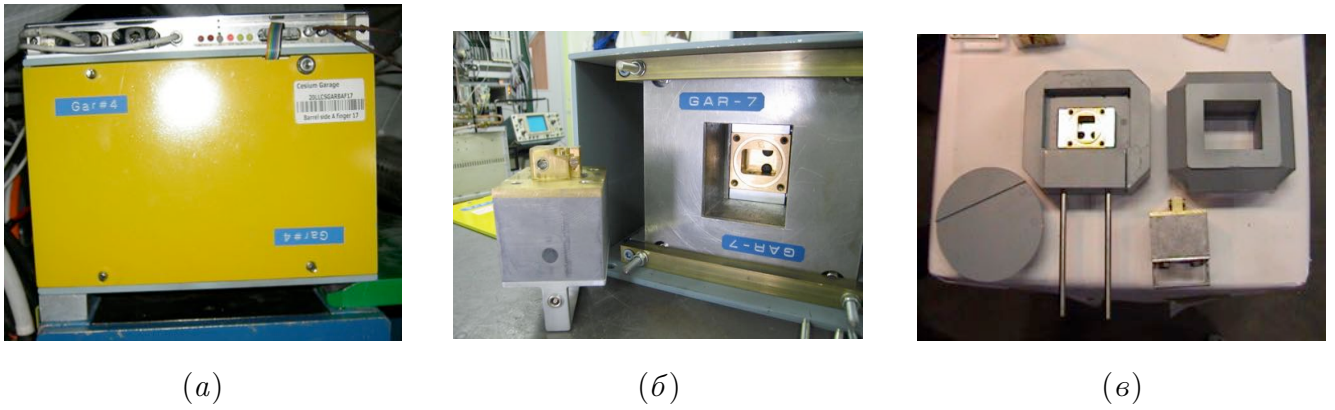
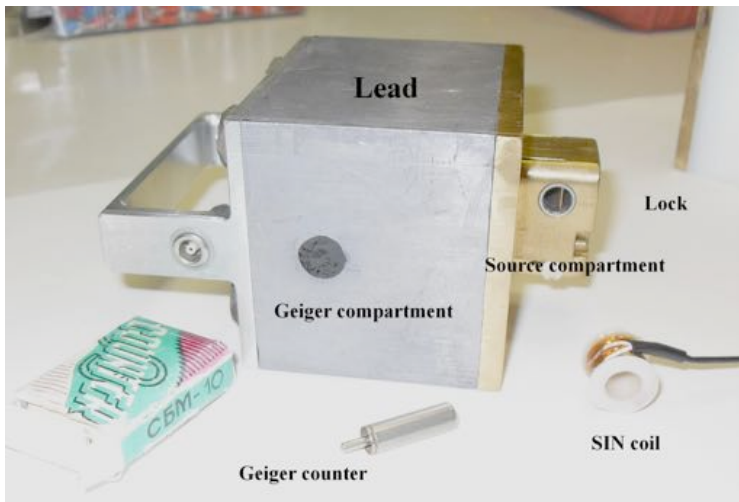


Рис. 2.12. Внешний вид гаража с контрольным электронным модулем (а); корпус гаража и вынимаемая кассета (б); компоненты свинцовой защиты, частично виден механизм привода замков (в)

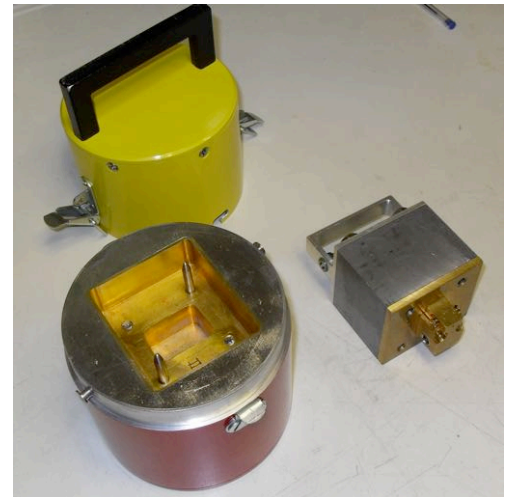
Все гаражи идентичны и взаимозаменяемы, состоят из круговой радиационной защиты (5 см свинца), корпуса с приводом гаражных замков и извлекаемой кассеты (рис. 2.12). Защита обеспечивает уровень излучения менее 0,5 мкЗв/час на расстоянии в 45 см от корпуса гаража при наличии в нём самого активного из используемых источников.

В кассете (рис. 2.13а) две нормально закрытые пружины, приводимые в действие сжатым воздухом (5 атм.) образуют запирающий механизм («замки»). Открывая оба или один из замков можно пропустить капсулу сквозь или выпустить её в нужном направлении, в соответствии с направлением потока жидкости. Использование пневматики обусловлено наличием сильного магнитного поля в области размещения гаражей. В кассете также размещены два датчика присутствия капсулы: датчик типа SIN — реагирующий на металл капсулы и счётчик Гейгера — регистрирующий радиоактивность.

Действие SINa основано на изменении индуктивности катушки вокруг места хранения источника между двух замков гаража, вызванное присутствием проводящего тела капсулы. Смещение частоты генератора датчика над пороговым значением достаточно хорошо регистрируется, а сам порог может быть хорошо измерен и скорректирован, что делается достаточно регулярно для каждого из гаражей. В результате, присутствие или отсутствие металлической кап-



(a)



(б)

Рис. 2.13. Кассета и её составляющие (а); переносный контейнер для доставки кассеты к месту загрузки в гараж (б)

сулы в гараже надёжно детектируется.

В дополнение к датчику SIN, счётчик Гейгера (используется изготовленный в России миниатюрный СВМ-10) позволяет определить, содержит ли капсула активный источник или нет. Счётчик имеет размеры $\varnothing 6 \times 25$ мм, надёжно работает в диапазоне 300–400 В и выдерживает нагрузку до 700 отсчётов в секунду. Напряжение на счётчик подаётся только на время измерения, что существенно увеличивает его время жизни, этому же служит уменьшение загрузки счётчика размещением его на некотором удалении от источника (25–35 мм свинца), что при 9 мКи ^{137}Cs ограничивает загрузку счётчика 500 отсчётами в секунду.

Используются две основные моды работы счётчика Гейгера, обе по запросу от центрального управляющего процесса. В первом счётчик включается всего на 1–2 секунды для подтверждения сигнала от датчика SIN, что пришедшая в гараж капсула содержит реальный источник. Во второй моде производится 1–2 минутный набор статистики отсчётов нескольких одно секундных периодов счётчика с целью мониторинга активности источника (рис. 2.14). Неизменность усреднённых параметров активности в зависимости от времени свидетельствует

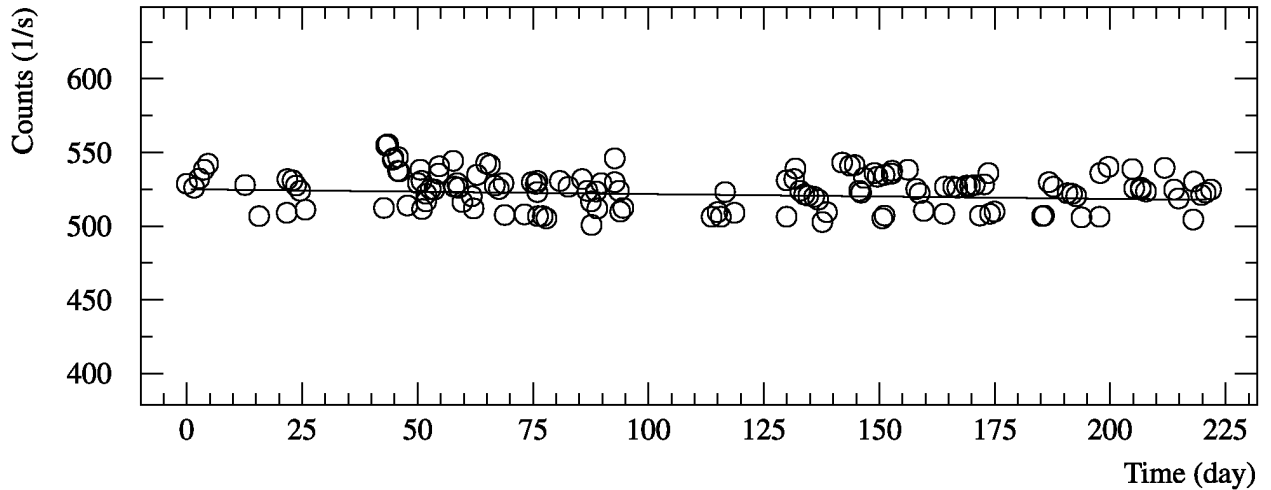


Рис. 2.14. Пример длительного мониторинга активности источника гаражным счётчиком Гейгера. Флуктуации среднего значения вокруг распадной кривой составляют порядка 5 % о хорошем физическом состоянии источника. Временные параметры программируются извне и могут меняться в некоторых пределах.

Точность определения абсолютной активности источника счётчиком Гейгера не может быть лучше 5–10 %, прежде всего из-за неопределённости положения источника между замками кассеты (это расстояние на 3–4 мм больше характерного размера капсулы), однако, как дополнительная, эта информация может быть весьма полезной с точки зрения обеспечения радиационной безопасности работы с источниками.

Загрузка капсулы с источником происходит в специально организованном и безопасном месте. После того как источник установлен в кассете, она помещается в переносный контейнер (рис. 2.13б) для доставки к гаражу, постоянно размещённому на установке. Далее кассета достаточно быстро (за несколько минут) устанавливается и фиксируется в гараже.

2.4.2. Гидропривод

В калибровочной системе используются несколько устройств называемых «гидропривод», которые вместе с контрольной блоком в стандарте 3U, обеспе-

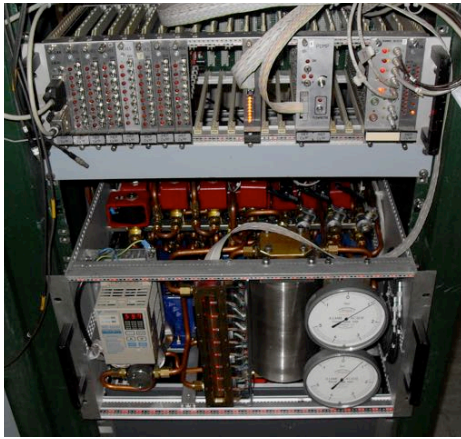
чивают прокачку и распределение жидкости, а также работу пневматической части. По одному гидроприводу приходится на подсекцию, другие два комплекта используется в тестовой зоне и в качестве запасных. Все устройства идентичны, взаимозаменяемы и могут использоваться как в шахте, так и в тестовой зоне.

Основная задача гидропривода обеспечить стабильный и контролируемый поток жидкости в нужном контуре (поддерживается 16 контуров) в соответствии с требуемым режимом движения источника. Статическое давление при работе гидропривода может находиться в диапазоне 0,0–4,0 атм., а создаваемая разность давлений на обоих концах любого контура достигать 4 атм., (реально используемые давления существенно ниже, естественно).

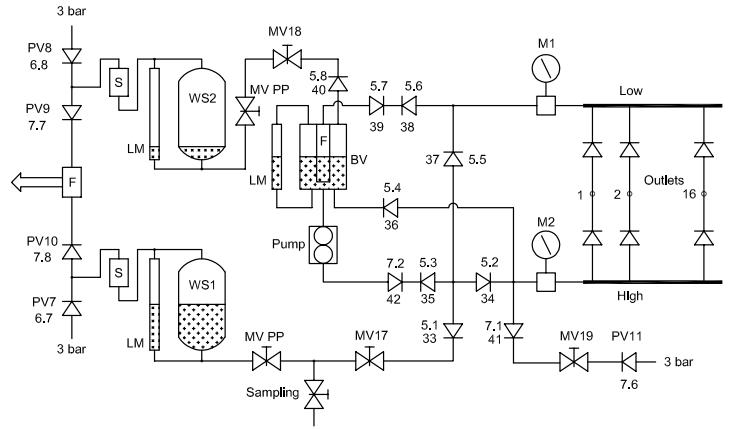
В гидроприводе также установлены воздушные клапаны для подачи сжатого воздуха в замки гаражей (6 замков) и синхронизированного управления станцией хранения жидкости в соответствии с программой проведения калибровочного сеанса.

Основными составными частями гидропривода являются помпа шестерённого типа IWAKI MDG-M2 с питанием от вариатора частоты YASKAWA VS mini C CIMR-XCACB и мощностью до 200 ватт, 42 гидравлических LUCIFER 121K01 и 11 пневматических электромагнитных клапанов, буферный сосуд (BV), ёмкостью до 1,8 литра, измеритель уровня в BV, датчики давления, манометры. Имеются также соответствующее число ручных кранов, соединительных трубок, кабелей и т.п. Гидропривод (рис. 2.15) занимает полную 6U корзину, весит около 30 кг и проверяется на максимальное давление в 5 атм.

Все операции, с участием гидропривода, производятся как автоматически, так и в ручном режиме, с удалённым доступом, и непосредственно на месте, используя управляющий 3U-блок, который содержит специализированные модули управления гидроприводом и обеспечивает связь с внешним управляющим процессом. Все модули блока имеют режимы ручного управления наряду с автоматическим, от внешнего компьютера.



(a)



(б)

Рис. 2.15. Гидропривод с контрольным блоком (корзиной) (а); Схема элементов гидропривода (б)

Основными модулями являются:

- 3U-CAN модуль связи внутреннего протокола блока с внешним процессором по сети CANbus;
- До 8 модулей управления электромагнитными клапанами, по 8 каналов в каждом модуле;
- Модуль управления помпой через частоту вращения и мощность приводящего в действие мотора;
- Модуль контроля уровня жидкости в BV с точностью лучше чем 200 мл;
- Контроль и дисплей внутренней шины управляющего блока;

Задача гидропривода — обеспечить стабильный поток $10\text{--}15\text{ см}^3/\text{сек}$ в нужном контуре при изменениях гидравлического сопротивления, возникающих вследствие смены контуров, изменения числа модулей в контуре и т.д. Один модуль центральной секции (LB, 60 метров калибровочных трубок $\text{Ø}6\text{ мм}$) оказывает сопротивление потоку жидкости порядка $0,2\text{ атм.}$, в то время как EB модуль (35 метров) — $0,15\text{ атм.}$, что приводит к необходимости приложения разности давлений на сторонах контура от $0,6\text{ атм.}$, при минимальном размере

контур в 4 модуля и до 1,8 атм. при максимальном контуре в 12 модулей в EB секциях.

2.4.3. Водяная станция

Для хранения рабочей жидкости между сканами для уменьшения риска протечки или активации, используется водяная станция (WS).

В системе используется несколько различных по свойствам металлов и сплавов: сталь, нержавеющая сталь, медь, медные и алюминиевые сплавы и тому подобные. Поскольку избежать полностью контакта с атмосферным воздухом невозможно, все они в той или иной степени подвержены коррозии, особенно алюминий, из которого сделана защитная капсула для ^{137}Cs источника.

Для решения проблемы коррозии, в качестве рабочей жидкости используется деминерализованная вода (60–65 % по объёму) с добавлением специальной жидкости фирмы NALCO (35–40 %), служащей хорошим ингибитором окисления используемых металлов. Состав жидкости: вода, 5–10 % двойного силиката натрия, 10–20 % молибдата натрия и 1–5 % тетрабората натрия. Подобная жидкость широко используется в системах охлаждения в присутствии широкого спектра химически активных металлов, не токсична и имеет низкую электрическую проводимость. В силу щелочной природы добавок, правда, может раздражать слизистые оболочки и глаза, а также неблагоприятно воздействовать на некоторые пластики и детали из резины.

Внутренний совокупный объём трубопровода центральной секции калориметра (LB) достигает 140 литров, а каждой из боковых (EB) — более 90, что приводит на практике к использованию вовлечённой в дело порядка 150–160 и 2x100 литров жидкости соответственно, а общему объёму — до 400 литров. Соуды с рабочей жидкостью объединены в так называемую водяную станцию — Water Station (WS).

Закачать (и удалить) такое количество жидкости в чрезвычайно разветвлённые трубопроводы на высоту 17–23 метра за разумное время представляет

ся достаточно сложной задачей, требующей, несомненно, специального подхода. Высота расположения калориметра над полом шахты и плотность рабочей жидкости ($1,15 \text{ г/см}^3$) обуславливают минимальное давление нагнетания жидкости в калориметр. Воздух из общей магистрали под давлением ($2,5\text{--}2,75 \text{ атм.}$) используется для вытеснения хранящейся в WS жидкости и нагнетания её в калибровочные трубки и соответствующей обратной операции — слива жидкости назад в станцию.

Функционально WS представляет три пары сосудов и состоит из шести «бочек» из нержавеющей стали, двух по 230 литров и четырех по 130 литров, обслуживающих соответственно LB, EBA и EBC (рис. 2.16). Один из пары сосудов в нормальном состоянии используется для хранения жидкости, а другой — для приёма вытесняемого воздуха. Поскольку имеется контакт вытесняемого воздуха с атмосферой, применяются специальные разделители и фильтры на выходе из станции для улавливания капель жидкости.



Рис. 2.16. Станция хранения жидкости (WS) состоящая из двух сосудов по 230 литров и четырёх по 130 литров, скомбинированных в пары для хранения жидкости и сбора вытесняемого воздуха

2.5. Управление и контроль

Основными принципами организации контроля и управления мониторирующей системой калориметра являются:

- Полная независимость всех трёх подсистем калибровки в сочетании с функциональной идентичностью и максимальной унификацией, как используемого оборудования, так и математического обеспечения;
- Широко разветвлённая сеть датчиков и сенсоров, отражающая всю полноту картины состояния каждой подсистемы, как в активном, так и в пассивном состоянии;
- Возможность контроля и управления при адекватном информационном сопровождении, как в ручном, так и автоматическом режиме, при прямом доступе и внешнем управлении;
- Автоматизация подготовки, проведения и завершения калибровки с соблюдением всех технических требований, прежде всего безопасности и обработкой возможных «нештатных» ситуаций;
- Экспресс проверка качества получаемых данных, дающая возможность повторить калибровку проблемных модулей или сегментов;

В системе используется несколько типов датчиков для контроля давлений, процесса перемещения источников и их состояния, статуса вовлечённого оборудования и так далее, с соответствующими источниками питания и распределённых как по детектору, так и по точкам размещения контрольного оборудования мониторирующей системы (стойки в шахте, контрольная комната USA-15).

Там же размещены электронные модули, связанные между собой и с внешней средой по шине CANbus. Блоки контроля и управления (разработаны и изготовлены в ИФВЭ, Протвино) обеспечивают приём данных от датчиков и сен-

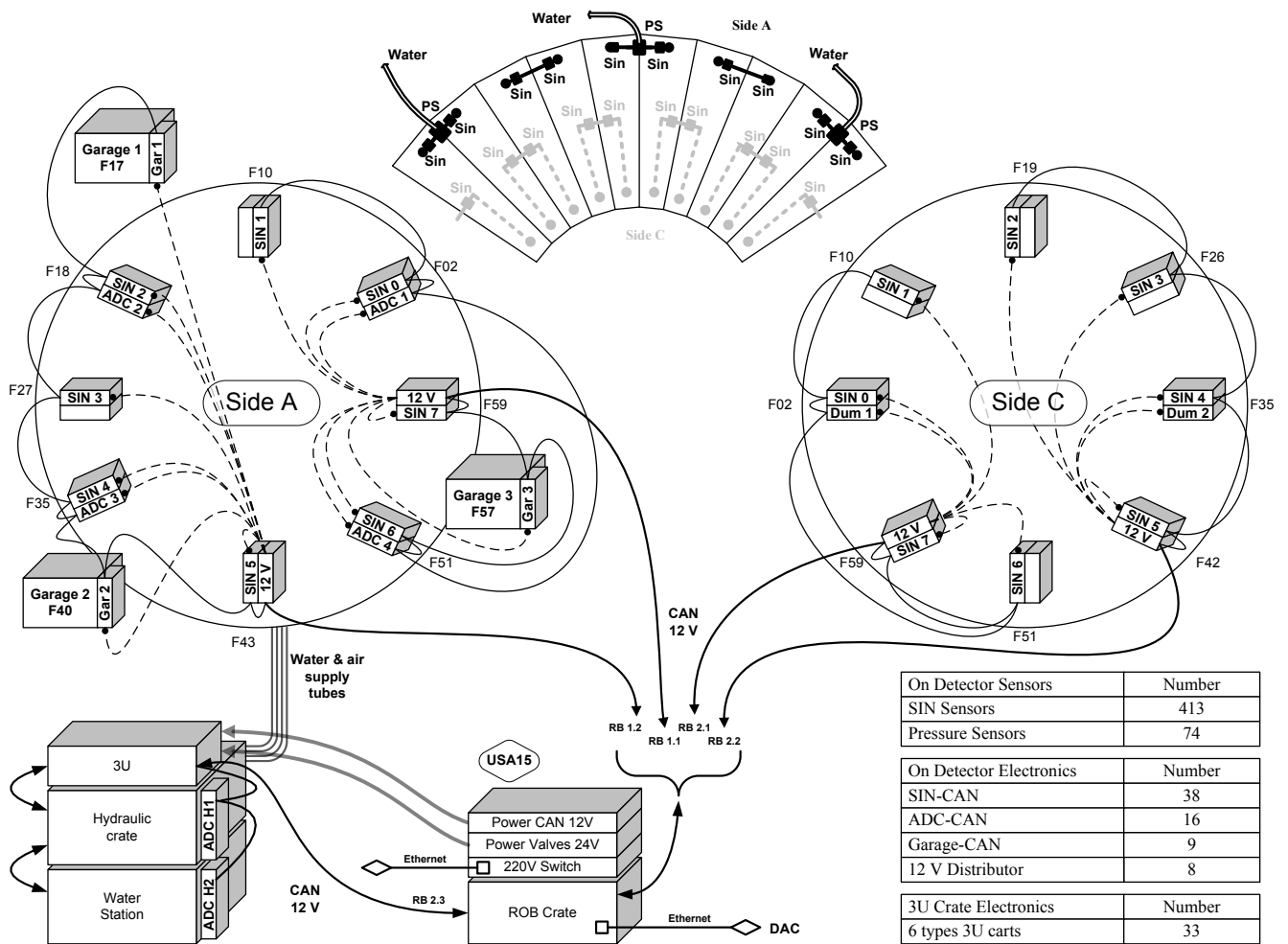


Рис. 2.17. Схема управляющего и контрольного оборудования цезиевой системы одной из секций. В таблице приведено суммарное для всего калориметра число используемых датчиков, модулей регистрации и 3U-плат

соров, пересылку их управляющему процессу, а также передачу команд управления на активное оборудование: гидроприводы и гаражи.

В качестве примера организации контроля одной из секций на рисунке 2.17 схематически показан состав подсистемы с модулями управляющей электроники, которые равномерно распределены по модулям калориметра в миниатюрных корзинах, закрепленных на торцах модулей (рис. 2.22).

Один модуль датчиков давления (ADC_CAN) может обслуживать до 8 датчиков, а один модуль датчиков SIN (SIN_CAN) — до 16 каналов. Суммарное число модулей ADC_CAN равно 12, SIN_CAN — 40.

Срабатывания сенсоров, показания датчиков и отклики ФЭУ являют собой

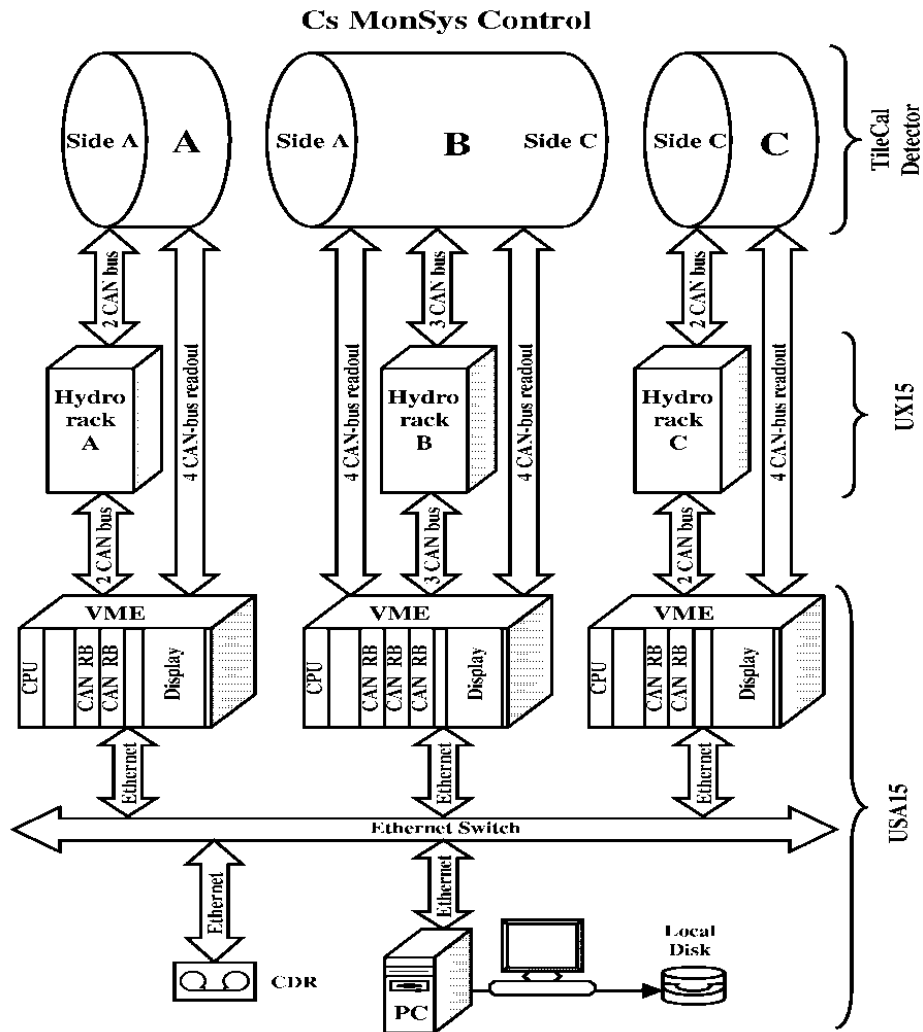


Рис. 2.18. Схема управления оборудованием системы

развивающуюся во времени информационную карту, полностью отражающую текущую ситуацию: состав и состояние вовлечённого оборудования, параметры рабочей жидкости и газа, направление, скорость и положение радиоактивного источника, отклики ячеек калориметра. Поток данных и схема обмена сообщениями между оборудованием системы, показаны на рисунке 2.18.

Детальное описание датчиков и их модулей приводится в работах [39, 40].

2.5.1. Датчики давления

Давление воды или воздуха в калибровочных трубках, гидроприводах и сосудах водяной станции измеряется в более чем в 60 точках системы в пределах от -0,8 до +6,0 атм. унифицированными датчиками.

Интегрированные монокристаллические кремниевые датчики Motorola MPX5700D и MPX5700A используются в качестве чувствительных элементов (рис. 2.19а). Пьезорезистивные преобразователи с температурной компенсацией являются основой датчиков с точностью измерений лучше 2,5 % в рабочем диапазоне. Внутренняя схема преобразователя защищена от разрушающего воздействия внешней среды силиконовой прокладкой.

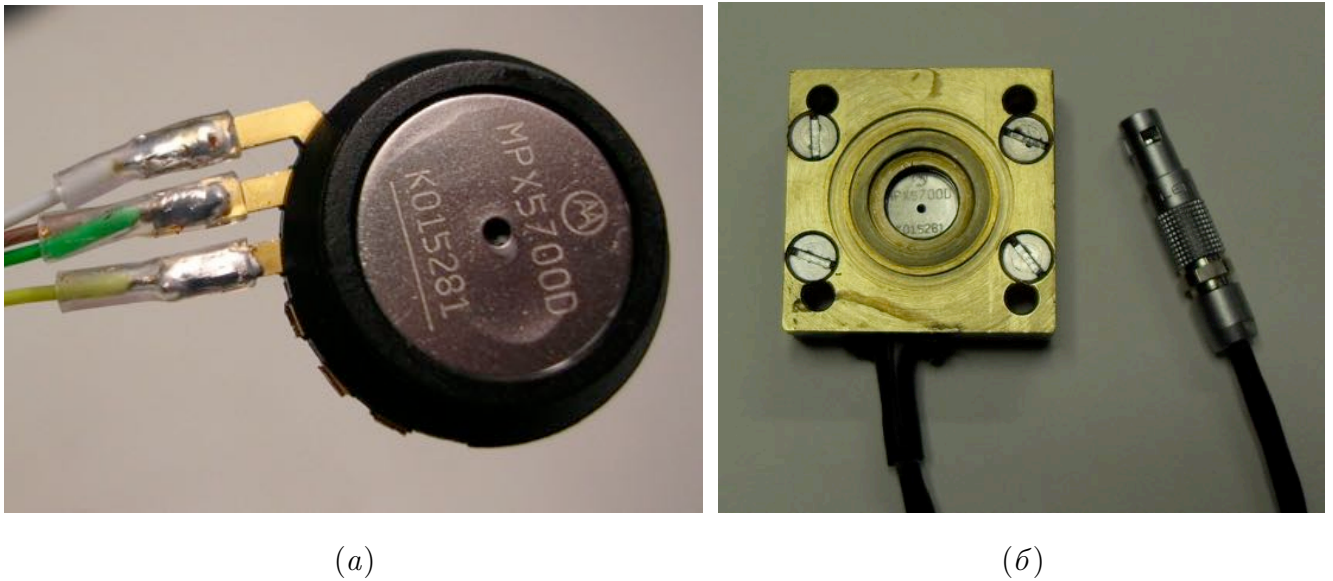


Рис. 2.19. Датчик давления Motorola MPX5700D (а); и его крышка-корпус вместе с кабельным разъемом (б) [40]

На рисунке 2.19б показан датчик в корпусе, служащем крышкой тройника калибровочных трубок. Тот же самый дизайн корпуса датчика используется для всех других точек измерения давления. В секции LB установлено 16 датчиков давления на тройниках и по 14 в ЕВА и ЕВС. Еще примерно 20 датчиков применяются для контроля давления в гидроприводах и станциях хранения рабочей жидкости, что дает в сумме примерно 60 датчиков установленных в шахте и 80 вкпе с использующимися в тестовой лаборатории и в качестве запасных.

2.5.2. Датчики прохождения капсулы

Индукционный датчик (Sensor based on INductance, SIN) (рис. 2.20) реагирует на присутствие проводящего тела капсулы и предназначен для регистри-

рования момента прохождения капсулы в месте установки датчика на калибровочной трубке. Датчик представляет из себя катушку включенную в непрерывно-работающий LC-генератор, то есть является «активным» устройством.



(a)



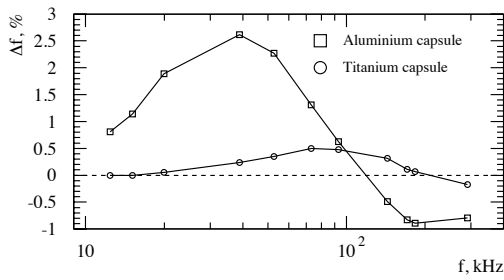
(б)

Рис. 2.20. Датчики регистрации прохождения капсулы (SIN) установленные на участке калибровочной трубки (а); и с обеих сторон тройника (б)

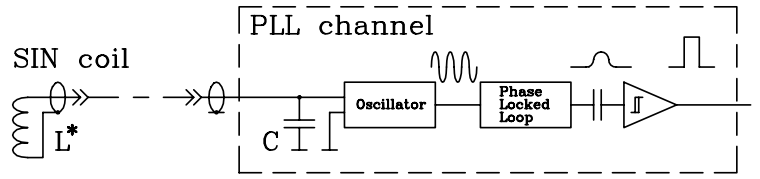
Катушка датчика ориентирована таким образом, чтобы часть переменного электромагнитного потока проникала внутрь трубки выполненной из нержавеющей стали с относительно низкой проводимостью. Появление в поле хорошо проводящего тела капсулы изменяет индуктивность катушки и меняет базовую частоту генератора, вызывая тем самым сдвиг частоты. Величина этого сдвига зависит от проводимости капсулы, и этот сдвиг может быть достаточно легко обнаружен и измерен.

Например, реально используемая алюминиевая капсула вызывает эффект сдвига частоты в 2,5 % достигаемого при частоте LC-генератора в 30–50 кГц (рис. 2.21). Применяется прямое измерение сдвига частоты: сформированные импульсы от генератора непрерывно подсчитываются за фиксированное откалиброванное время, и сравниваются с базовым порогом. Этот порог может быть откалиброван — измерен (во время прохода капсулы), обновлен и записан для дальнейшего использования в соответствующий электронный блок, таким образом давая возможность настройки чувствительности датчиков SIN в случае замены материала капсулы и т.п.

Сигналы срабатывания датчиков SIN запускают процесс переключения



(a)



(б)

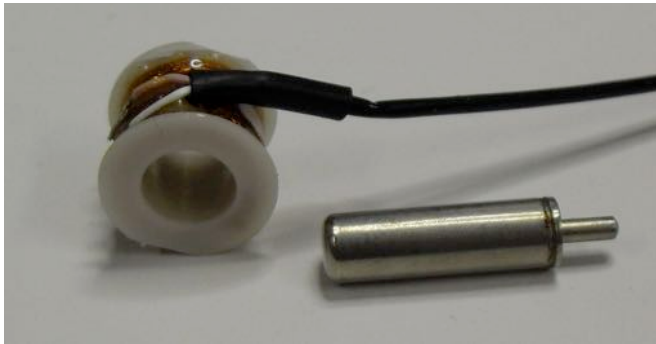
Рис. 2.21. Сдвиг частоты генератора канала датчика SIN вызванное алюминиевым и титановым корпусами капсул в калибровочной трубке из нержавеющей стали как функция базовой частоты. Более проводящая алюминиевая капсула вызывает больший эффект: 2,5 % против 0,5 % от титановой (а); Принцип обработки сигнала от датчика SIN (б) [40]

чтения от одного модуля к следующему и определяют момент переключения контуров течения рабочей жидкости. Как правило два датчика установлены на каждый модуль: на входе и на выходе (рис. 2.20), аналогичный подход использован для гаражей. Несколько дополнительных датчиков установлены в закрытых или «недоступных» зонах, таких как зона под «ногами» криостата электромагнитного жидко-аргонового калориметра (LAr), или под фланцами криостата, что увеличивает надежность детектирования прохода капсулы в этих местах в случае отказа датчиков и невозможности их замены.

Кроме регистрации факта прохождения капсулы, отклики от датчиков SIN используются для грубой оценки скорости движения капсулы, необходимой для общей настройки гидропривода, а также для контроля стабильности движения источника при вариациях конфигурации контуров. Общее число датчиков SIN достигает 500 по всем трем калибровочным секциям.

Такой же (индукционный) подход используется для регистрации наличия капсулы в «гараже» (рис. 2.22). Сенсорная катушка имеет другую форму но датчик работает по тому же самому принципу — измерение сдвига частоты LC-генератора. Единственная разница заключается в обработке сигнала: в то время как обычный датчик SIN всего-лишь регистрирует факт прохода капсулы, «гаражный» датчик может быть откалиброван и настроен на определенный

материал капсулы (проводимость) и хранить эти данные в памяти электронного модуля.



(a)



(б)

Рис. 2.22. катушка датчика капсулы и счетчик Гейгера используемые в «гараже» (а); Мини-крейт с модулями SIN_CAN (вверху) and ADC_CAN (внизу), закрепленный на модуле калориметра (б)

2.5.3. Уровнемер

Прокачиваемая помпой жидкость поступает из «буферного сосуда» (Buffer Vessel, BV) гидропривода, в него же замкнут обратный ток жидкости для сбора и удаления возможных пузырей воздуха. Наличие воздушных пузырей ухудшает стабильность прокачки в контуре, следовательно контроль за движением источника и, в целом, неблагоприятно для помпы. Уровень жидкости в буферном сосуде непрерывно контролируется, для того чтобы избежать подобной ситуации, особенно на этапе наполнения системы, когда присутствие воздушных пузырей неизбежно.

Для измерения уровня используется оптическая схема с 8-ю датчиками расположенными в небольшом объеме сообщающимся с буферным сосудом. В качестве датчика был выбран Honeywell Company LLE101000. Принцип работы датчика основан на наличии или отсутствии полного внутреннего отражения инфракрасного излучения от внешней поверхности линзы при наличии или отсутствии жидкости на уровне датчика.

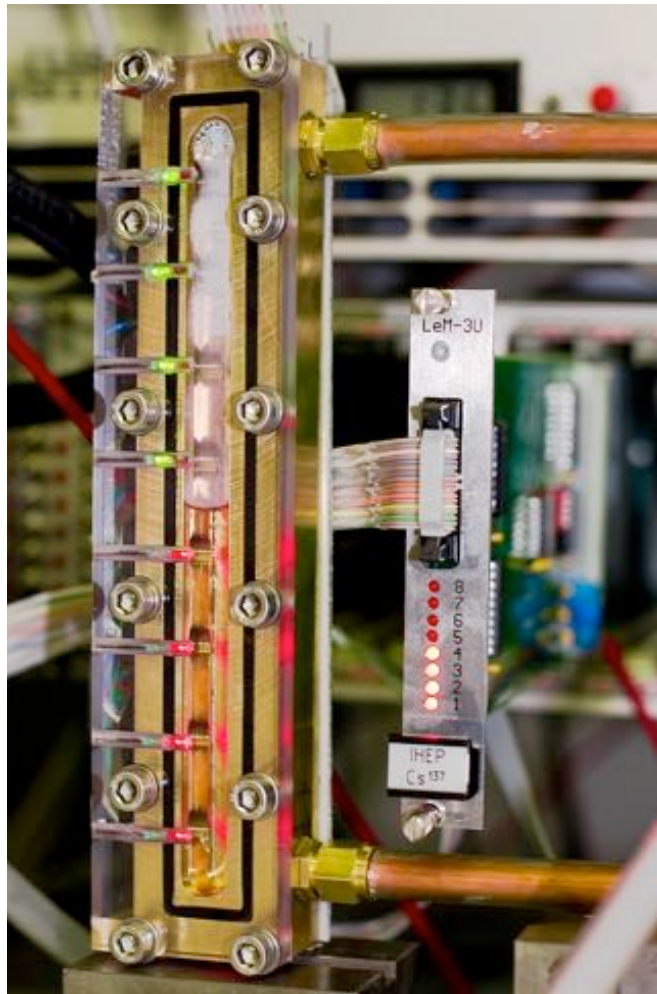


Рис. 2.23. Измеритель уровня в буферном сосуде вместе со своим управляющим модулем

Общий вид измерителя уровня (Level Meter, LM) в собранном виде и его управляющего модуля показан на рис. 2.23. Измеритель имеет 8 точек детектирования уровня в небольшом прозрачном корпусе, сообщающегося с буферным сосудом с индикацией на светодиодах (зеленый — воздух, красный — вода). Одно деление уровня измерителя соответствует примерно 200 мл объема жидкости в буферном сосуде.

Соответствующий управляющий модуль LM-3U считывает показания уровнемера, которые, в свою очередь, периодически читаются модулем 3U-CAN и передаются по шине CANbus в компьютер.

При определении уровня применяется алгоритм вычисления с весовыми коэффициентами зависящими от расположения датчиков, что защищает от возможных сбоев при чтении данных и повышает надежность измерений.

Тем не менее, эксплуатации устройства выявила некоторые недостатки использования оптических датчиков, прежде всего, вследствие загрязнений линз. С целью повышения надежности и точности измерений, ведется разработка и изготовлен прототип измерителя уровня на основе датчиков Холла и поплавкового элемента с магнитами.

2.5.4. Радиационный монитор

Для измерения возможной активации рабочей жидкости вследствие облучения пучком или нарушения целостности источника, на водяной станции установлены два радиационных монитора (RMon), регистрирующие спектр гамма-квантов непосредственно вблизи от емкостей хранения рабочей жидкости. Один монитор предназначен для слежения за емкостью центрального барреля (LB) а другой за обеими дополнительными баррелями (EBA и EBC) вместе.

В качестве детектора энергии гамма-квантов используется кристалл NaI(Tl) в форме цилиндра размером $\varnothing 50,4 \times 50,4$ мм производства фирмы Bicron (Saint-Gobain), совмещенный с фотоумножителем ETI 9266B в единый детектор спектра поглощения. Сигналы от фотоумножителей обоих детекторов, проходя через двухканальный мультиплексор, поступают на спектрометрический усилитель CAEN N968 и обрабатываются многоканальным анализатором спектра CAEN N957. Высокое напряжение для фотоумножителей обеспечивается стандартным высоковольтным источником CAEN N470. Анализатор спектра работает в режиме самозапуска, данные передаются в компьютер через интерфейс USB. На рисунке 2.24 показаны элементы радиационного монитора.

Основной задачей радиационного монитора является раннее предупреждение о нежелательной активации или радиационном загрязнении рабочей жидкости. В соответствии с общим подходом к безопасности, каждые три месяца пробы жидкости сдаются в группу радиационной защиты CERN. Таким образом, радиационный монитор позволяет вести непрерывное наблюдение в промежутке между пробами, для раннего предупреждения о возможной опасности

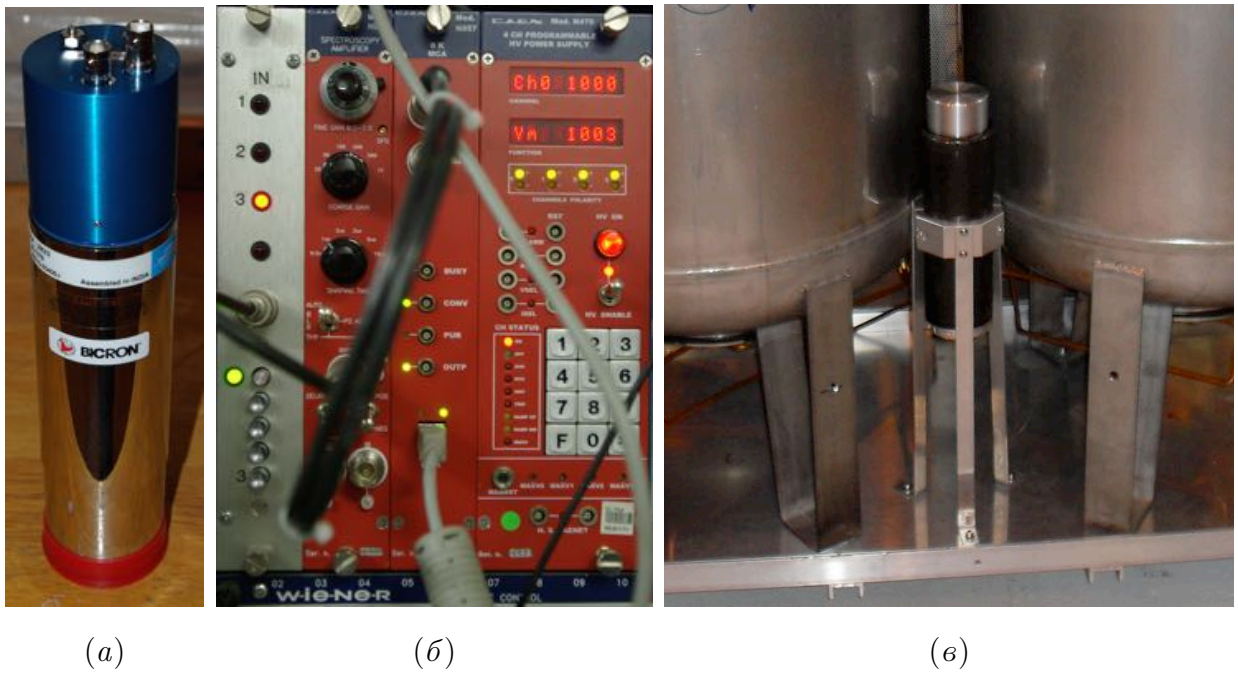
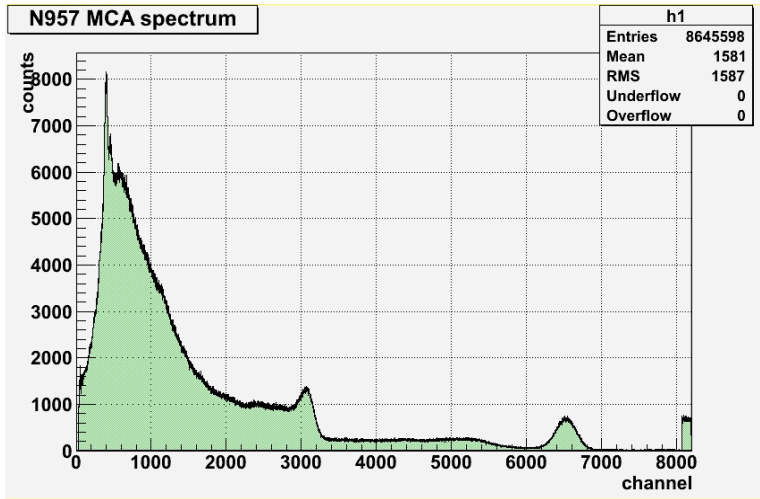


Рис. 2.24. NaI(Tl) кристалл с ФЭУ (а). Модули спектрометра (б). Детектор в сборе (в)

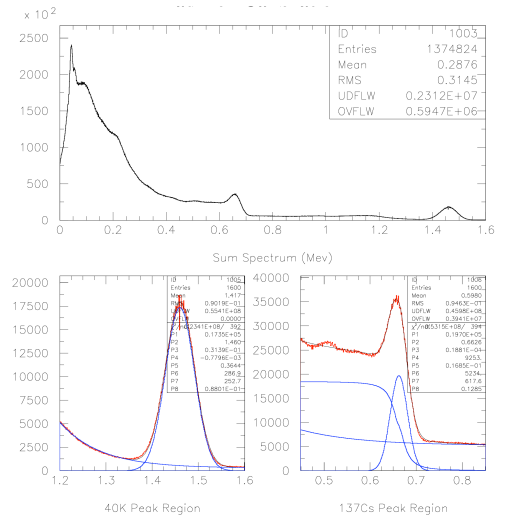
радиоактивного загрязнения рабочей жидкости от поврежденного источника и для длительного наблюдения за возможной активацией рабочей жидкости вследствие облучения полученного при работе ускорителя.

Для калибровки энергетической шкалы используется положение пика от гамма-квантов с энергией 1,46 МэВ природного изотопа ^{40}K . Для этой цели, перед корпусом детектора установлена ёмкость с небольшим количеством смеси солей калия (преимущественно K_2O). На рис. 2.25 приведен типичный спектр получаемый с детектора в присутствии ^{137}Cs источника вместе с реконструкцией энергетической шкалы.

Из этого примера видно, что данный подход позволяет определить наличие или отсутствие радиоактивного загрязнения рабочей жидкости от ^{137}Cs источника на довольно высоком уровне точности, предел которого пока не совсем определен и требует дальнейшего изучения.



(a)



(б)

Рис. 2.25. Примеры сырого (а) и реконструированного (б) энергетического спектра полученного радиационным монитором RMon в тестовой лаборатории. Эталонный пик от гамма-квантов с энергией 1,46 МэВ испускаемых изотопом ^{40}K используется для нахождения пика от 0,662 МэВ гамма-квантов изотопа ^{137}Cs

2.6. Система сбора данных и программное обеспечение

2.6.1. Тесты оборудования

Общее число датчиков приближается к 500, а число электронных плат к 80 во всех трех секциях системы в сумме. Каждый из трех ЗУ крейтов содержит 11 специально разработанных модулей (карт) 6-ти типов, для управления связью, насосом, клапанами, измерителем уровня жидкости и другими.

Для того, чтобы справиться с размером системы, многообразием и сложностью ее компонентов, был разработан набор тестов электроники цезиевой калибровочной системы с помощью программной платформы диагностики и верификации ATLAS DVS [41].

Эта платформа позволяет описать иерархию компонентов и их тестов, которые могут быть исполнены последовательно друг за другом или одновременно (параллельно), в зависимости от требований. Тесты могут выполняться как из командной строки, так и быть выбраны и запущены из графического интерфейса пользователя. Результаты тестов представляются в виде текста и могут

быть отформатированы с помощью языка HTML. Порядок выполнения тестов, их параметры указываются в специальной базе данных.

В зависимости от результата выполнения теста вся цепочка может быть остановлена или может быть запущен новый тест с другими параметрами для получения более детальной информации по проблеме. В основе тестовой платформы реализованы общие подходы применяемые для экспертных систем.

На рисунке 2.26 показан пример графического интерфейса с древовидной структурой тестов и окном вывода результатов в формате HTML. Платформа DVS также применялась во время сертификации модулей адронного калориметра мобильным тестовым стендом, прототипом системы сбора данных, MobiDAQ [42].

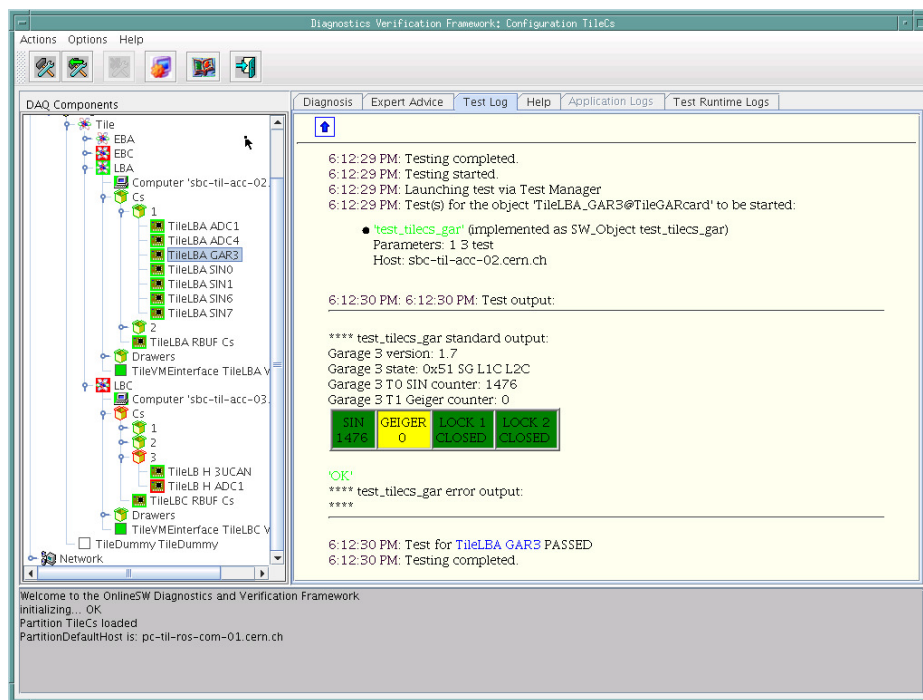


Рис. 2.26. Пример работы платформы тестов оборудования калибровочной системы

2.6.2. Система управления и сбора данных

Калибровочная система сочетает в себе несколько разнородных по своим свойствам частей: механической, контрольной, управляющей, связи и другие. Ввиду этого, математическое обеспечение её функционирования организовано

как совокупность асинхронных, но хорошо скоррелированных по действию процессов работающих в сфере общего информационного пространства.

При создании программного обеспечения процессов руководствовались следующими основными принципами:

- Все процессы используют библиотеки и другие ресурсы общего программного обеспечения калориметра TileCal и ATLAS;
- В штатном (автоматическом) режиме все процессы работают как единый организм по заранее запланированным сценариям, в соответствии с задачами калибровочного сеанса (скана) и с возможностью изменения сценария в процессе работы, в связи с изменением внешних условий;
- Часть процессов может работать независимо от других в процессе отладки и допускать «ручное» управление;
- Все изменения статуса оборудования, ситуации, посылаемые сообщения и команды визуализируются и фиксируются в архиве, могут использоваться позднее для анализа и отладки;

Архитектура всего on-line математического обеспечения калибровочной системы схематично представлена на рисунке 2.27 и состоит из многоуровневого набора распределенных контрольных процессов [43] использующих информационный сервис (IS) TileCal как средство коммуникации.

На первом уровне обслуживания анализируются и обрабатываются данные с модулей калориметра, датчиков, системы перемещения источника (гидропривод), а также состояние источников высокого и низкого напряжений. Все это оборудование находится в экспериментальном зале (шахте). Постоянно обновляемая в общей памяти статусная информация анализируется, и в соответствии со сценарием сеанса и текущей ситуацией выдаются команды на управление.

На следующем уровне располагаются процессы чтения данных и управления движением источника, а также связь с системой медленного контроля

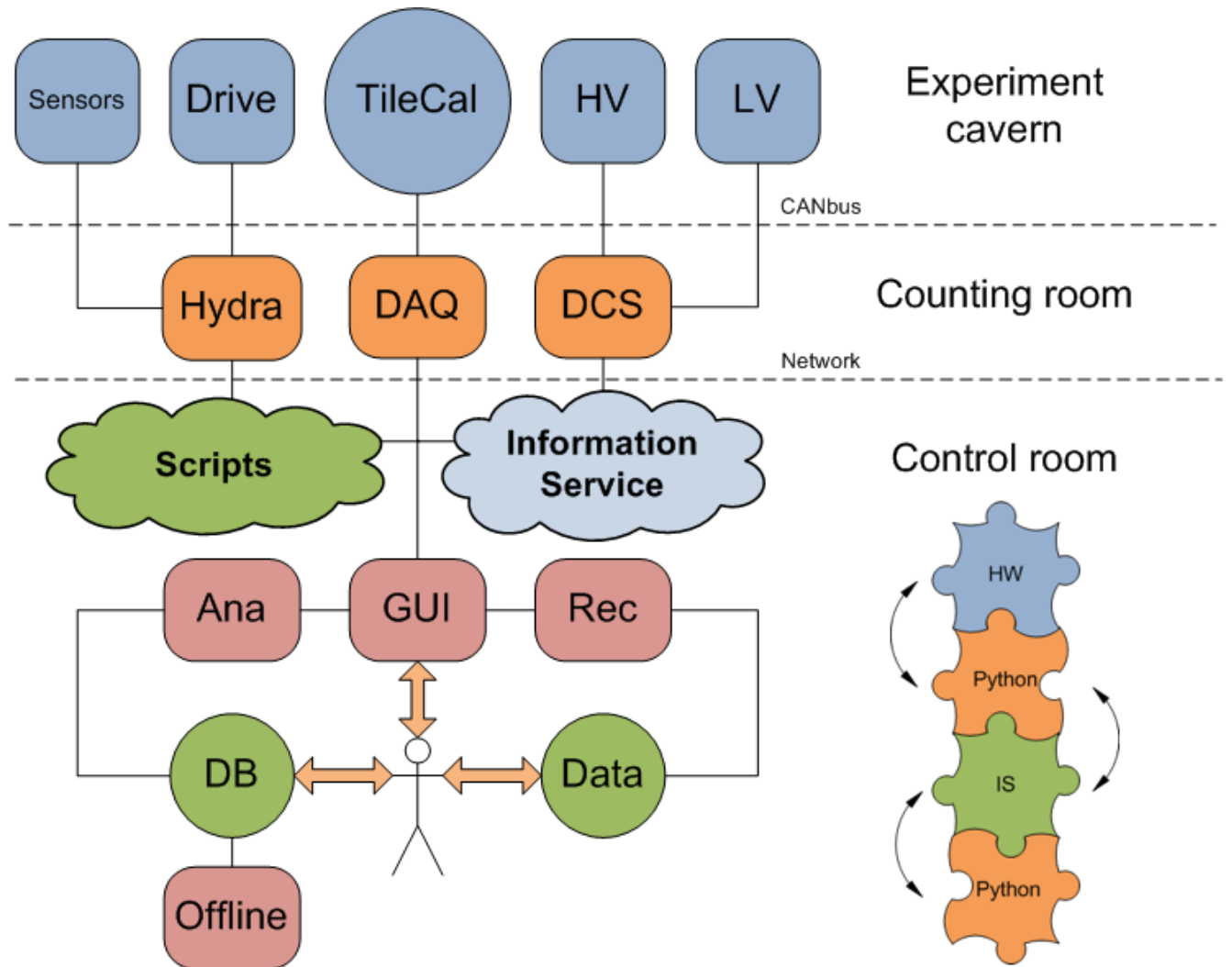


Рис. 2.27. Организация и взаимодействие распределенных многоуровневых on-line процессов [43]. На первом уровне находятся детектор, система перемещения и датчики. На втором уровне — процессы чтения данных и управления. На третьем — обработка и визуализация. Для обмена информацией используется связка из оборудования, объектов языка Python и их представления в распределенной информационной системе IS. В процессах используется встроенный интерпретатор языка Python для описания конфигурации и логики поведения

детектора (DCS). Эти процессы работают на одноплатных компьютерах (SBC) внутри VME-крейтов.

На третьем уровне располагаются процессы обработки и записи данных вместе с графическим интерфейсом пользователя. Для обмена информацией между процессами, функционирующим на разных компьютерах, используется библиотека информационного сервиса (IS) [44], на основе технологии обмена данными между объекто-ориентированными приложениями CORBA.

2.6.3. Организация и взаимодействие on-line процессов

Для задания управляющих параметров и описания логики работы программ используется язык Python, сравнительной легкости в использовании, для «не-экспертов» языка C++. Встроенный интерпретатор языка Python, вместе с дополнительными библиотеками расширений, связывает между собой объекты реального оборудования и их представление в информационном сервисе, для обмена данными между процессами (см. рис. 2.27). Описание конфигурации на языке Python позволяет создавать сложные описания различных типов и наборов оборудования из множества компонентов. Для задания логики поведения программы в стандартных и нестандартных ситуациях написан набор команд-инструкций («скриптов») с детальным описанием необходимых действий.

Вся собранная статусная информация читается и анализируется набором контрольных процессов системы. Так, процесс HYDRA контролирует механические операции через специальный интерфейс к управляющему гидроприводом блоку ЗУ, выполняет запланированные процедуры в соответствии с текущим сценарием, и выдаёт вовне информацию о движении источника для синхронизации с другими программами. Процесс DAQ, в свою очередь, осуществляет чтение данных от ФЭУ текущего модуля с частотой 90 Гц, в соответствии с предсказанным положением источника и накапливает всю совокупную последовательность данных от модуля во времени в общей памяти. Процесс DCS предоставляет основную информацию о статусе модулей калориметра: состоянии

источников питания (высокого и низкого напряжений), температуре и т.д. Все процессы общаются между собой через информационный сервис IS и их деятельность жёстко коррелирована в соответствии со сценарием текущего действия.

В дополнение к уже вышеупомянутым процессам HYDRA, DAQ и DCS, система имеет такие общие элементы как графический интерфейс пользователя для управления процессами и визуализации состояния, запись данных и их экспресс-анализ.

2.6.4. Графический интерфейс

На рисунке 2.28 представлен образ экрана как пример визуализации скана секции LB. На нем мы можем видеть:

- Текущее состояние всего гидропривода, включая WS, развиваемые давления и направления их приложения;
- Результирующее давление жидкости в точках подвода (тройниках) контуров;
- Состояние гаражей, наличие (или отсутствие) капсулы источника;
- Положение и отклики датчиков SIN на входе и выходе из модулей: пустой кружок означает отсутствие информации, 16 последовательных цветов (первый синий) и их интенсивность соответствуют числу и времени срабатывания датчика;
- Информационное окно с сообщениями о прогрессе движения источника, отсчёты всех датчиков и любых изменениях состояния системы;
- «Командное» окно представляет на выбор список возможных предварительно запрограммированных действий для ручного управления процессом, к примеру, его прерывания, изменения задач и тому подобное;

- График данных чтения откликов от сканируемого модуля в виде суммы всех интегрированных сигналов от фотоумножителей в реальном времени (при постоянной частоте считывания 90 Гц);

Одной из особенностей интерфейса является утилита «проигрыватель» — для просмотра всего произошедшего в системе за последнее время по шагам либо в ускоренном режиме. Для привлечения внимания оператора во время значимых событий, таких как открытие клапана, срабатывание датчика SIN, или заход капсулы в гараж — проигрываются звуковые фрагменты.

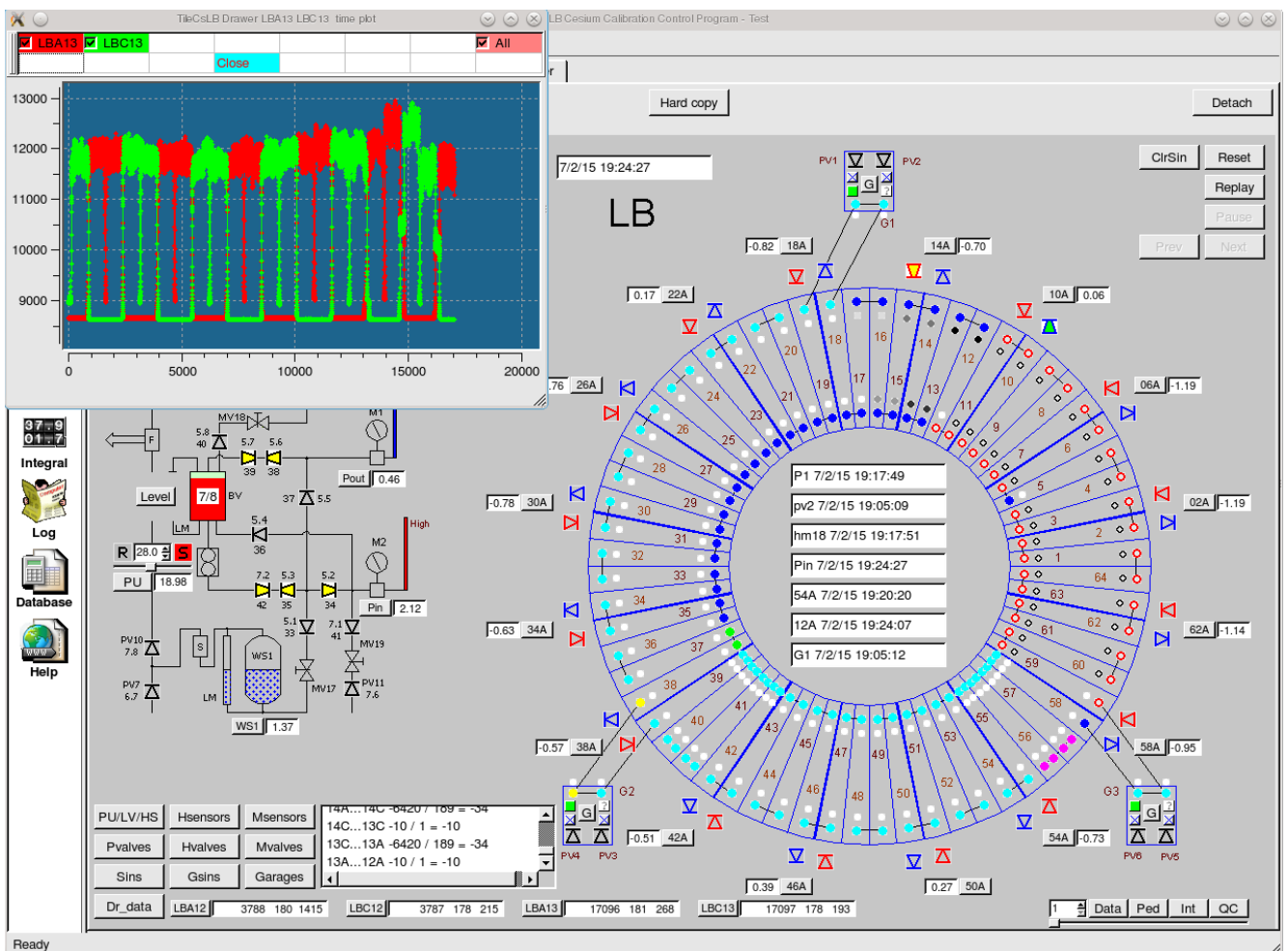


Рис. 2.28. Интерактивный графический интерфейс оператора во время цезиевого скана

2.6.5. Алгоритмы управления

Философия on-line операций и процедур организации системы основана на полной независимости «механической» части и части отвечающей за сбор

данных. Это означает, что капсула с источником (или без него — «пустышка») может быть проведена через весь калориметр независимо от состояния самого калориметра, имитируя реальный калибровочный процесс, включая чтение данных от интеграторов в зависимости от положения капсулы или по заранее составленному алгоритму. В свою очередь, процедуры чтения данных могут быть использованы независимо (без движения источника) в диагностических и проверочных целях (калибровка интеграторов, измерение пьедесталов). Такой подход обеспечивает большие возможности по отладке системы.

Синхронизация между управлением движения источника и чтением данных основывается на регистрации факта прохождения капсулой через датчики SIN, расположенные на входе и выходе из каждого модуля калориметра: модуль, в который только что зашел источник включается в цепочку записи данных и исключается из неё как только датчик SIN на выходе из модуля дал сигнал о выходе источника.

Перед началом калибровки, все модули сектора секции, инициализируются, проверяются на готовность и начинается движения капсулы источника. Как правило, читается только один модуль, через который проходит источник. Однако, в областях так называемых «ног» криостата электромагнитного калориметра, два соседних модуля читаются одновременно, из-за отсутствия разделительных датчиков SIN, вызванного недостатком пространства.

Файл сырых данных (формат ROOT) содержит все данные о состоянии элементов системы в привязке ко времени, начиная от начала и до конца сеанса калибровки. Записываются абсолютно все изменения статуса гидропривода, гаражей, датчиков давления, сигналы со всех интеграторов и другая общая информация и константы (источник, коэффициент усиления и частота), параметры высокого и низкого напряжения, показатели датчиков температуры, список «плохих» каналов и т.д. Одной из особенностей структуры сырых данных и их организации является возможность воспроизвести всю последовательность изменений во времени скана («историю») вместе с соответствующими основ-

ными данными, что очень помогает при разработке и отладке оборудования и программного обеспечения.

Рабочая частота чтения данных ФЭУ составляет 90 Гц, с одной стороны достаточно высокая для выявления тонкой структуры ячеек на скорости ниже 50 см/с и, в тоже время, обеспечивающая возможность уверенного переключения с одного канала на другой в процессе чтения цепи интеграторов.

При скорости движения источника 35 см/с полный прогон источника (скан) занимает не менее 3–5 часов (ЕВ, LB), поэтому он разбивается на три отдельных прогона (суб-скана) источника по сектору из 20–24-х модулей (положение соседних гаражей), так что каждый из них может быть завершен за достаточно короткое время. Это помогает избежать больших потерь данных, если что-то пошло «не так» и дает возможность за достаточно короткое время прервать калибровку и вернуть источник в ближайший гараж.

Стандартная калибровка LB состоит из трех суб-сканов, источник движется в одном направлении (по или против часовой стрелке), а направление меняется каждый второй скан. С другой стороны, ЕВА и ЕВС сканируются каждый раз в обоих направлениях, обычный скан на ЕВ состоит из 6 суб-сканов. Причиной такой схемы является то, что в ЕВА и ЕВС есть два модуля, которые читаются только в одном направлении. Поскольку ЕВ модули короче, они сканируются почти за вдвое меньшее время, чем LB, что делает общую длительность скана практически одинаковой. Как правило, все три секции удаётся отсканировать параллельно за 6–8 часов реального времени.

Все процедуры скана выполняются автоматически в соответствии с заранее составленным планом движения источника. Основной контрольный процесс посылает предопределённую последовательность команды гидроприводу: направление движения и настройка контура включение/выключение клапанов), скорость помпы и т.д. Процесс движения отслеживается по ожидаемому срабатыванию датчиков SIN и когда источник входит в следующий модуль, запускается чтение, продолжающееся до тех пор, пока источник не покинет модуль

(определяется по срабатыванию датчика SIN в точке выхода). Для перехода источника из текущего контура в следующий, запускается специальная процедура переключения работы помпы и рабочих клапанов, исключающая слишком резкие изменения прилагаемых давлений и скорости движения источника. По достижению источником гаража и его закрытии, вся накопленная информация сохраняется.

2.6.6. Сценарий калибровочного скана

Подготовка к цезиевому скану и, собственно, сам скан занимают достаточно продолжительное время и разделяются на следующие основные этапы:

- подготовка и проверка системы на герметичность;
- залив жидкости из станции в систему;
- прогон источников с записью полученных данных;
- фиксация безопасного положения источников в гаражах;
- слив жидкости в станцию и установление низкого давления во всех частях системы;

В промежутках между сканами рабочая жидкость хранится в сосудах водяной станции, а давление в калибровочных трубках (базисное давление), в основном, слегка ниже атмосферного. Перед сеансом давление в системе поднимается до 2,5 атм. подачей сжатого воздуха на срок до 48 часов для проверки на герметичность.

Оба давления (отрицательное и положительное) находятся под контролем весь период с окончания предыдущего сеанса калибровки и их стабильное поведение, в какой-то мере, свидетельствует о хорошей герметичности всего трубопровода. Если проблем не выявлено, давление сбрасывается и система наполняется рабочей жидкостью.

Наполнение системы происходит за 1–2 часа вытеснением жидкости из WS сжатым воздухом под давлением 2,5–2,7 атм. с одновременной прокачкой по заранее заданному алгоритму последовательно через все контура секции и сбором вытесняемого воздуха в приёмный сосуд. Критерием хорошего наполнения контура является отсутствие воздушных пузырей в буферном сосуде через который осуществляется прокачка. После того как все контура заполнены, давление в системе понижается до уровня $-0,5 \pm 0,5$ атм.

Сканирование модулей (калибровка) разбивается на несколько суб-сканов перемещения источника от одного гаража к следующему. До начала движения осуществляется конфигурация и проверка тех модулей калориметра, через которые будет проходить источник, а по окончании — подтверждение безопасного состояния гаража с источником и спасение накопленной информации. Операция повторяется до тех пор, пока все модули не будут откалиброваны.

Инициация слива жидкости из калориметра в WS осуществляется путём кратковременной (10–15 минут) подачи сжатого воздуха под давлением 2,5–2,7 атм. в верхнюю часть трубопровода. После того как воздух достигнет калибровочных трубок подача воздуха прекращается, а процесс слива идёт самотёком, под влиянием веса самой жидкости.

Правильность и безопасность проведения всех процедур обеспечивается полным контролем состояния оборудования, рабочей среды и использованием специализированных алгоритмов проведения операций учитывающих как запланированные, так и нештатные ситуации возникающие в процессе работы.

Для проверки возможного радиационного загрязнения рабочей жидкости каждые 3 месяца образец этой жидкости (250 мл) из каждой калибровочной системы направляется на радионуклидный анализ в отдел радиационной безопасности.

2.7. Обработка данных

Данные, полученные в результате проведения калибровочного сеанса, представляют собой параллельную развёртку во времени откликов всех ФЭУ модуля синхронизированную с положением источника в ячейках калориметра. Поскольку каждая ячейка состоит из нескольких рядов пластин сцинтиллятора проходимых источником последовательно, отклик ФЭУ выбранной ячейки выглядит как последовательность пьедестальных значений (отсутствие источника) и областей значимого сигнала (когда источник «освещает» пластины ячейки), как это показано на рисунке 2.29. Представляется, что при правильной интерпретации, из интегральных значений сигнальных областей можно получить достаточно точную оценку чувствительности ячейки к реальным частицам.

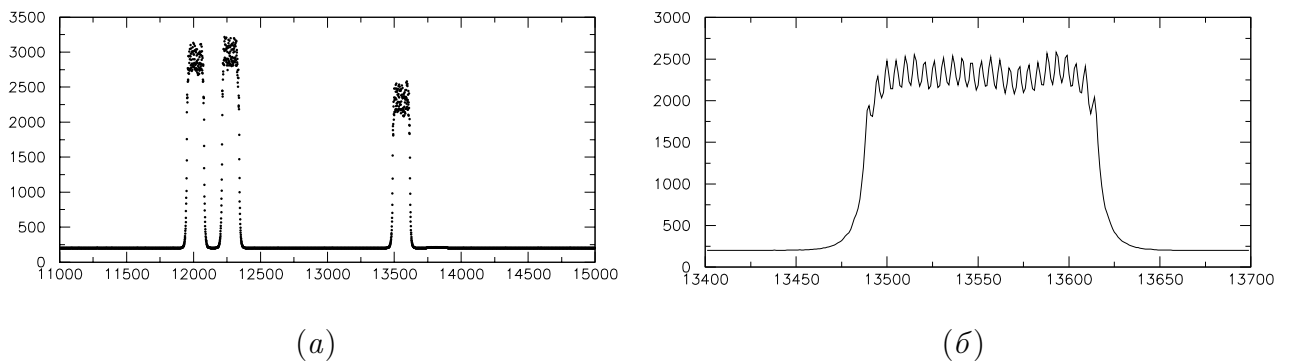


Рис. 2.29. Типичное изменение отклика ФЭУ на прохождение источника через ряды пластин ячейки калориметра (а) и более детальный вид отклика одного ряда пластин (б) полученные при чтении данных с частотой 90 Гц. «Пьедестальные» и «сигнальные» зоны хорошо выделены, так же как и внутренняя структура пластин одного ряда в ячейке

Из этого, достаточно типичного распределения хорошо видно, что а) проходя ряды пластин ячейки источник активирует («освещает») одновременно несколько рядом расположенных пластин, происходит суперпозиция откликов; б) имеется видимое отличие в величинах откликах рядов одной ячейки в зависимости от положения в ячейке: «последний» ряд даёт систематически более низкий отклик вследствие эффекта, называемым в дальнейшем «утечка 22 %».

Оба явления объясняются особенностями распространения радиационной

энергии источника в слоистой структуре калориметра, проникновение излучения на глубину существенно больше, чем характерный период структуры (18,2 мм). Вдоль ячейки (ось Z) это проявляется в наложении откликов от нескольких пластин, а в поперечной ($r - \phi$) плоскости — в наложении откликов соседних рядов. Таким образом, детальная картина взаимодействия источника с пластинами ячейки должна тщательно учитываться при вычислении результирующего отклика ячейки на источник.

Распределение энергии источника между двумя соседними рядами ($r - \phi$ плоскость) представлено на рисунке 2.30 на упрощённом примере. Источник проходит через «нижнее» отверстие в верхних пластинах, но воздействует на оба ряда достаточно симметрично относительно своего положения. Это приводит к вполне определённой соотношению между поглощённой рядами частями энергии, которое можно оценить примерно как 22 % к 78 %. Таким образом, в случае, если нижний ряд является последним в ячейке, около 22 % энергии теряется, в отличие от остальных рядов, и не суммируется в общий отклик ячейки. Очевидно, что в регистрируемый ФЭУ отклик рядов ячейки автоматически включаются оптические свойства используемых пластин сцинтиллятора, собирающего свет волокна и качество оптических контактов, что может на практике приводить к некоторому изменению соотношения «22 % к 78 %».

Все пластины сцинтиллятора имеют толщину в три миллиметра и собраны в структуру из 11 рядов пронумерованных от малого к большому радиусу как пластины 1–11 с периодом в 18,2 мм вдоль оси Z и сегментированную по радиусу. К примеру, LB пластины 1–3 представляют сегмент «А», 4–6 — сегмент «В», 7–9 — «С», а 10–11 — «D» (см. рис. 1.5). Ячейки включают в себя от 2-х до 6-ти рядов, в свою очередь состоящих из десятков пластин, образуя проективную пространственную структуру. Имеется также ряд нестандартных пластин в боковых секциях калориметра, «обрезанные» пластины, имеющие 14 мм отверстия вместо 9-ти миллиметровых, некоторые пластины проходятся источником дважды и тому подобное.

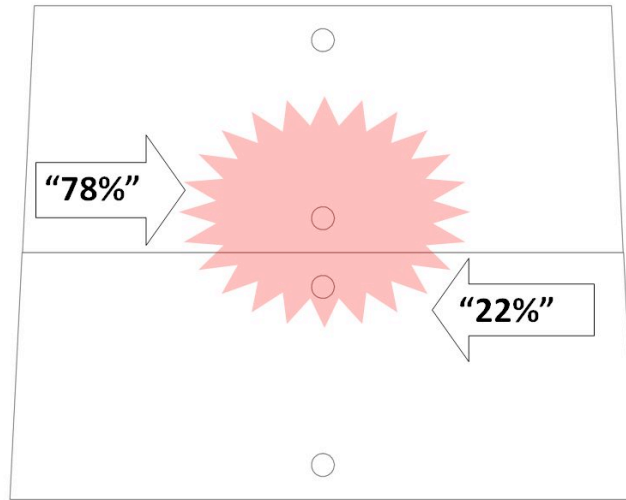


Рис. 2.30. Перераспределение энергии источника между двумя рядом расположенных рядов пластин сцинтиллятора

Вдоль перемещения источника (Z -направление) отклик одной пластины сцинтиллятора в ряду хорошо описывается суммой распределения Гаусса и экспоненты в виде:

$$GSh \times \exp^{-0.5((x_0-x_i)/\sigma)^2} + (1 - GSh) \times \exp^{-|x_0-x_i|/\lambda} \quad (2.1)$$

где GSh – соотношение вкладов обеих функций, а ширины и координаты представлены в реальной (физической) шкале, для независимости от скорости источника.

Параметры функций определены в ходе специально сделанных тестов, когда часть собирающего свет волокна отсоединялась от пластин сцинтиллятора, упрощая, тем самым, картину взаимодействия источника с ячейкой. На рисунке 2.31 представлены отклики двух отдельных пластин сцинтиллятора при прохождении источника над ними (22 % поглощение) и через них (78 %) вместе с описывающими распределения кривыми зависимости от положения источника. Шкала перемещения источника приведена в единицах периодов калориметра (18,2 мм).

Величины параметров распределений, полученные экспериментально, усреднены и зафиксированы для групп пластин одного типоразмера и используются для реконструкции и описания результирующего суммарного распределения

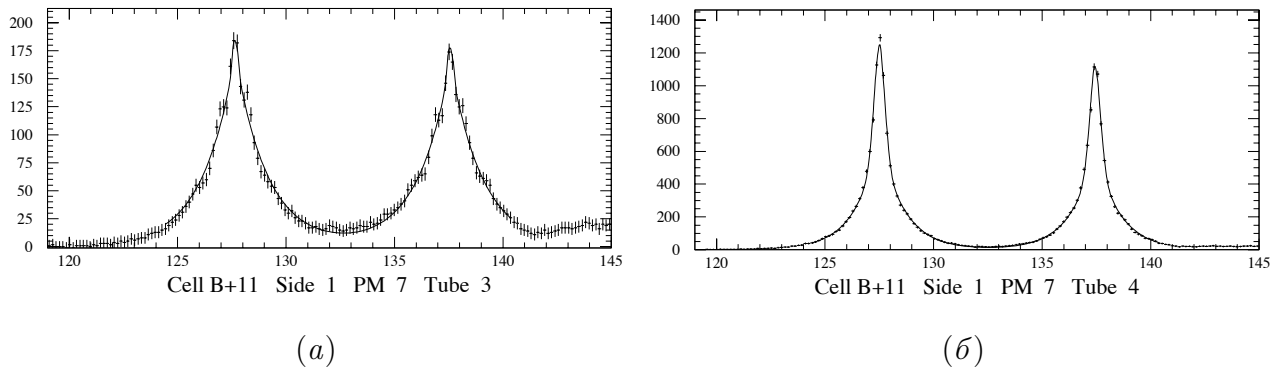


Рис. 2.31. Пример отклика двух пластин сцинтиллятора разделённых 10-ю периодами (18,2 мм) при прохождении источника над рядом пластин (22 %) (а); и через них (78 %) (б). Оба распределения описаны суммой распределения Гаусса и экспоненты с соответствующими параметрами

отклика ряда пластин в зависимости от положения источника. Как видно из этих примеров, отношения амплитуд и интегралов распределений между рядами пластин сцинтиллятора должны быть приняты во внимание при вычислении общего усреднённого отклика всей ячейки.

Первичная обработка данных начинается, естественно, с проверки на нули, переполнения и проверки на «гладкость» — слишком резкие броски сигнала сглаживаются интерполяционной процедурой. После этого калибровочные данные представляют собой непрерывную и гладкую зависимость отклика ФЭУ от времени, прямо связанного с положением источника в калибровочной трубке.

Необходимость ещё одной подготовительной операции проиллюстрирована на рисунке 2.32, где схематично показано влияние интегрирующей цепи в определении величины тока ФЭУ. Мгновенное значение тока после интегрирования (RC фактор) характеризуется эффектом запаздывания, что выражается в искажении формы результирующего сигнала, в частности, сдвига центра симметрии «теоретического» пика, как от одной пластины, так и от нескольких в ряд. В результате форма отклика меняется от направления движения источника в реальных (физических) координатах и сильно осложняет процедуру восстановления картины взаимодействия, что, естественно, нежелательно.

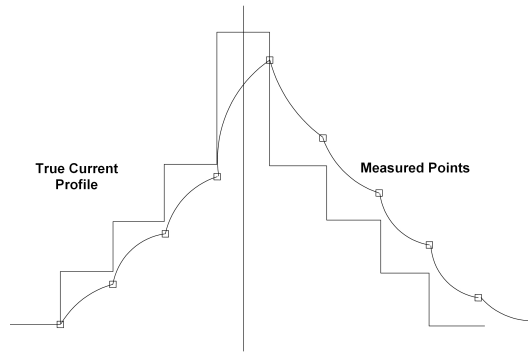


Рис. 2.32. Искажения формы «идеального» и порученного в результате интегрирования RC-цепью отклика от одной пластины сцинтиллятора

Так как базовая характеристика RC цепи — «время», то применённая процедура носит название « τ -коррекция» и описывается как

$$A_i = A_i + \delta \times (A_i - A_{i-1}) \quad (2.2)$$

где параметр δ зависит от реальных характеристик интегрирующей цепи и частоты чтения (времени интегрирования). Используя многократные измерения отклика от одного и того же ряда пластин при движении источника в разных направлениях и подбирая параметр δ , можно добиться того, что форма сигнала не зависит от направления движения. При частоте опроса 90 Герц и выбранных параметрах RC-цепи, фактор $\delta = 0,7 \pm 0,1$ и применение процедуры τ -коррекции позволяет существенно улучшить независимость формы откликов от направления движения источника. Это особенно важно в зонах естественно несимметричной картины отклика (например, на концах калориметра) и при восстановлении отклика от одиночных пластин, где симметрия описывающей функции является существенным аргументом процедуры.

Пьедесталом считается величина отклика ФЭУ в зонах уверенного отсутствия фактора возбуждения (точность вычисления — 0,1 %), а сигналом — когда присутствие источника в ячейке очевидно. После вычитания пьедестала, все отрицательные значения обращаются в ноль, а отличные от нуля значения поступают на дальнейшее рассмотрение и обработку.

Типичное распределение отклика на источник одной из ячеек типа «А»

показано на рисунке 2.33 вместе с огибающей кривой, описывающей форму отклика зависимостью 2.1. Здесь распределение для последнего ряда пластин («78 %»), приведено после того, как все необходимые проверки и коррекции сделаны, а также выполнено преобразование координат положения источника в физическую систему модуля (периоды).

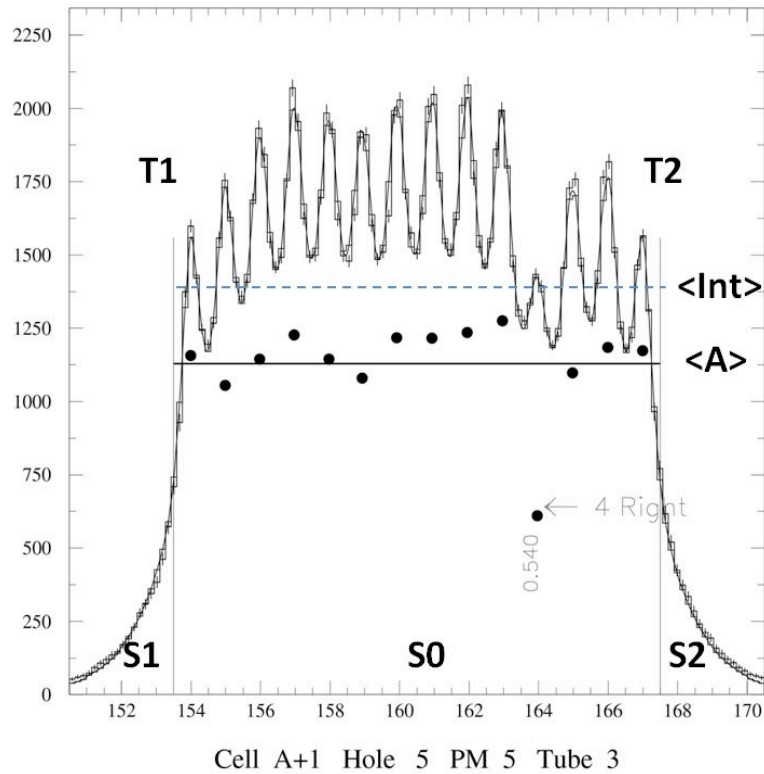


Рис. 2.33. Пример распределения отклика ФЭУ ячейки полученного при частоте чтения 90 Герц для одного из рядов пластин сцинтиллятора, трансформированного в систему координат модуля (периоды 18,2 мм) вместе с описывающей форму отклика функцией (огибающая). Величина $\langle \text{Int} \rangle$ соответствует вычислению отклика ряда пластин по «интегральному» методу, а амплитуда $\langle A \rangle$ — «амплитудному»

Положение границ ячейки показано вертикальными линиями и все 14 пластин входящих в ряд принадлежащий ячейки, хорошо просматриваются в структуре суммарного распределения. Можно предположить, что интеграл по всему распределению, так же как и его средняя амплитуда всех пластин отражают (в соответствующей шкале) относительную чувствительность всего ряда пластин к прохождению реальных частиц: ливней, струй и т.д. Два дополняющих подхода к определению «истинного» отклика ряда пластин используются при

обработке калибровочных данных: «интегральный» и «амплитудный», принципы обоих проиллюстрированы на рисунке 2.33.

«Интегральный» метод использует первичную временную шкалу перемещения источника, и средняя амплитуда отклика по ряду пластин определяется как частное от деления суммы всех амплитуд ($S_0+S_1+S_2 = \text{«integral»}$) на временную разность ($T_2-T_1 = \text{«ширина»}$). В этом методе правильность вычислений сильно зависит от точного определения моментов пересечения источником границ ряда, что предполагает хорошую предсказуемость формы концов распределения и числа ожидаемых периодов — пиков от индивидуальных пластин. Точность вычисления $\langle \text{Int} \rangle$ может достигать 0,2–0,3 %, а простота подхода гарантирует превосходную скорость обработки данных.

«Амплитудный» метод применим в физической системе координат модуля и основан на подгонке результирующего распределения к сумме пиков откликов индивидуальных пластин описываемых функцией 2.1. Для подгонки используется программа-процедура MINUIT в итерационной моде, когда подгонка осуществляется на интервале (скользящее окно) в 5–10 периодов с 3–5 периодов перекрытия на краях интервала. Полученные положения пиков и их амплитуды (чёрные точки на рисунке) используются для вычисления среднего отклика ($\langle A \rangle$) вместе с $\langle \text{Int} \rangle$ величиной, естественно происходящей из точного положения границ ряда пластин во временной шкале. Вычисления требуют больших вычислительных мощностей, времени и хорошо параметризованной формы 2.1, но, в принципе, эта процедура более правильно описывает всякого рода иррегулярности в форме результирующего распределения вызванных наличием краевых эффектов, нестандартной формой части пластин и т.п.

К сожалению, взаимодействие Cs источника с ячейками калориметра (и соответствующие распределения отклика ФЭУ) в большинстве случаев представляет картину несколько сложнее, чем иллюстрация, приведённая на предыдущем рисунке. Уже упоминавшееся распределение энергии излучения источника между рядами пластин в соотношении 22/78 (иначе называемое эффектом

«утечки») приводит к смешиванию распределений отклика от соседних рядов одной и той же ячейки. Будучи преобразованы в свет с разной степенью эффективности и просуммированы в виде отклика ФЭУ, отклики рядов (сдвинутые в пространстве модуля) производят довольно искажённую картину, как по форме, так и по величине отклика.

К примеру, в ячейке типа «А» состоящей из трёх рядов, два ряда воспринимают и преобразуют в свет всю энергию излучения источника (от каждого ряда со своей эффективностью), а третий воспринимает от источника только 78 % энергии — остальная энергия утекает в соседнюю ячейку. Будь эффективность преобразования энергии источника в свет в рядах одинаковой, задача определения «истинного» отклика была бы тривиальной, но это не так в большинстве случаев. Кроме того, ряды имеют разное число пластин, а их структуры разнесены в пространстве (сдвинуты на половину периода — 9,1 мм или больше), что также вызывает искажение формы отклика индивидуальных пластин в рядах. На рисунке 2.34 приведены два примера зарегистрированных и восстановленных распределений для рядов ячеек имеющих некоторые проблемы такого рода.

Таким образом, для правильной оценки чувствительности всей ячейки к реальным событиям, не имеющих этого свойства проблем, необходимо правильно учесть коэффициенты с которыми суммируются вклады от рядов пластин, то есть соотношение качества собираемого света с ряда, когда источник проходит через пластины ряда или над ними, так называемое «22/78» отношение, оценка которого была получена экспериментально.

И прямые измерения и оценки косвенными методами показывают вполне совместимые и взаимодополняющие результаты, а усреднение по наиболее статистически обеспечиваемым значениям даёт оценку отношения «22/78» равную $0,261 \pm 0,012$.

Исторически в «интегральном» подходе используется соотношение «22/78» полученное прямым методом (зависимое от положения ряда пластин в модуле), тогда как в «амплитудном» — фиксированная величина 0,261.

Оба, и «интегральный» и «амплитудный» подходы дают результаты сравнимые в пределах статистических погрешностей и служат в качестве дополняющих друг друга методов оценки отклика ячеек. При этом «амплитудный» является уточняющим для «интегрального» в сложных случаях сильного искажения формы распределения отклика, давая, кроме того, дополнительную информацию об индивидуальной чувствительности пластин (точность до 2 %), что крайне важно при контроле оптики калориметра.

Одним из важных параметров качества калориметра является его однородность по отношению к регистрируемым частицам. Неоднородность ряда пластин, ячеек, модулей, да и всего калориметра определяется отношением вариации индивидуальных откликов к среднему их значению ($RMS/\langle Mean \rangle$). Используются два основных определения однородности: «инструментальная» и «физическая». В качестве примера, на рисунке 2.35 показано распределение откликов пластин ячейки (символы), иллюстрирующие «инструментальную» неоднородность и средних откликов по рядам пластин (горизонтальные линии) — соответствующих «физической» неоднородности. Таким образом «инструментальная» неоднородность это ширина вариации откликов пластин, тогда как «физическая» — разброс откликов рядов, т.е. характеристика более подходящая для описания эффективности реакции калориметра на широкие регистрируемые ливни. Естественно, чем меньше неоднородность, тем лучше калориметр.

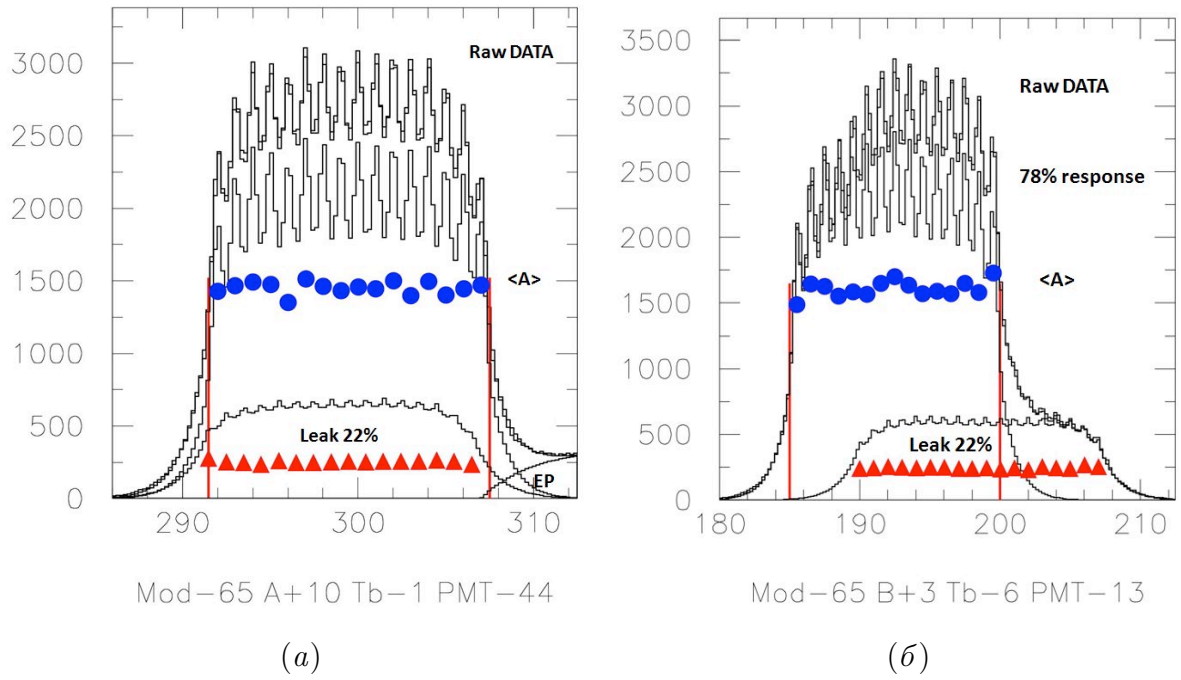


Рис. 2.34. Примеры распределений от соседних рядов ячеек где фактор «утечки» 22 % наличествует: (а) присутствует краевой эффект (влияния конечной плиты в 20 мм); (б) большое смещение между положением рядов вызывает дополнительные трудности определения границ и соотношения вкладов рядов в общий энергетический баланс ячейки

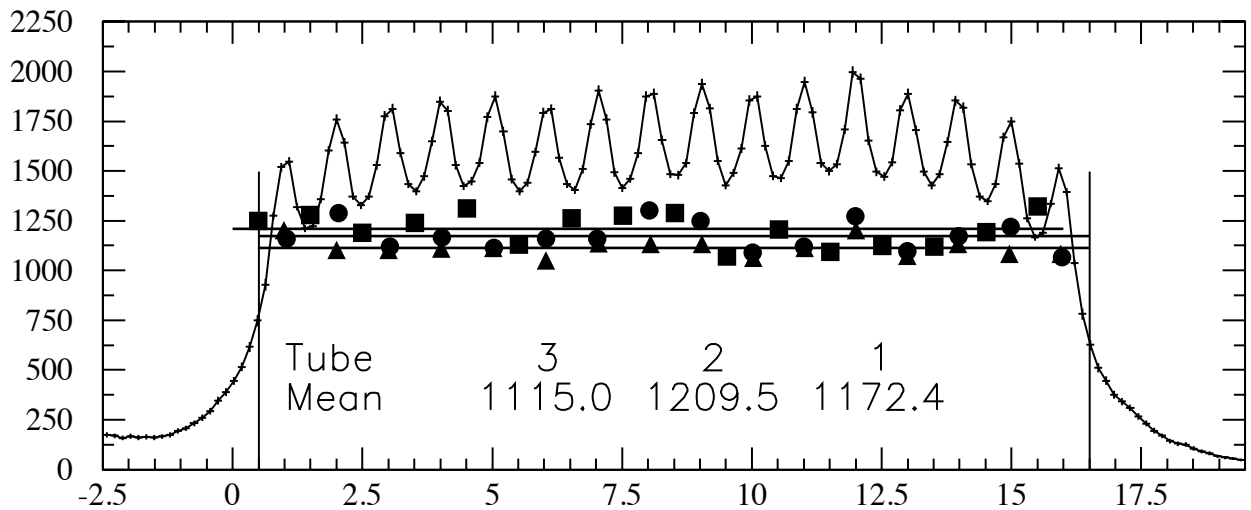


Рис. 2.35. Отклик на прохождение источника через ячейку типа «А» с оценкой откликов пластин (символы) и рядов пластин (линии). Показаны, также, распределение измеренных точек одного из рядов и аппроксимация распределения выражением 2.1. Вариации откликов пластин, соответствуют «инструментальной», а рядов — «физической» неоднородности, соответствующей качеству калориметра по отношению к «широким» физическим процессам (ливни)

Калибровка и мониторинг TileCal

3.1. Инструментация и сертификация модулей

По мере готовности механической структуры [26], модули оснащались индивидуальной оптической системой [45, 46], что включало в себя установку тайлов, спектросмещающих волокон, сегментацию ячеек через сборку волокон в пучки, а также обеспечение соответствующего оптического контакта с фотоумножителем. В целом этот цикл операций носит название «инструментация».

Все модули центральной секции LB оснащались в CERN под полным контролем качества работ с помощью прототипа цезиевой системы. Модули боковой секций EBA оснащались оптикой в ANL (США) где контроль производился также с помощью ^{137}Cs источника, но перемещаемого механически, а секции EBC в лаборатории IFAE (Испания) с использованием специальной линейки светодиодов.

По прибытию в CERN модулей обеих боковых секций, в них устанавливались калибровочные трубки для дальнейшего тестирования с помощью цезиевого источника по унифицированной схеме, применяемой к центральной секции.

Основной целью такого финального контроля было установление надлежащего качества всего оптического тракта тайл→волокон→фотоумножитель и проверка правильной сегментации ячеек калориметра, что включало в себя следующие шаги:

- Сканирование ^{137}Cs гамма-источником всего модуля при помощи цезиевой системы;
- Оценка отклика индивидуальных тайлов для получения полной картины гранулярности ячеек/тайлов и соответствующего качества отклика на источник;

- Проверка правильности расположения спектросмещающих волокон в ячейках, качество склейки волокон в пучки, качество сцинтиллятора, качество волокна (отсутствие трещин) и другие возможные недостатки, при их выявлении модули ремонтировались и проверялись снова;
- Изучение и ремонт всех отклонений более 25 % в откликах отдельных тайлов от среднего по ряду тайлов;

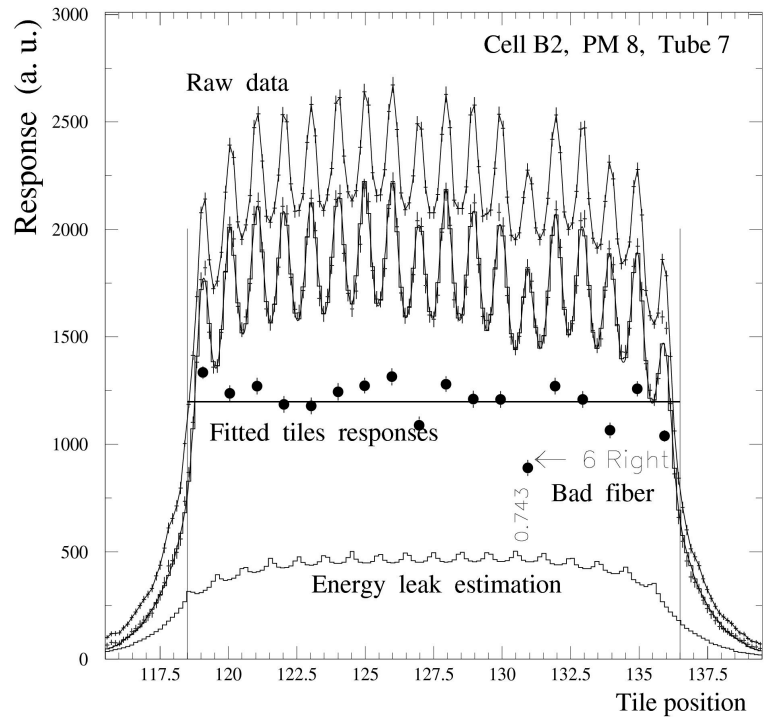
При обнаружении существенных недостатков оптической части, модули ремонтировались до тех пор, пока все проблемы не исчезали или их было уже невозможно исправить. Заключительная карта откликов заносилась в базу данных вместе с оставшимися проблемами, замеченными неоднородностями, и т.п., и являлась сертификатом готовности модуля к сборке в шахте установки ATLAS.

Рисунок 3.1 показывает пример тестируемого модуля центральной секции (LB) калориметра на участке инструментации и картину анализа ряда тайлов ячейки, на которой хорошо виден дефектный участок, по причине плохого контакта спектросмещающего волокна с тайлом.

Применение прототипа цезиевой калибровочно-мониторирующей системы для контроля процедуры инструментации и сертификации помогло заметно улучшить качество работ и достичь приемлемой однородности модулей калориметра. На рисунке 3.2 представлена физическая (не)однородность модулей центральной секции калориметра в зависимости от серийного номера, фактически от времени. Видно, что качество оптического оснащения изменялось со временем в течение всего периода инструментации (1999–2002 годы), тем не менее, обеспечивая однородность существенно лучше предельных 10 %, установленных в соответствии с техническим заданием [25]. Хотя адронный калориметр был собран и установлен в экспериментальном зале еще в 2004–2006 годах, соответствующие измерения, сделанные в 2011 году и показанные на том же рисунке, демонстрируют хорошее состояние оптического тракта модулей.



(a)



(б)

Рис. 3.1. Только что оснащенный модуль центральной секции калориметра в тестовой зоне CERN, проверяемый цезиевым источником (а). Хорошо видны калибровочные трубки и датчики прохода капсулы. Пример плохого контакта тайла со спектросмещающим волокном в виде провала в отклике (б). Все отклонения, отличающиеся от среднего более чем на 25 % подлежали исправлению

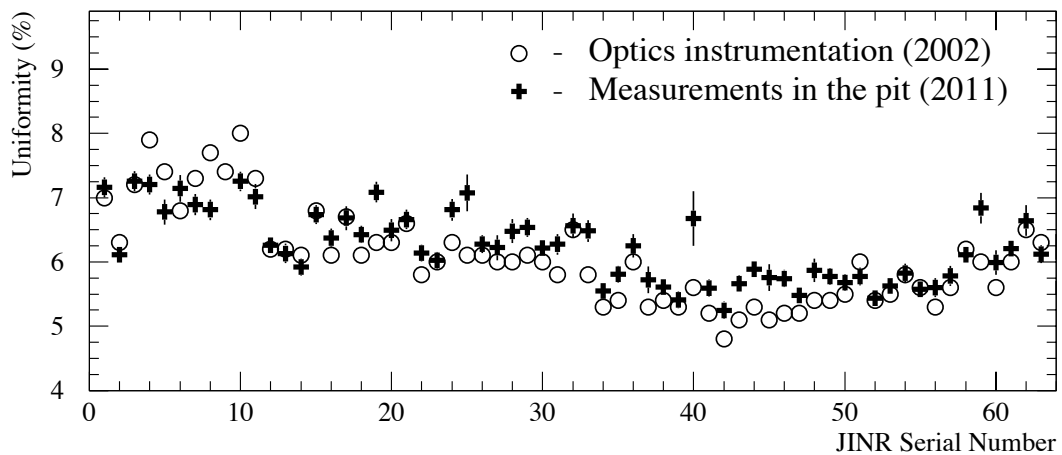


Рис. 3.2. (He)однородность модулей центральной секции (LB) калориметра полученная с помощью цезиевой системы сразу после финальной сертификации (кружки), и почти через 10 лет позже (крестики). LB модули были собраны в ОИЯИ (Дубна) и оснащены в CERN под полным контролем цезиевой системы. (He)однородность ячеек в модулях всегда оставалась менее 10 %

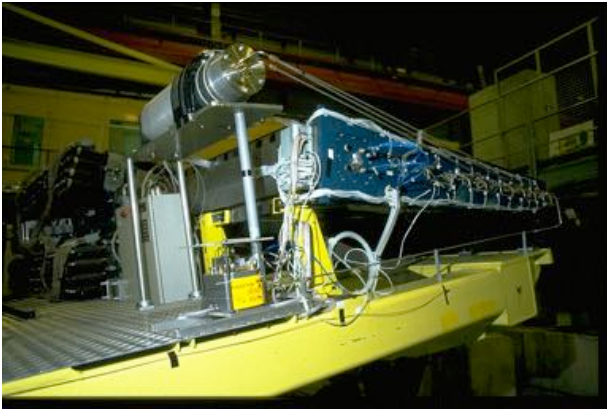
Полученные результаты и накопленный опыт при создании прототипов Cs MonSys системы привели к возможности использования реализованных подходов в эксперименте LHCb для аналогичной системы калибровки и мониторинга адронного калориметра установки [47, 48]. Практически все технические решения реализованные в системе Cs MonSys подошли и были использованы в LHCb, что позволило существенно сократить затраты и время при создании системы, успешно работающей в настоящее время [49].

3.2. Калибровка модулей на тестовом пучке

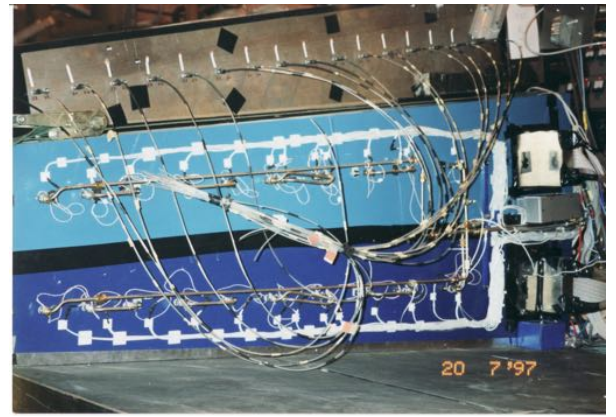
Первые прототипы цезиевой калибровочной системы, были спроектированы и изготовлены в 1996 году. Во время испытаний на пучках реальных частиц «модуля#0» (прототипа) одного модуля центральной секции (LB) калориметра прототип системы также прошёл полевые испытания, а положенные в её основу принципы были приняты в основу проекта создания полномасштабной системы калибровки. В следующем году уже два «модуля#0» боковых секций (EVA и EVC) подверглись тестам на пучках частиц и следующий, улучшенный, прототип цезиевой системы был использован для выравнивания каналов, калибровки и слежения за состоянием модулей (мониторинга).

Когда в 1999 году началось серийное производство и оптическая инструментация калориметра, примерно каждый восьмой из всех модулей отправлялся на калибровку в пучках реальных частиц [50, 51] с одновременной межмодульной калибровкой одним и тем же цезиевым источником как побочный, но очень важный, результат мониторинга. Данные наблюдения за стабильностью оптической системы и ФЭУ этих модулей за период работы на тестовых пучках (1996–2003) цезиевой системы оказались также очень полезны в дальнейшем.

На рисунке 3.3а показан модуль#0 центральной секции (LB) на сканирующем столе в зоне тестовых пучков ATLAS с первым прототипом Cs MonSys вместе с отвергнутым позднее так называемым «пневматическим» вариантом.



(a)



(б)

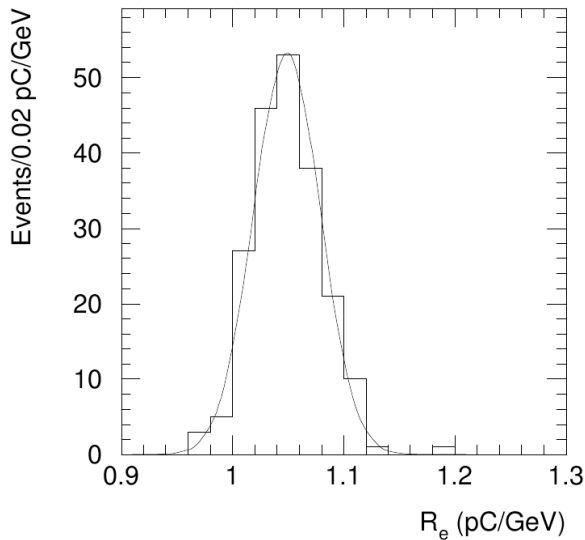
Рис. 3.3. (а) 1996 год — LV модуль #0 в тестовой пучковой зоне ATLAS вместе с двумя вариантами цезиевой системы: пневматическим и гидравлическим. Хорошо видны калибровочные трубки, гаражи и датчики. (б) 1997 год — временный вариант расположения калибровочных трубок гидравлического варианта для ЕВА и ЕВС модулей #0 с датчиками прохождения капсулы

Хорошо видны калибровочные трубки, гаражи и датчики. На этом же рисунке (рис. 3.3б) показан временный вариант расположения калибровочных трубок для ЕВА и ЕВС модулей #0, вместе с первыми образцами датчиков прохождения капсул.

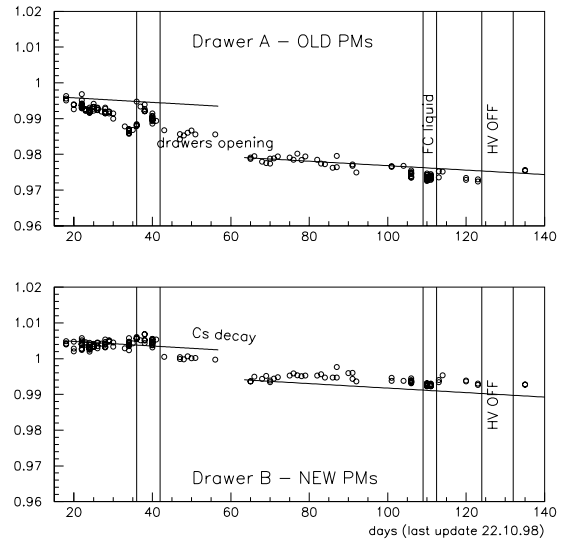
Два основных результата были достигнуты с помощью цезиевой системы во время тестов на пучке. Первый — получен калибровочный коэффициент электромагнитной шкалы калориметра, соединяющий собранный свет (заряд) с поглощенной энергией, равный $1,050 \pm 0,003$ пКл/ГэВ (рис.3.4) [52, 53, 50]. Это дает возможность распространить результаты тестов на пучке с нескольких калиброванных модулей на все остальные, используя результаты, полученные Cs MonSys, в качестве точки отсчета.

Вторым явилось то, что основываясь на данных мониторинга модулей #0, удалось обнаружить кратковременное ухудшение чувствительности фотокатода используемых ФЭУ, вызванное накопленным зарядом (поглощённым светом) изначально выбранной модели фотоумножителя. Эти данные позволили скорректировать конструкцию и улучшить характеристики ФЭУ Hamamatsu R7877.

На рисунке 3.4б показаны характеристики двух наборов фотоумножителей — до и после изменения конструкции. В то время как первый («старый») набор фотоумножителей несколько утратил свою исходную чувствительность после поглощения определенного количества света (для усиления эффекта был использован лазер), второй («новый»), улучшенный набор ФЭУ сохранил свои характеристики неизменными в тех же условиях засветки.



(a)



(б)

Рис. 3.4. Параметр электромагнитного преобразования TileCal (а). Относительные отклики фотоумножителей до (вверху) и после (внизу) улучшений сделанных в 1998 году в соответствии с результатами тестов 1996–1997 годов (б)

3.3. Эквализация и мониторинг калориметра

Эквализацией (выравниванием) калориметра называется процедура настройки высокого напряжения, и, соответственно, коэффициента усиления, фотоумножителей для достижения однородного отклика ячеек калориметра в соответствии с требованиями эксперимента. Для адронного калориметра TileCal это означает что настройки каналов регистрации заданы таким образом, что большинство каналов имеют одинаковый динамический диапазон для регистрации адронов и струй до 2 ТэВ, а для некоторых ячеек, в частности D-слоя LB

секции, повышают чувствительность ячеек на 25 % выше нормальной для улучшения надёжности регистрации мюонов.

За 2–3 итерации процесса расчёта и внесения поправок на значения высокого напряжения фотоумножителей по откликам на цезиевый источник достигается хорошая однородность всего калориметра. Естественно, при этом учитывается как энергетическая шкала, так и активности источников используемых в секциях. В качестве примера, на рис. 3.5 показаны распределения откликов всех активных каналов калориметра — по результатам первичной эквализации в 2009 году и полученные спустя четыре года.

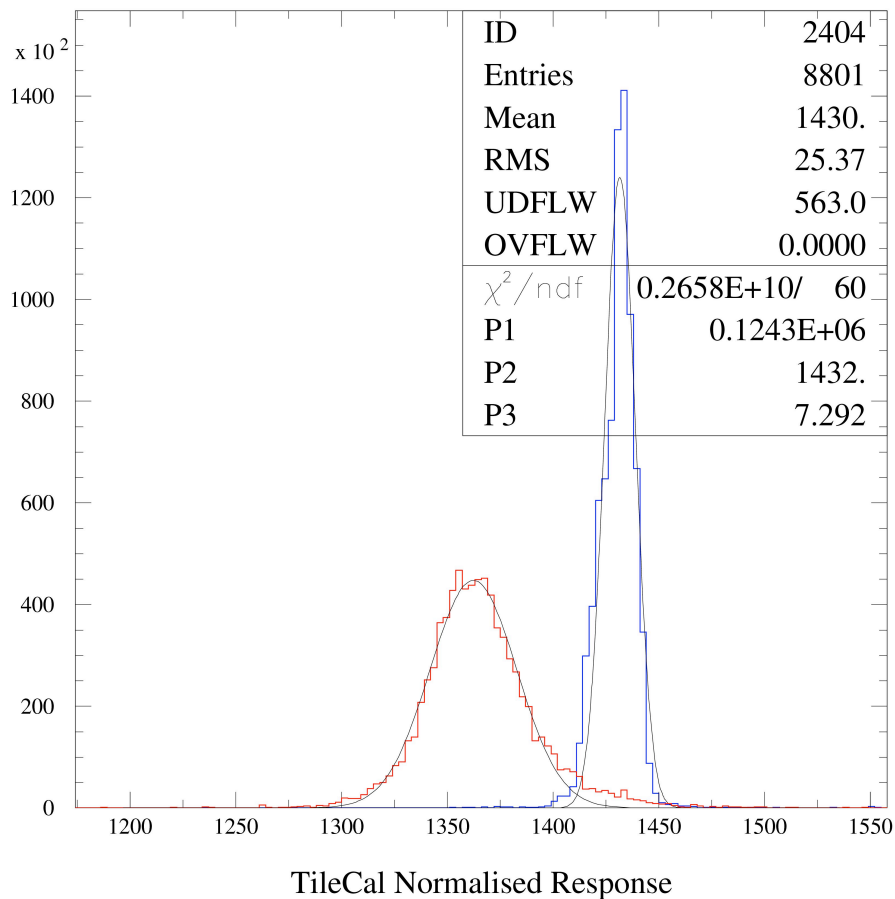


Рис. 3.5. Распределение отклика всех ячеек калориметра на ^{137}Cs источник сразу после эквализации (2009 г.) и четыре года спустя (без поправки на уменьшение активности источников)

Можно заметить, что вначале все «живые» каналы равны в своих откликах в пределах 2 %, тогда как большинство из них эквализованы даже лучше чем 0,5 %. С другой стороны, через несколько лет работы, отклики ячеек ка-

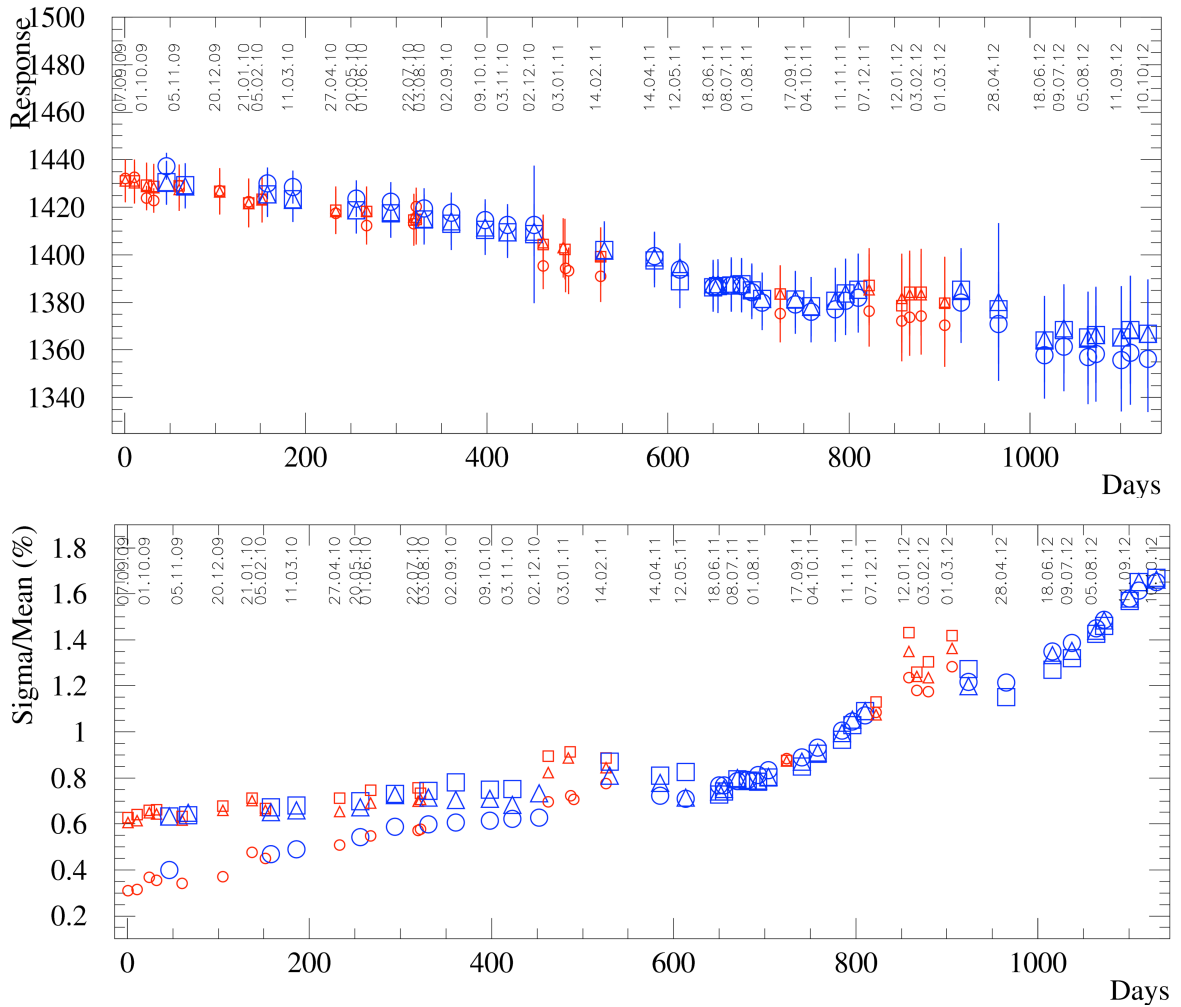


Рис. 3.6. Зависимость отклика адронного калориметра TileCal на источник ^{137}Cs во времени и его флуктуации

лориметра снова начинают отличаться до 2 % процентов от среднего отклика, поправленного на распадную кривую цезиевого источника (2,3 % в год).

Более пристальный анализ отклика всех секций калориметра показывает общую зависимость от времени (рис. 3.6), при этом, в начале периода работы ускорителя, в отсутствие пучков высокой интенсивности, отклик снижается в соответствии в кривой распада цезиевого изотопа (верхний рисунок), тогда как далее начинаются флуктуации и увеличивается разброс (RMS). Эти флуктуации (рисунок внизу), будучи относительно небольшими вначале (первый год работы), становятся существенно больше со временем, ухудшаясь вместе с увеличением интенсивности столкновений.

Такие флуктуации диктуют необходимость регулярного (раз в месяц) ска-

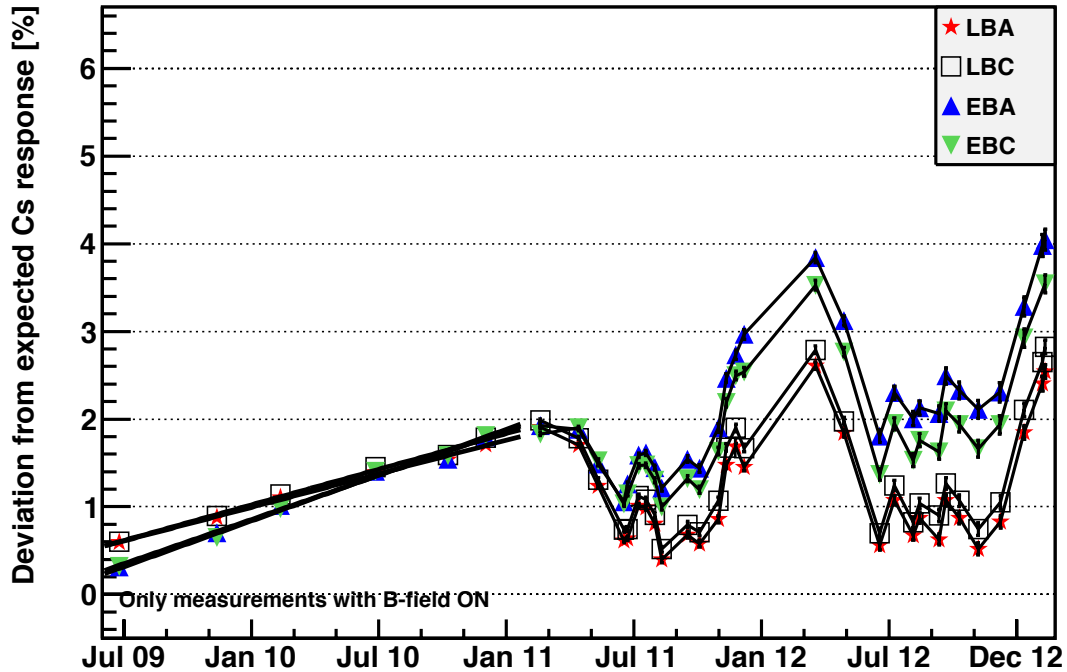


Рис. 3.7. Зависимость отклонения отклика ячеек слоя «А» адронного калориметра TileCal на источник ^{137}Cs от ожидаемого от времени

нирования калориметра источниками и его адекватной калибровки другими системами во время набора статистики, для учёта всех возможным изменений чувствительности калориметра к реальным событиям. Так вместе с изменением отклика сцинтиллятора, могут изменяться и характеристики фотоумножителей, регистрируемые лазерной системой. Совместный анализ результатов цезиевой и лазерной калибровок позволяет «отделить» одно от другого и связать результаты во времени и в энергетической шкале.

При вычислении калибровочных коэффициентов необходимо вводить поправку на уменьшение активности источника со временем. При времени полураспада ^{137}Cs в 30,2 года, активность источника уменьшается каждый год на 2,3 %. В течение одного года проводится от 10 до 20 полномасштабных сканов калориметра. На рисунке 3.7 показана зависимость отклонения отклика ячеек слоя «А» калориметра на цезиевый источник от времени.

Хорошо видно, что в отсутствии пучка отклик калориметра соответствует

кривой распада цезия. При этом наблюдается небольшое увеличение отклика — так называемый «положительный» дрейф фотоумножителей. В момент засветки пучком отклик начинает падать, а во время остановки ускорителя расти. В этом случае с помощью какой-либо одной калибровочной системы невозможно разделить эффекты изменения отклика в фотоумножителях от эффектов изменения в сцинтилляторе или в спектросмещающих волокнах. Для этого необходимо провести совместный сравнительный анализ отклика калориметра на цезиевую калибровочную систему и другие, в частности, на лазерную.

На рисунке 3.8 показана зависимость изменения отклика ячеек A13, измеренная тремя разными калибровочными системами [54]. Из него видно, что системы, измеряющие полный тракт прохождения сигнала соответствуют друг другу, а лазерная система, измеряющая изменение отклика фотоумножителя, отклоняется от их поведения. Это позволяет разделить эффекты старения сцинтиллятора от изменения усиления в фотоумножителях.

Для точной калибровки калориметра имеет значение наличие или отсутствие магнитного поля в установке. Поскольку набор физических данных осуществляется с полностью включенным магнитным полем как соленоида, так и тороида, для калибровки калориметра используются сканы с магнитным полем. Сканы без магнитного поля тоже проводятся для мониторингования общего состояния калориметра и оценки влияния магнитного поля на отклик ячеек калориметра.

Влияние магнитного поля на характеристики калориметра может быть двояким: уменьшение отклика вызванное искажением поля внутри фотоумножителя и увеличение отклика из-за поведения органического сцинтиллятора в сильном магнитном поле [55, 56]. Первое кажется достаточно маловероятным, благодаря применению соответствующей защиты фотоумножителей от магнитного поля, тогда как второе требует более пристального изучения.

Точности калибровочной системы в оценке отклика всей ячейки (или ее частей) находящейся в пределах 0,3 % хватает для обнаружения изменений

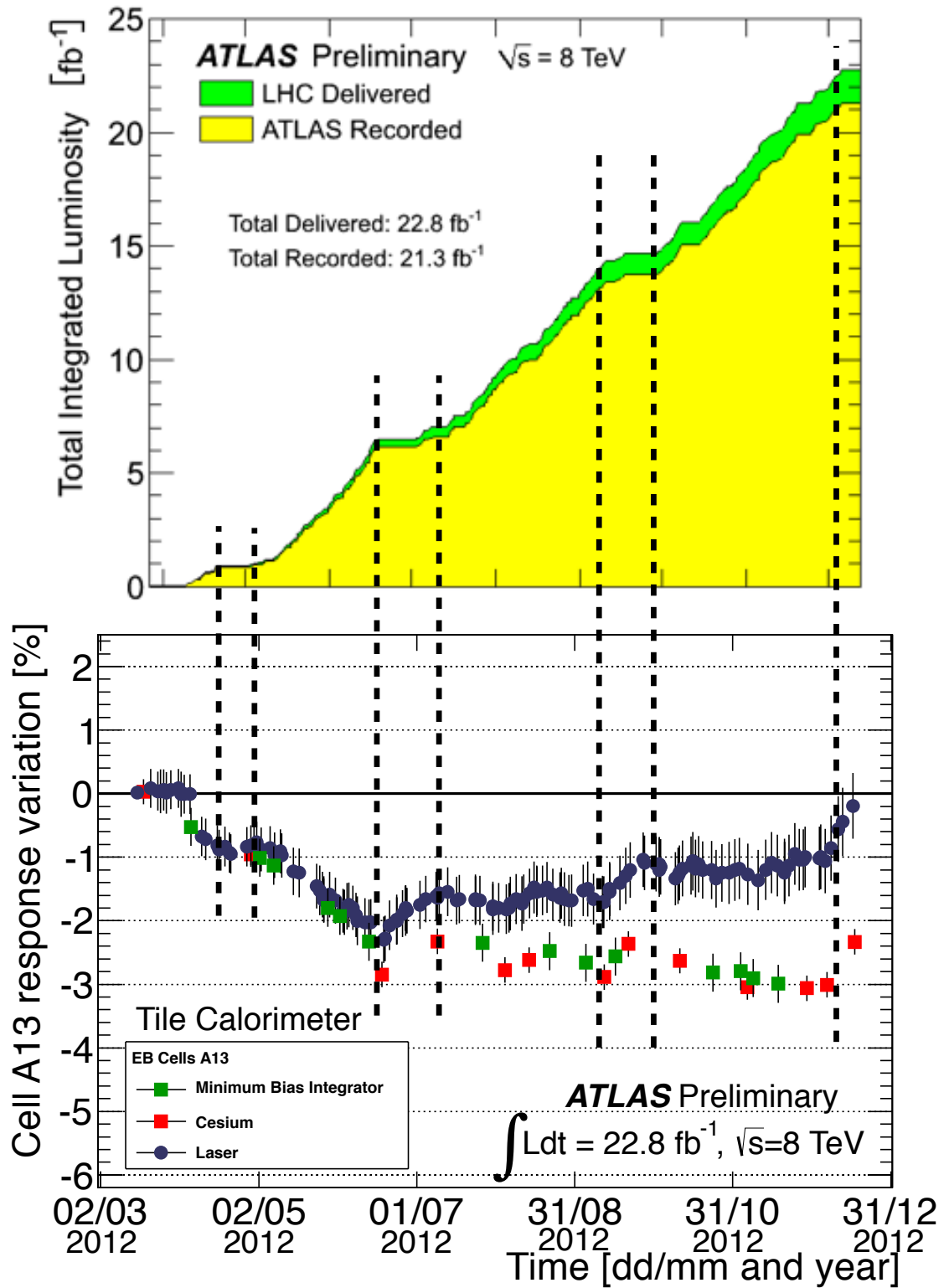
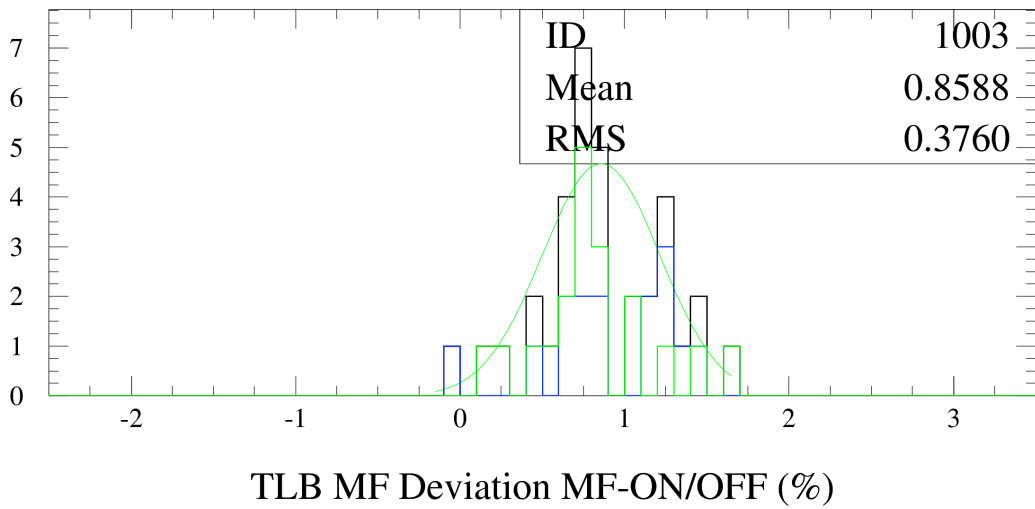
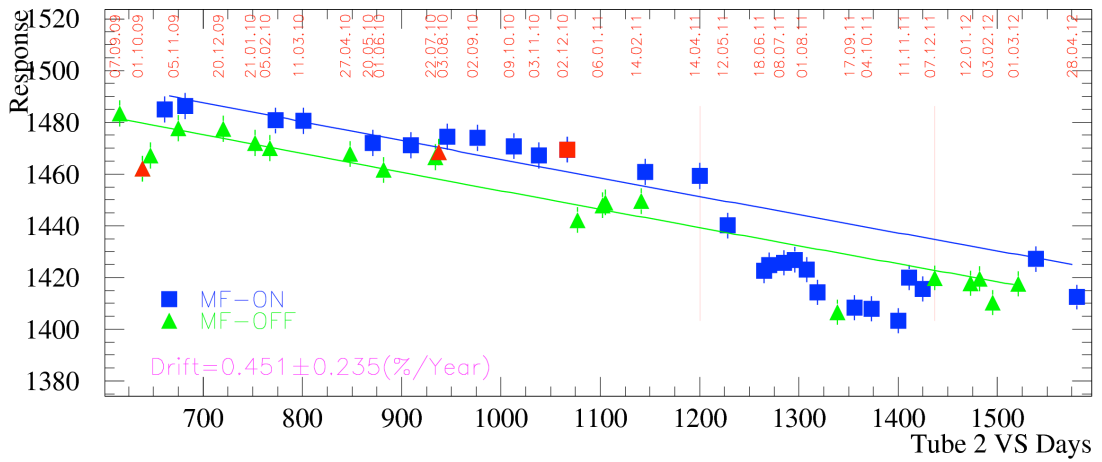


Рис. 3.8. Зависимость отклика внутренних ячеек A13 адронного калориметра TileCal на калибровочные системы во времени [54]

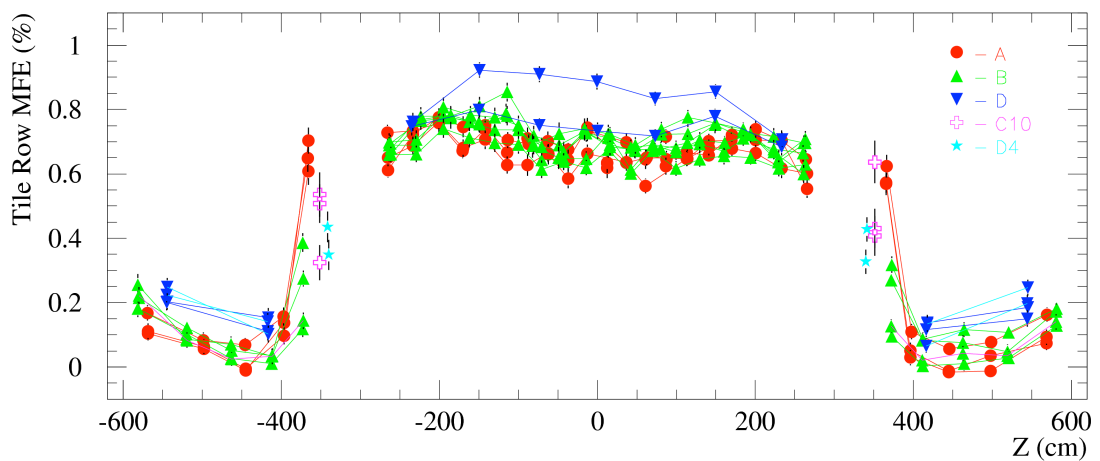
отклика в 0,5 % и выше. Проанализировав вместе два набора данных в присутствии и отсутствии магнитного поля, можно оценить свойства калориметра возникающие из-за присутствия такового. Точность, полученная в результате подобного подхода, учитывая эффект усреднения за достаточно длинный период времени, может быть даже лучше чем в случае единичного измерения.

На рисунке 3.9 в качестве примера показан набор измерений для одного ряда тайлов ячейки калориметра. Треугольниками отмечены данные сканов без магнитного поля, а квадратами — с полем. Первая половина измерений была сделана при малой интенсивности пучка, когда фотоумножители еще не были перегружены, в отличие последующий половины измерений. Обе половины наборов данных аппроксимированы кривыми распада цезия и распределение соответствующих разностей данных приведено ниже.

Среднее значение распределения является сертификатом эффекта магнитного поля в данной точке тела калориметра. Прделанное для всех ячеек и рядов тайлов в ячейках, данная процедура дает трехмерную картину эффекта воздействия магнитного поля (рис. 3.9).



(a)



(б)

Рис. 3.9. Эффект магнитного поля в тайлах: Отклики ряда тайлов с и без магнитного поля (вверху) и распределения их разницы (внизу) (а). Аппроксимация сделана кривыми цезиевого распада. Распределение по Z-координате эффекта магнитного поля для разных слоев calorimetра (б). Левая часть — EVC, центральная — LB, правая — EBA

3.4. Мониторирование тестовых модулей

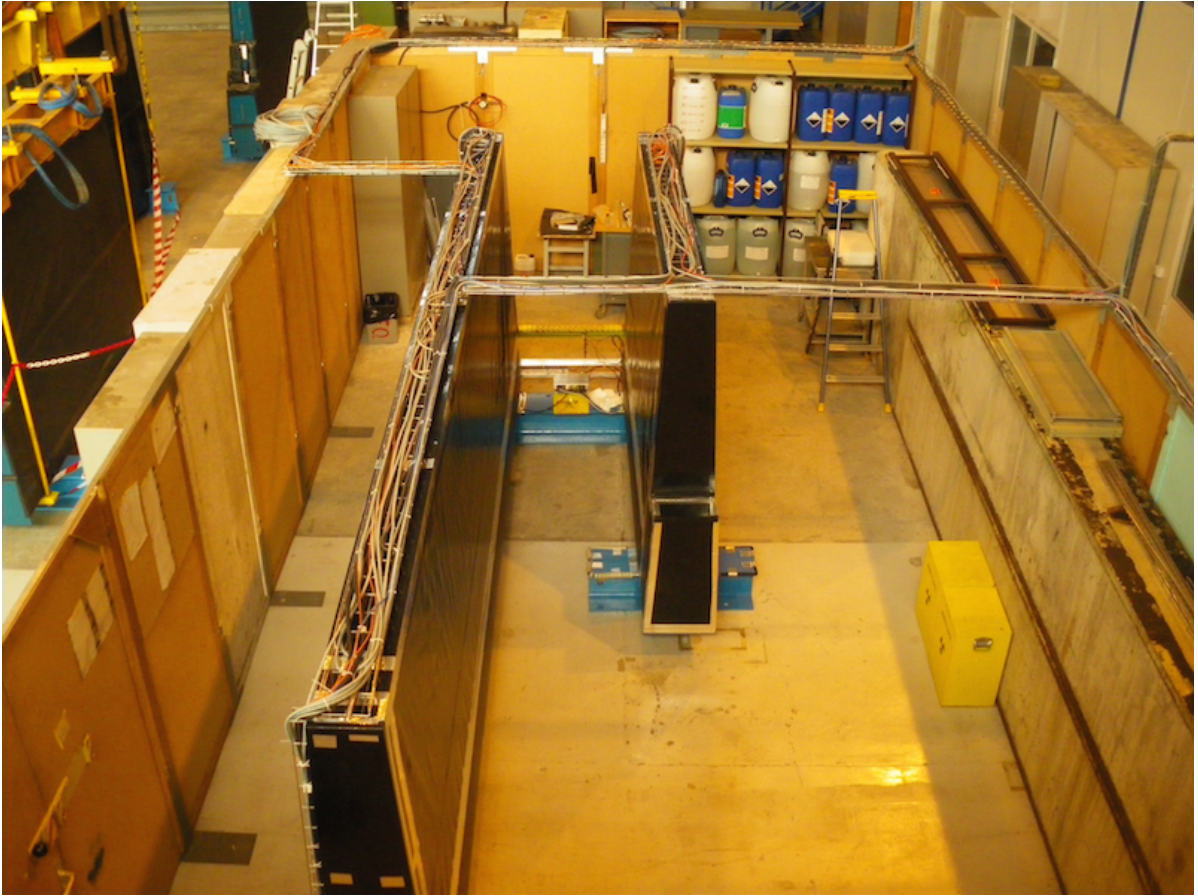
Для изучения естественного старения модулей калориметра TileCal без воздействия пучка, для проведения методических работ по тематике цезиевой системы, для испытания новых компонентов и электроники, в CERN была создана тестовая лаборатория в здании 175. В ее состав входят следующие компоненты:

- Тестовая зона с двумя «запасными» модулями калориметра LB65 и EBA65;
- Цезиевая калибровочная система, аналогичная системе установленной в шахте, охватывающая 2 тестовых модуля калориметра;
- Стенд для исследования оптических свойств сцинтиллятора источником ^{90}Sr ;

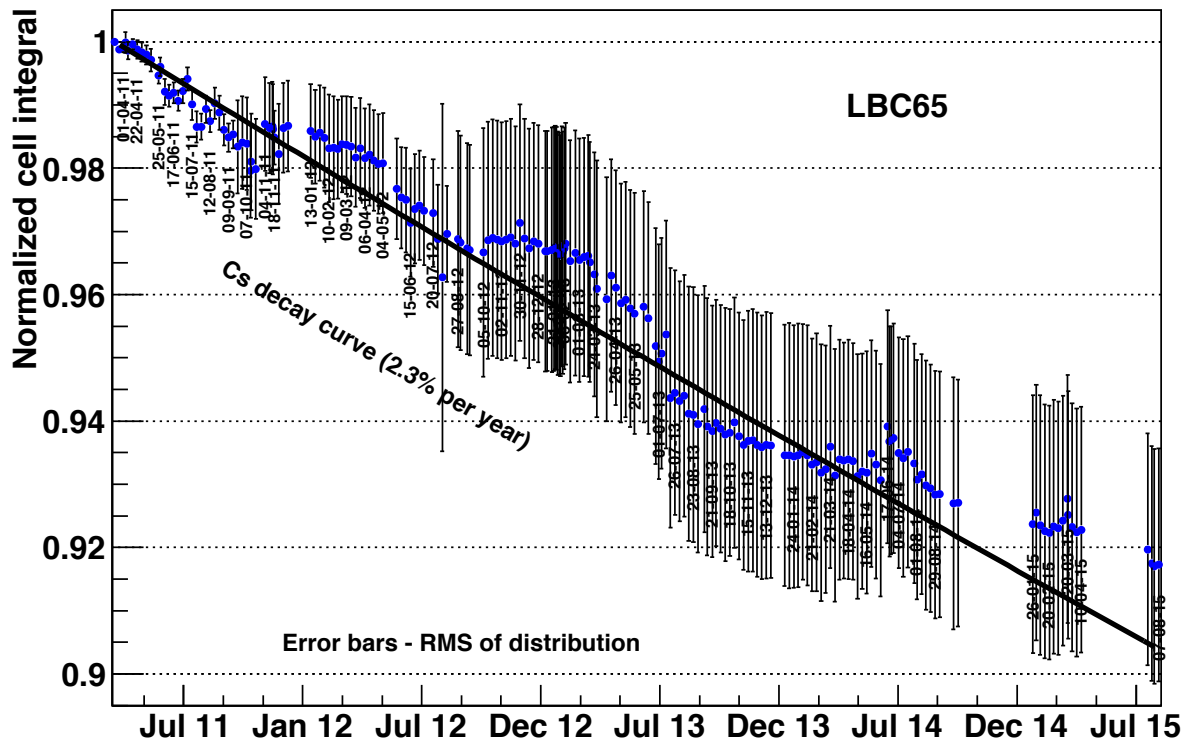
На рисунке 3.10а показана тестовая зона с модулями калориметра.

Для изучения естественного изменения отклика калориметра в отсутствие радиационного повреждения пучками частиц, с периодичностью 1 раз в неделю в тестовой зоне проводятся цезиевые сканы модулей по 10 раз каждый. На рисунке 3.10б приведена зависимость изменения отклика тестового модуля на цезиевый источник от времени.

Кроме того, с помощью тестовой системы дважды проводилась взаимная перекалибровка источников, сопровождающаяся дополнительными измерениями.



(a)



(b)

Рис. 3.10. Тестовая зона в здании 175: модули калориметра (a); изменение отклика модуля со временем (б)

Методические работы

4.1. Спектрометрия гамма-источников

Как уже было упомянуто ранее, в системе используется несколько радиоактивных источников (см. табл. 2.1), которые были изготовлены в разное время двумя производителями. Для подтверждения и уточнения информации о качестве источников полученной от производителей был произведен сравнительный спектрометрический анализ. Энергетические спектры всех пяти источников были измерены на специальном стенде (рис. 4.1). Источник помещался внутрь свинцового контейнера, и испускаемые гамма-кванты через свинцовый коллиматор попадали на двухдюймовый кристалл NaI(Tl), соединенный с фотоумножителем как единый детектор. Сигнал с фотоумножителя усиливался спектрометрическим усилителем CAEN N968 и регистрировался многоканальным анализатором CAEN N957 (8000 каналов) с разрешением до 10^{-4} . Для калибровки энергетической шкалы использовались соли калия, дающие характерный пик на 1,46 МэВ от природного изотопа ^{40}K .

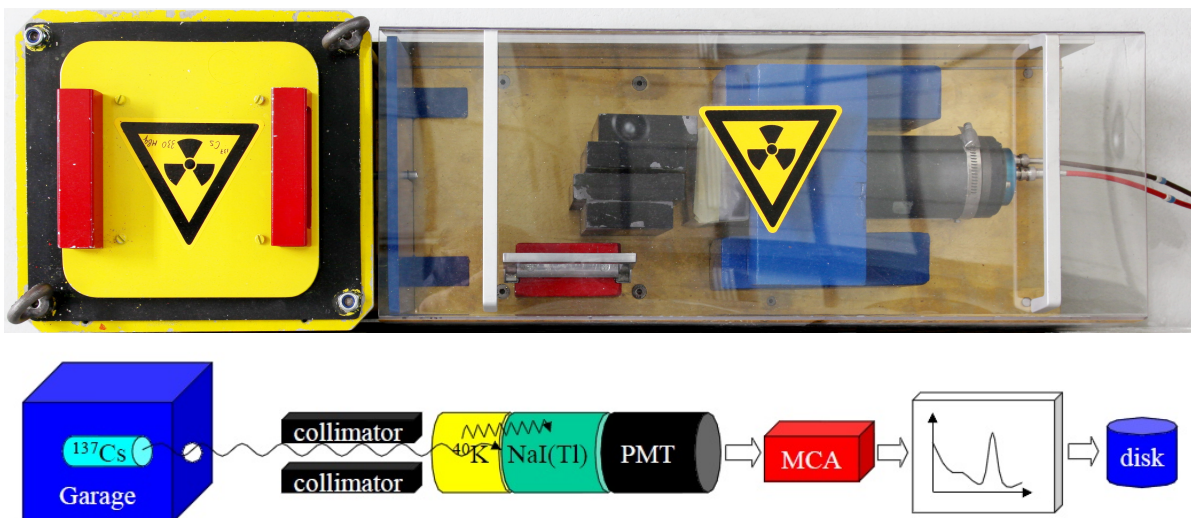


Рис. 4.1. Фото спектрометрического стенда и его схема

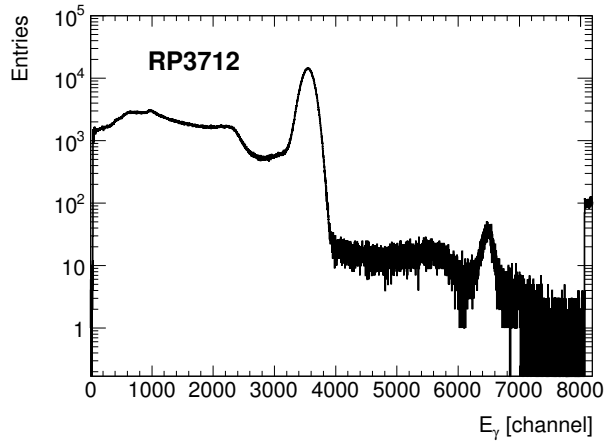
Загрузка детектора, регулируемая коллиматором, сохранялась на уровне 2500 событий в секунду, «мертвое время» системы составляло не более 2,5 %.

Для каждого источника был зарегистрирован набор одно-часовых измерений спектров и набор спектров в отсутствии источника (рис. 4.2). Длительность измерения в один час была выбрана для уменьшения флуктуаций при небольших возможных изменениях внешних условий (температуры).

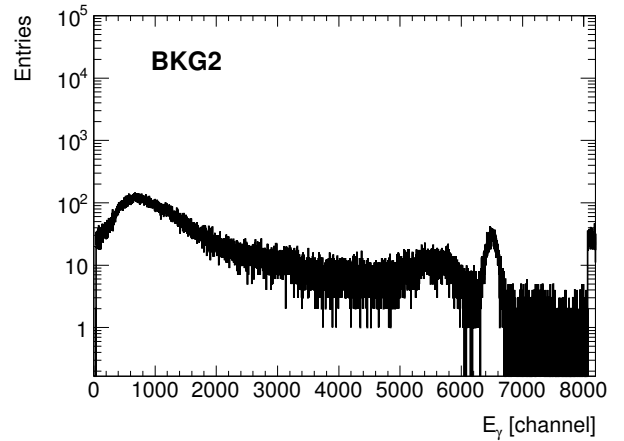
Фотоэлектронные пики от ^{137}Cs на 0,662 МэВ и от ^{40}K на 1,460 МэВ аппроксимировались функцией Гаусса, а положения пиков использовались для вычисления коэффициента перехода от номера канала АЦП к энергетической шкале, при этом положение пика от калия использовалось в качестве опорного. Общий эффект от изменения температуры и других внешних условий был достаточно мал (на уровне 0,2 %, рис. 4.3) и масштабный коэффициент был стабилен на уровне 0,27 кэВ/канал (рис. 4.4). Приведение одно-часовых спектров к энергетической шкале позволяет их просуммировать, исключая возможную зависимость от времени. Суммарный спектр аппроксимировался в соответствующих областях энергии функциями Гаусса с подложкой, описываемой экспонентой для К и арктангенсом для Cs, и результирующие параметры были использованы для оценки разрешения детектора. Для Cs и К пиков было получено разрешение, определяемое как отношение ширины пика на полу-высоте к среднему, в 9,7 % и 3,5 % соответственно, что соответствует спецификации производителя для подобного типа детектора (8 % для Cs пика).

Для оценки фона были произведены отдельные измерения при отсутствии источника на стенде (см. рис. 4.2). Далее фон вычитался из спектров источников с использованием нормализации на референсный ^{40}K пик. Нормализованный спектр для источника 3712RP и фоновый спектр показаны вместе на рисунке 4.5а, а на рисунке 4.5б показан спектр от этого же источника за вычетом фона.

Из этого рисунка видно, что кроме пиков от ^{137}Cs и ^{40}K , в диапазоне 0,5-1,8 МэВ на уровне 10^{-3} отсутствуют указания на присутствие других изо-



(a)



(б)

Рис. 4.2. Пример одно-часового спектра полученного от цезиевого источника 3712RP (а) и фонового спектра (б). Хорошо виден референсный пик ^{40}K

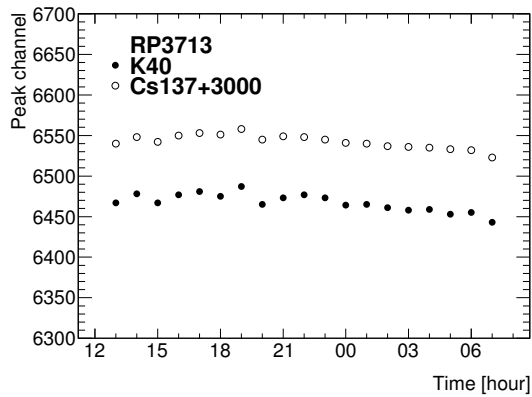


Рис. 4.3. Тренд канала фотоэлектронного пика изотопов ^{40}K и ^{137}Cs источника 3713RP. Для изображения в том же масштабе к пиковому каналу ^{137}Cs было добавлено 3000 каналов

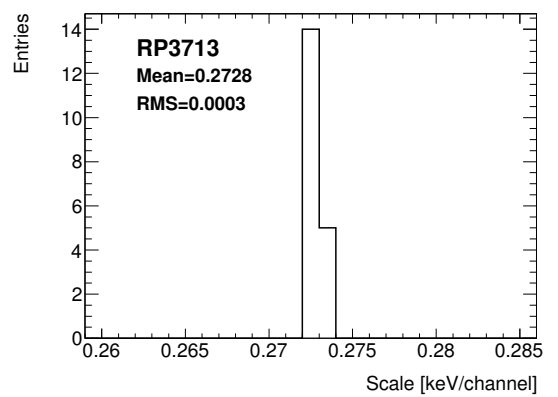
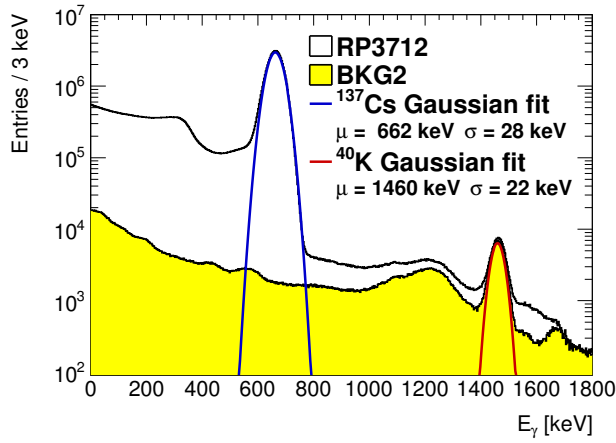


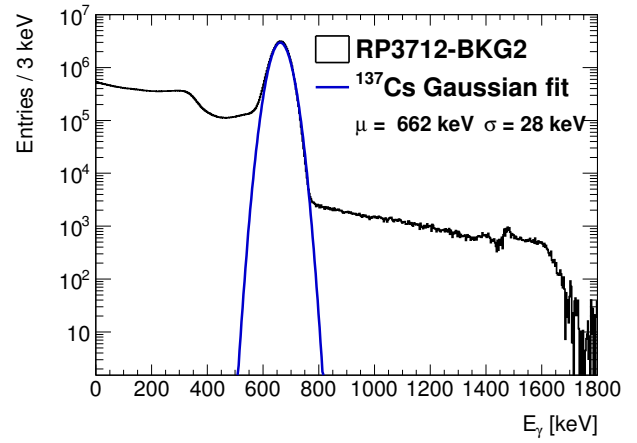
Рис. 4.4. Распределение фактора преобразования (масштабирования) кэВ/канал для источника 3713RP

топов. Относительная активность источников с помощью этих спектрометрических измерений может быть получена только на качественном уровне, в основном из-за неточного положения источника по отношению в отверстию коллиматора в свинцовом контейнере. Суммарные спектры, нормализованные по амплитуде калиевого пика, показаны на рисунке 4.6а в районе цезиевого пика для оценки относительной активности источников.

Было важно сравнить «старые» и «новые» группы источников, так как они были произведены в разное время разными изготовителями. Спектры от источников из одной группы за вычетом фона были сравнены с другой группой спектров и разница была оценена с помощью распределения значений разницы между спектрами новых и старых источников, нормализованных на максимум пика ^{137}Cs . Не было обнаружено никакой разницы между «старыми» и «новыми» источниками в диапазоне выше 700 кэВ на уровне меньше чем 0,01 % (рис. 4.6б).

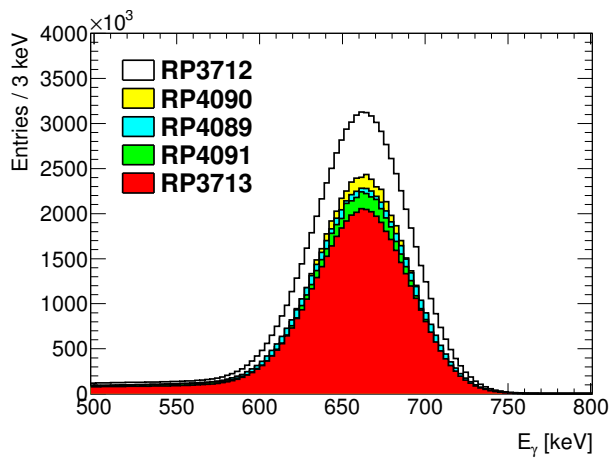


(a)

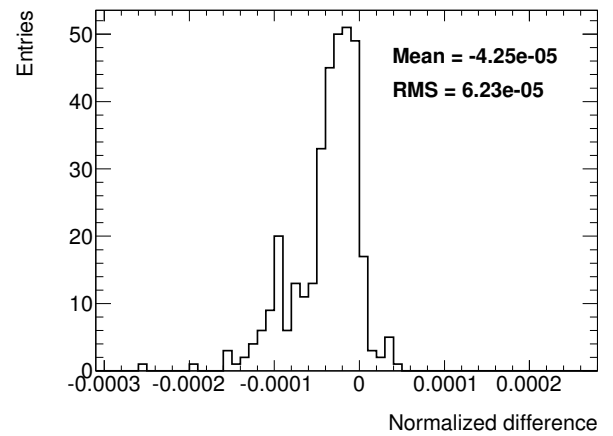


(б)

Рис. 4.5. Суммарный и фоновый спектры для ^{137}Cs источника 3712RP нормализованные на амплитуду пика ^{40}K (а) и суммарный спектр за вычетом фона (б)



(a)



(б)

Рис. 4.6. Качественное сравнение относительной активности различных ^{137}Cs источников, используемых в системе (а). Разница между спектрами новых и старых источников в диапазоне выше 700 кэВ, нормализованных по амплитуде ^{137}Cs пика (б)

4.2. Оптические характеристики нестандартных модулей

Обладая внешне симметричной цилиндрической формой, внутреннее устройство TileCal имеет небольшие, но заметные неоднородности в плоскости $r - \phi$, вызванные необходимостью вместить конструкцию поддержки криостатов электромагнитного калориметра (LAr). Наличие поддерживающих LAr элементов приводит к появлению в TileCal ячеек и модулей (рис. 4.7) с размерами и формой, отличающимся от регулярных составляющих калориметра.

В обеих боковых секциях калориметра (EVA и EVC) имеется по шесть специальных, полученных из стандартных модулей простым удалением «лишнего» объёма. Как следствие, эти 12 модулей содержат 22 нестандартных («обрезанных») ячейки (рис. 4.8), и, соответственно, нестандартные тайлы в этих ячейках. К сожалению, на пучках реальных частиц калибровались только стандартные модули и ячейки, и отклики обрезанных ячеек на реальные частицы в сравнении с откликом на цезиевый источник не проверялись. Можно ожидать, что оба процесса весьма отличается от стандартных, так что их правильная калибровка и интерпретация отклика таких ячеек на реальные частицы нуждаются в дополнительных поправках, учитывающих эти различия.

Нестандартные ячейки увеличивают неоднородность — одну из основных характеристик калориметра, составляющей которой является, в частности, неоднородность сцинтилляционных тайлов, как стандартных, так и обрезанных. Как правило, отклик ячейки определяется суммой сигналов с обеих сторон ячейки, и неоднородность сигнала по ϕ -координате в 5–8 % ухудшается, в случае чтения всего лишь с одной стороны, что приводит к увеличению систематических ошибок. Естественно ожидать, что для обрезанных тайлов, этот эффект будет еще больше, что должно быть включено в моделирование и анализ. Некоторые аспекты влияния светосбора в тайлах на неоднородность калориметра были исследованы ранее [46, 57].

Для сравнения оптических свойств обрезанных тайлов или других специ-

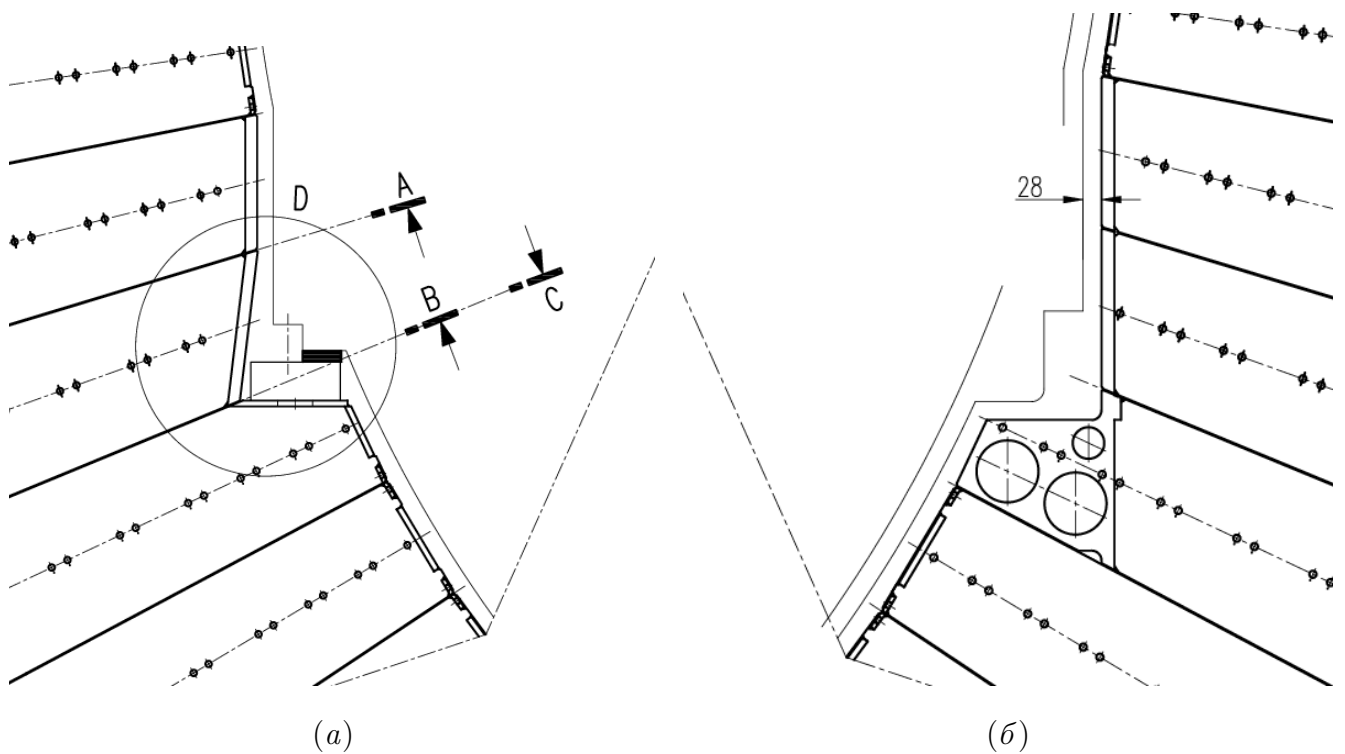


Рис. 4.7. Вид на модули TileCal EB со стороны ИТС (а) и торца (б) в месте расположения поддерживающей структуры электромагнитного калориметра (LAr). Всего есть 12 специальных («обрезанных») модулей в сумме для ЕВА и ЕВС

альных случаев со стандартными, с помощью β -источника ^{90}Sr имитировался процесс взаимодействия реальных событий и цезиевого источника с ними. Анализ различий в детальной картине отклика от нескольких образцов, позволяет расширить калибровку стандартных ячеек на пучках частиц на нестандартные, используя данные от цезиевого источника в качестве опорной точки.

4.2.1. Взаимодействие источника ^{137}Cs с калориметром

Развёртка во времени отклика от движущегося сквозь калориметр ^{137}Cs источника имеет естественную цилиндрическую симметрию, модулированную периодичностью расположения тайлов в ряду. Основными параметрами распределения являются количество энергии поглощённой в чувствительном элементе в зависимости от расстояния до источника (поперечный профиль), и изменение амплитуды отклика со временем (положением источника). Формы обоих профилей моделировались по методу Монте-Карло и были измерены эксперимен-

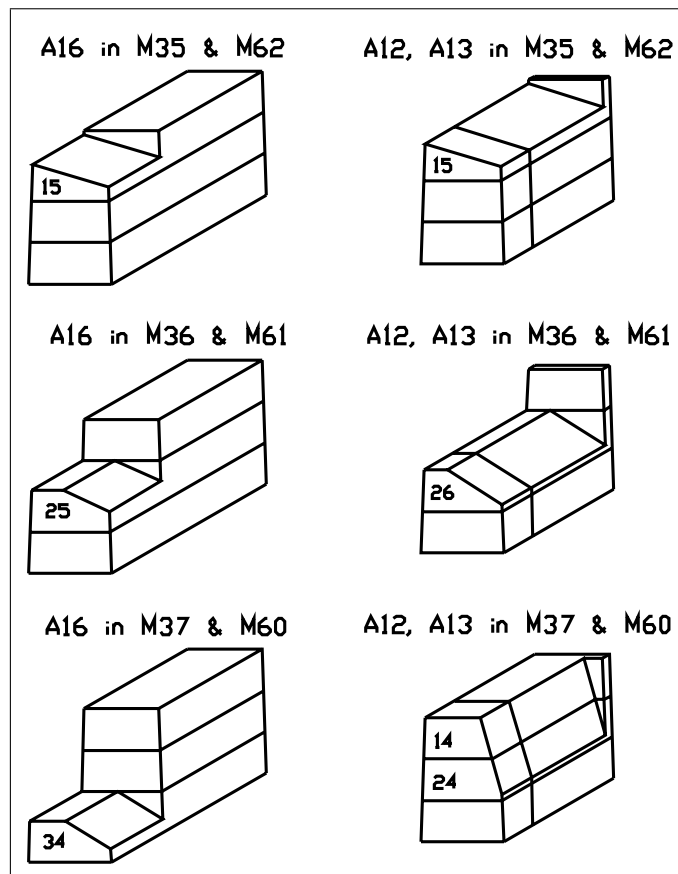
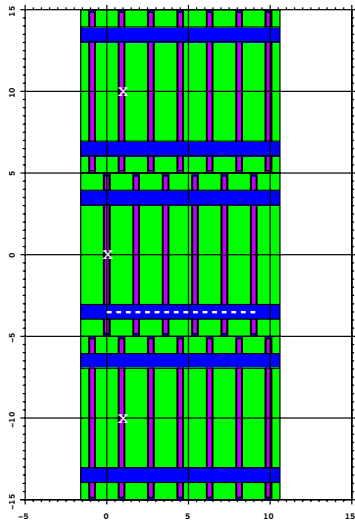


Рис. 4.8. Нестандартные (обрезанные) ячейки специальных модулей EBA и EBC

тально, а параметры были использованы в процедуре реконструкции картины взаимодействия источника с единичными тайлами и ячейками.

Моделирование было проведено с использованием упрощенной геометрии для слоев 1–3 калориметра (рис. 4.9). Оптические свойства тайлов и собирающих свет волокон не учитывались, и использовалась упрощенная прямоугольная форма тайлов. Тем не менее, полученные профили поглощенной энергии от радиуса и положения источника, достаточно близки к аналогичным распределениям, полученным экспериментальным путем.

На рисунке 4.10 показаны пространственное распределение интеграла выделенной энергии в тайлах и её зависимость от положения источника. Энергия, выходящая из текущего ряда тайлов в соседний, называется утечкой, соотносится к первому как $78/22$ и характеризуется отличием от обычного временного профиля. Распределение, показанное на рисунке 4.10, позволяет реконструировать отклик ряда тайлов в зависимости от положения источника и сравнить его



(a) Структура ячейки



(б) Модульная решетка

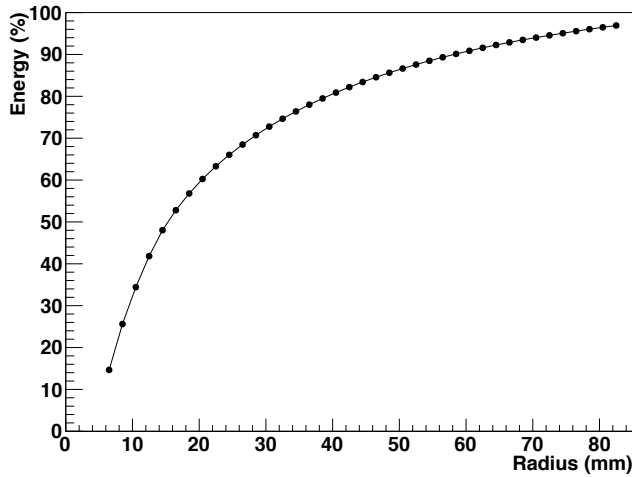
Рис. 4.9. Структура ячейки калориметра (а) использованная в моделировании методом Монте-Карло (абсорбер — зеленый, тайлы — фиолетовые, траектория движения источника — линия из точек внутри синей «трубы»). Решеточная текстура настоящего модуля (б), стальные пластины абсорбера выглядят темными, тайлы — прозрачными

с измерениями, выполненными на стенде.

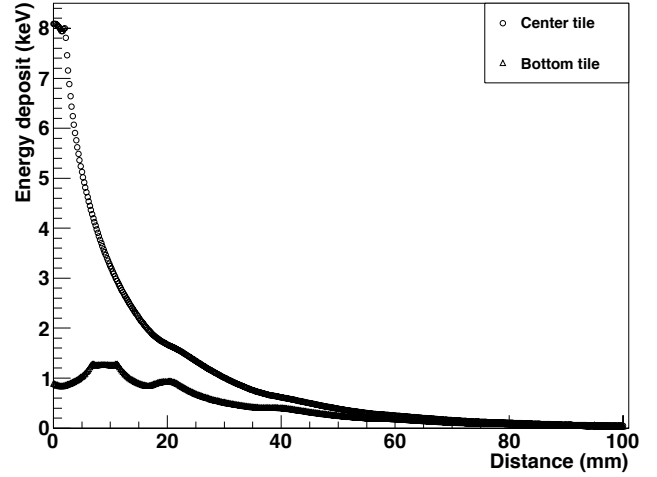
На рисунке 4.11 сравниваются изменения интенсивности энергосвечения как функции положения источника для смоделированных (а) и экспериментально полученных данных (б), для случая, когда два тайла разделены десятью периодами структуры сталь/сцинтиллятор (182 мм), ранее показанные на рис. 2.31. Сплошные кривые на рисунке 4.11б соответствуют аппроксимации Гауссианом и экспоненциальной функциям.

Наблюдается хорошее согласие Монте-Карло и экспериментальных распределений, что позволяет использовать полученные параметры для предсказания ожидаемых свойств тайлов различной формы и размера, при должном учёте имеющихся оптических особенностей.

Так, моделирование предсказывает, что 70 % энергии поглощается в круге радиусом 30 мм вокруг источника и оставшаяся часть в следующих 50 мм (см. рис. 4.10а). Это соответствует измерениям и полученному экспоненциаль-

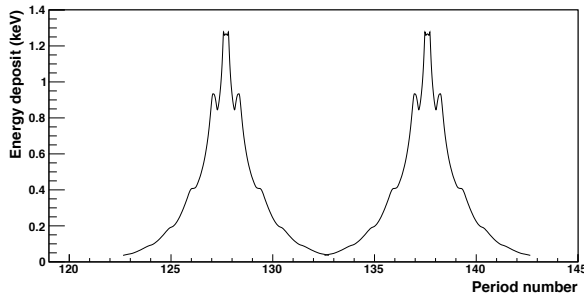


(a)

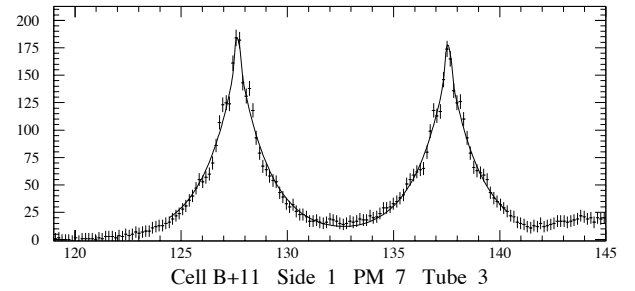


(б)

Рис. 4.10. Моделирование взаимодействия гамма-квантов источника ^{137}Cs с калориметром TileCal: (а) интеграл энергии выделенной в тайле как функция от радиуса диска вокруг траектории источника. (б) Амплитуда выделенной энергии как функция расстояния от источника до текущего и соседнего тайла — так называемая «утечка» энергии



(a)



(б)

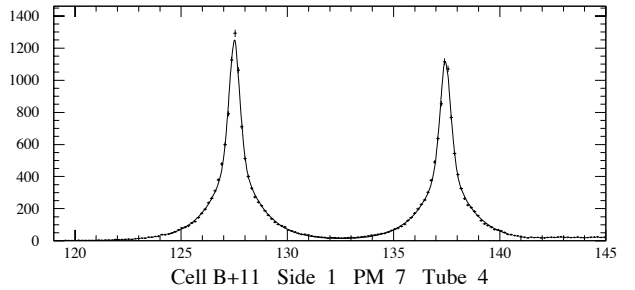
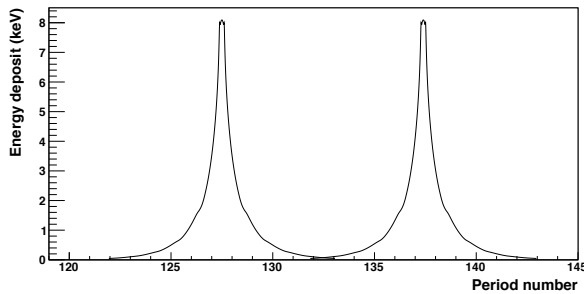


Рис. 4.11. Сравнение энерговыведения по Монте-Карло (а) и измеренных профилей отклика (б) в зависимости от положения источника внутри ячейки

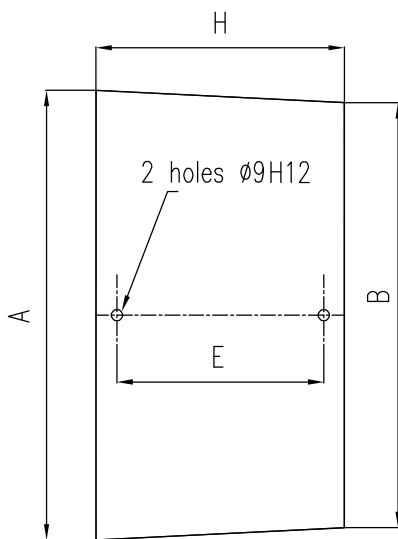
ному поведению:

$$A = e^{-R/R_0}, R_0 = 22,7 \quad (4.1)$$

Из отношения интегралов временных профилей на рисунке 4.10б следует, что $\sim 28\%$ энергии утекает из текущего ряда тайлов в соседний ряд. Экспериментально полученное отношение равно $26,1 \pm 1,2\%$.

4.2.2. Стандартные и обрезанные тайлы

Как уже было упомянуто ранее, имеется 11 типоразмеров сцинтилляционных тайлов в форме трапеции, пронумерованных от 1-го (наименьший, расположенный на внутреннем радиусе модуля калориметра) до 11-го (наибольший, на внешнем радиусе). Форма стандартных тайлов и их размеры приведены на рисунке 4.12. Обрезанные тайлы вырезаны из «маленьких» тайлов (1, 2 и 3) и существуют в виде 6-ти модификаций (рис. 4.13).



POS.	A	B	H	E	UNITARY WEIGHT IN Kg
1	228.7	219.1	97	70	0.069
2	238.5	229	97	70	0.072
3	248.3	238.8	97	70	0.075
4	261.1	248.6	127	100	0.102
5	273.9	261.4	127	100	0.107
6	286.7	274.2	127	100	0.112
7	301.4	286.9	147	120	0.136
8	316.1	301.7	147	120	0.143
9	330.9	316.4	147	120	0.150
10	349.5	331.2	187	160	0.200
11	368.2	349.8	187	160	0.212

Рис. 4.12. Чертёж стандартного тайла. Всего есть 11 тайлов одной и той же формы разных размеров. Два отверстия используются для установки калибровочных трубок и сборочных стержней, пронизывающих ряды тайлов и ячеек

Общее число обрезанных тайлов равно 352 вместе для ЕВА и ЕВС (примерно $1,5\%$ от общего количества) и они используются только в нестандартных

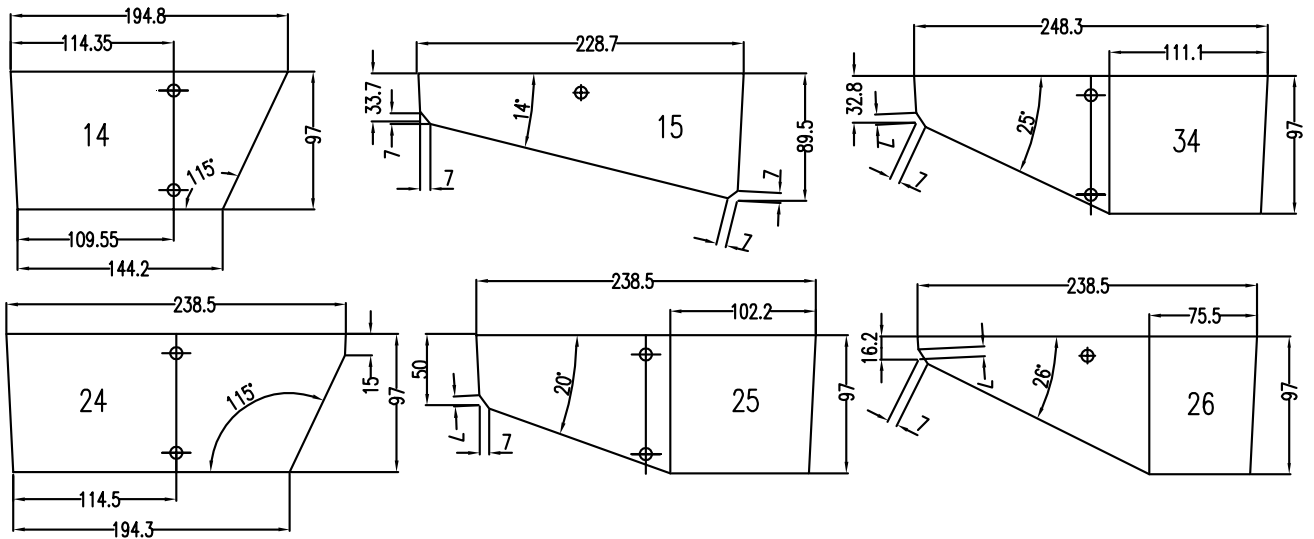


Рис. 4.13. Формы обрезанных тайлов, их размеры и индексы. Первая цифра индекса означает номер исходного тайла, вторая — тип формы. Например, «34» означает 4-ю форму отрезанную из тайла номер 3

модулях на позициях 35–37 и 60–62, формируя выделенные неоднородные участки. Название ячеек и число обрезанных тайлов в них (в скобках) в этих модулях сведены в таблицу 4.1.

Индекс тайла	Модули 35, 62	Модули 36, 61	Модули 37, 60
14			A12(9), A13(23)
15	A12(9), A13(23), A16(16)		
24			A12(9), A13(23)
25		A16(16)	
26		A12(9), A13(23)	
34			A16(16)

Таблица 4.1. Состав специальных ячеек. Число обрезанных тайлов в ячейке приведено в скобках. См. рис. 4.8 и рис. 4.13

4.2.3. Оборудование и измерения

Сканирующий стенд состоит из светонепроницаемого бокса, в котором смонтированы стронциевый источник, позиционирующая механика, оптическая система, регистрирующая и контрольная электроника. На рисунке 4.14 показано внутреннее устройство стенда. Образец тестируемого тайла (1), подлежащий сканированию, закреплен в середине измерительной зоны. Двух-координатная позиционирующая система, приводимая в движение высокоточными шаговыми двигателями (3), перемещает контейнер с коллимированным ^{90}Sr источником (2) с активностью 25 МБк. WLS волокна (4) передают свет, вызванный излучением источника, в ФЭУ (5), как от испытуемого образца, так и от двух референсных тайлов (6). В стенде используются точно такие же оптические компоненты и регистрирующая электроника, как и в самом калориметре.

Внутри и снаружи бокса установлены датчики температуры, и их показания сохраняются вместе с данными от фотоумножителя и текущими координатами положения источника. Референсные тайлы используются для точной геометрической и грубой амплитудной калибровки, и для проверки стенда на стабильность. Два шаговых двигателя семейства QMOT QSH 5718 (Trinamic) обеспечивают позиционирование пятна источника $\varnothing 2$ мм с шагом 1 мм в плоскости X-Y с точностью $\pm 0,2$ мм. Источники низкого и высокого напряжений, блок управления перемещением, система сбора данных (включая обычный ПК и соединяющие кабели), располагаются снаружи.

Управление шаговыми двигателями выполняется с помощью плат MA6420 (Scientific Pacific), которые, в свою очередь, доступны через последовательный порт RS232, и являются частью блока управления движением. Концевые выключатели, блокирующие движения моторов, ограничивают систему перемещения рамками сканирующего бокса. Анодный ток ФЭУ интегрируется и переводится в выходное напряжение, измеряемое вольтметром Keithley-2000. С помощью дополнительной платы мультиплексора SCAN-2000, вольтметр позволяет

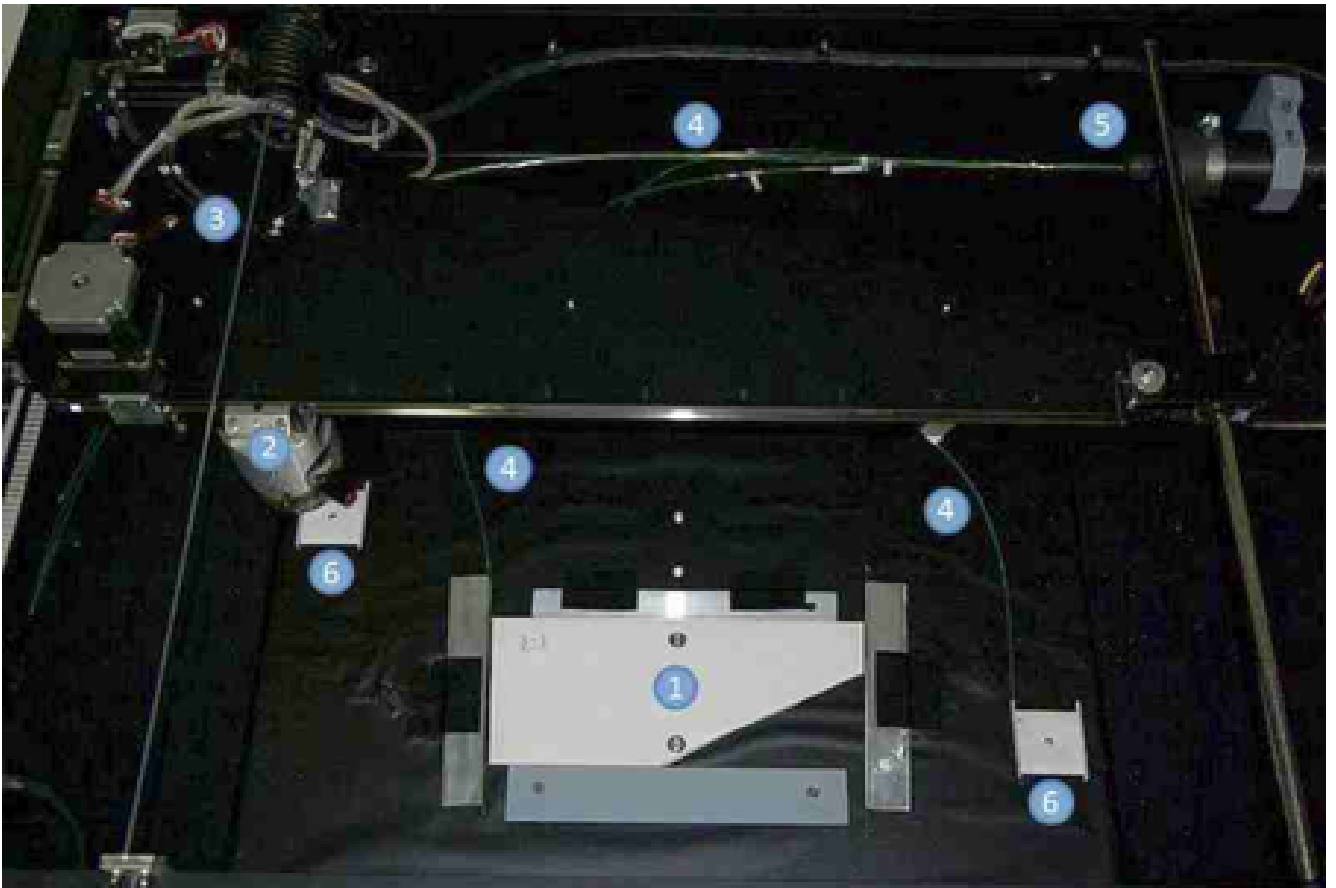


Рис. 4.14. Сканирующий стол: 1 – образец тайла; 2 – контейнер с источником ^{90}Sr ; 3 – механизм перемещения источника; 4 – спектросмещающие световоды; 5 – регистрирующий фотоумножитель; 6 – референсные тайлы

измерять еще и высокое напряжение, приложенное к фотоумножителю. Чтение в управляющий ПК осуществляется через KUSB-488A GPIB-USB интерфейс. Программное обеспечение написано на языке Python с использованием графической библиотеки tkInter, и других библиотек для обслуживания последовательного порта и интерфейса GPIB.

Для оптимизации времени измерения зона сканирования разделяется на зону измерения тайла (в зависимости от размеров образца), зону измерения пьедестала, и зоны референсных тайлов, включая необходимые отступы. Регистрируемые данные содержат время, координаты источника, величину приложенного высокого напряжения, отклик фотоумножителя и температуру внутри бокса. Во время сканирования на экран выводится двумерный график, показанный на рисунке 4.15. На нем видны зоны сканирования, уровень сигнала и

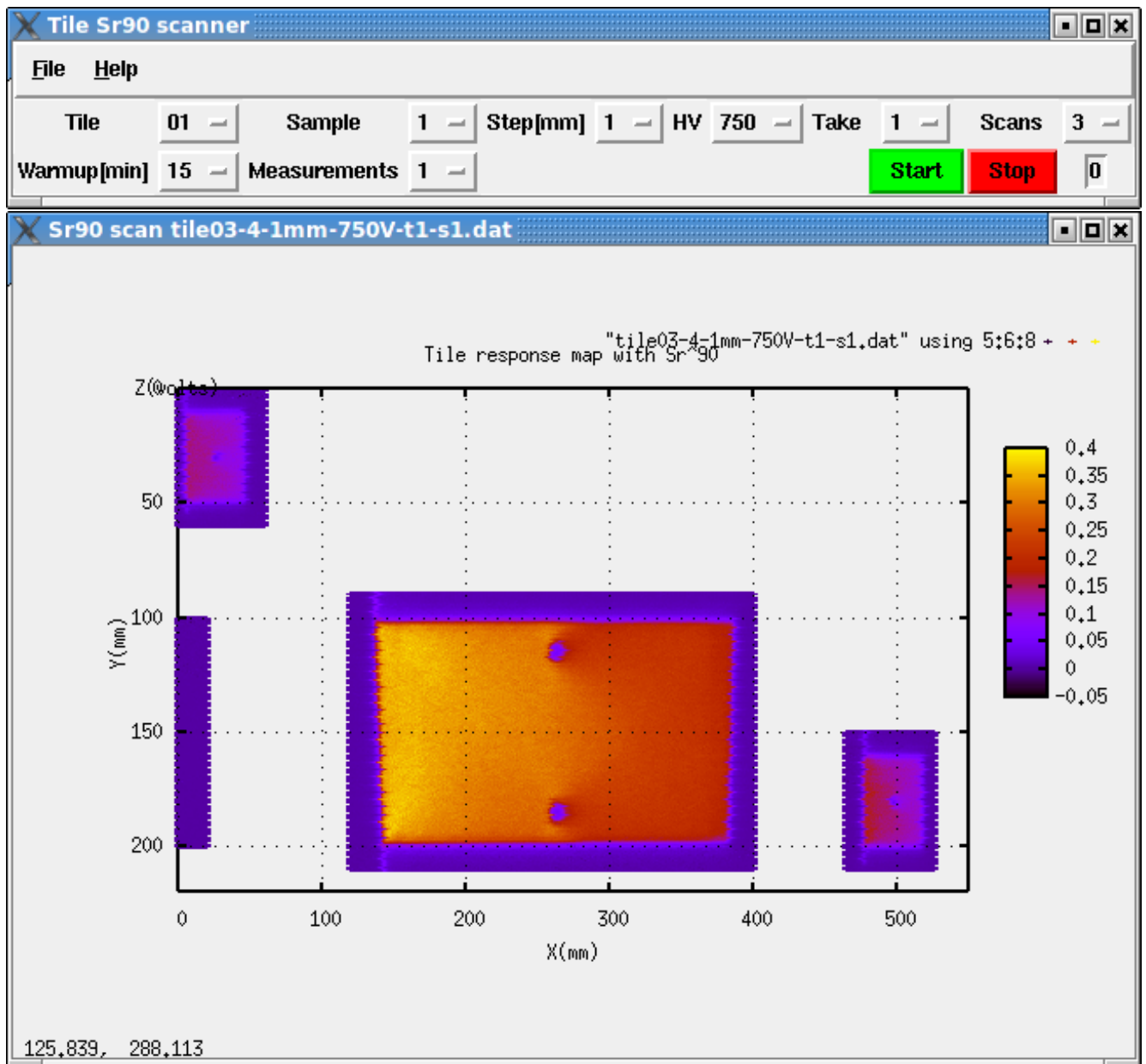


Рис. 4.15. Графический интерфейс и двумерная карта отклика. Видны несколько зон: зона пьедесталов вертикальная полоса слева, зоны референсных тайлов (слева-вверху и справа-внизу) и зона испытуемого образца. Референсные тайлы имеют конические отверстия 2–4 мм для геометрической привязки координат шаговых двигателей

координаты в системе сканирующего бокса.

Распределение пьедесталов, показанное на рисунке 4.16а, имеет ширину не более 0,5 мВ, что позволяет оценить отношение сигнал/шум как лучше чем 100 для всех точек измерения. Преобразование локальных координат (шагов двигателя) в абсолютные значения X-Y вычисляется по положению референсных тайлов, центры которых известны с точностью лучше чем 0,1 мм (рис. 4.16б).

Точность абсолютных координат и отклика фотоумножителя оцениваются как 0,2 мм и 3 % соответственно, исходя из повторяемости значений полученных в результате сканов в одних и тех же условиях.

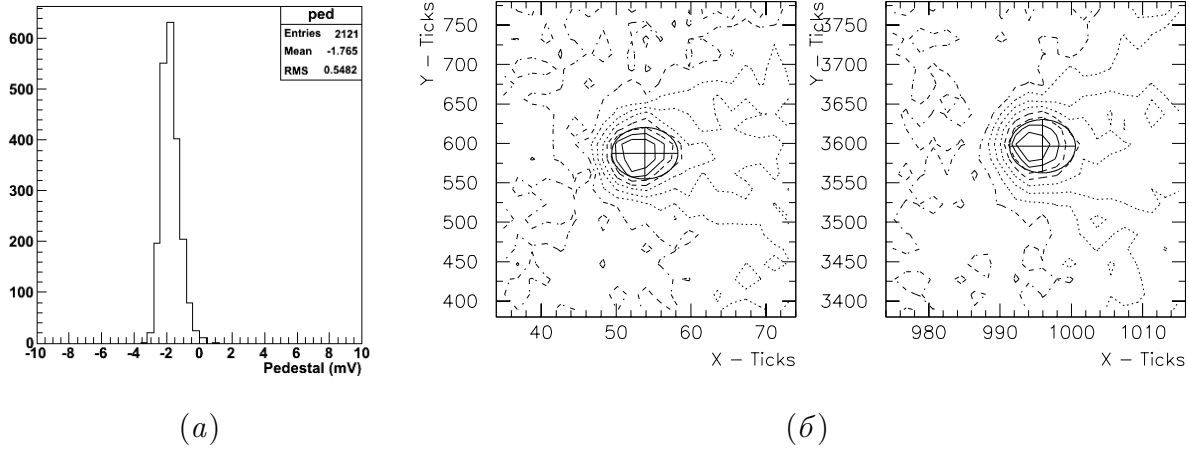


Рис. 4.16. (а) - Типичное распределение пьедестальных значений (мВ). (б) - реконструированные положения отверстий референсных тайлов в координатах X-Y («тиках»). Один «тик» соответствует шагу в 0,5 мм

Все образцы испытуемых тайлов были отсканированы по всей своей поверхности ^{90}Sr источником по X-Y координатной сетке с шагом 1x1 мм. Свет собирался с одной грани тайла, тогда как противоположная сторона соединялась с имитацией волокна и отражающего профиля. Сбор света с обеих сторон имитировался сверткой карты отклика относительно центральной оси тайла. Окончательные результаты скана для тайла усреднялись по нескольким измерениям (суб-сканам), выполненным при тех же самых условиях.

Одна часть всех стандартных тайлов, отсканированных на стенде, использовалась для изготовления обрезанных тайлов, а другая была оставлена в качестве контрольных, для слежения за стабильностью и точностью измерений. Во время всех операций измерения и манипуляций с тайлами использовались их исходные светоотражающие конверты.

4.2.4. Результаты измерений

На рисунке 4.17 в качестве примера результатов скана приведен нормализованный отклик как функция положения источника по оси X , так называемая U-форма. Три кривые, показанные на одном и том же графике, соответствуют трем разным полосам вдоль оси X шириной 25 мм для иллюстрирования зависимости световыхода от Y координаты. Такие же распределения, полученные с двойной сверткой (имитация чтения с двух граней) показаны на рисунке 4.17 внизу.

Из распределений видно, что сбор света с обеих сторон тайла дает лучшую однородность, чем односторонний съем, и что трапециевидная форма тайла приводит к систематическому превышению отклика у большого основания трапеции. В центральной части тайла заметно также локальное увеличение отклика из-за дополнительного отражения света от двух отверстий в тайле.

Количественный критерий однородности, или более точно — неоднородности, определяется как отношение RMS к среднему распределения измеренных амплитуд, которое может быть посчитано для всего тайла или его части. Это важно, когда набор калибровочных данных (например на точечных пучках) распространяется на адронные ливни, покрывающие всю поверхность тайла. На рисунке 4.18 показаны неоднородности всех образцов тайлов для одно- и двустороннего чтения, посчитанные как для всей поверхности тайла, так и для небольшой центральной части диаметром 5 см.

Показанная на рисунке 4.18 неоднородность по всему тайлу при чтении с одной стороны меняется в пределах 15–30 %. Большая односторонняя неоднородность тайлов 1–3 может быть вызвана тем фактом, что они были изготовлены из сцинтиллятора ПСМ-115, в то время как остальные были сделаны из сцинтиллятора BASF-165Н. При чтении с двух сторон неоднородность уменьшается более чем вдвое. При этом неоднородность посчитанная для центральной части тайла, диаметром 5 см лучше ещё на 2–3 %. В этой центральной области

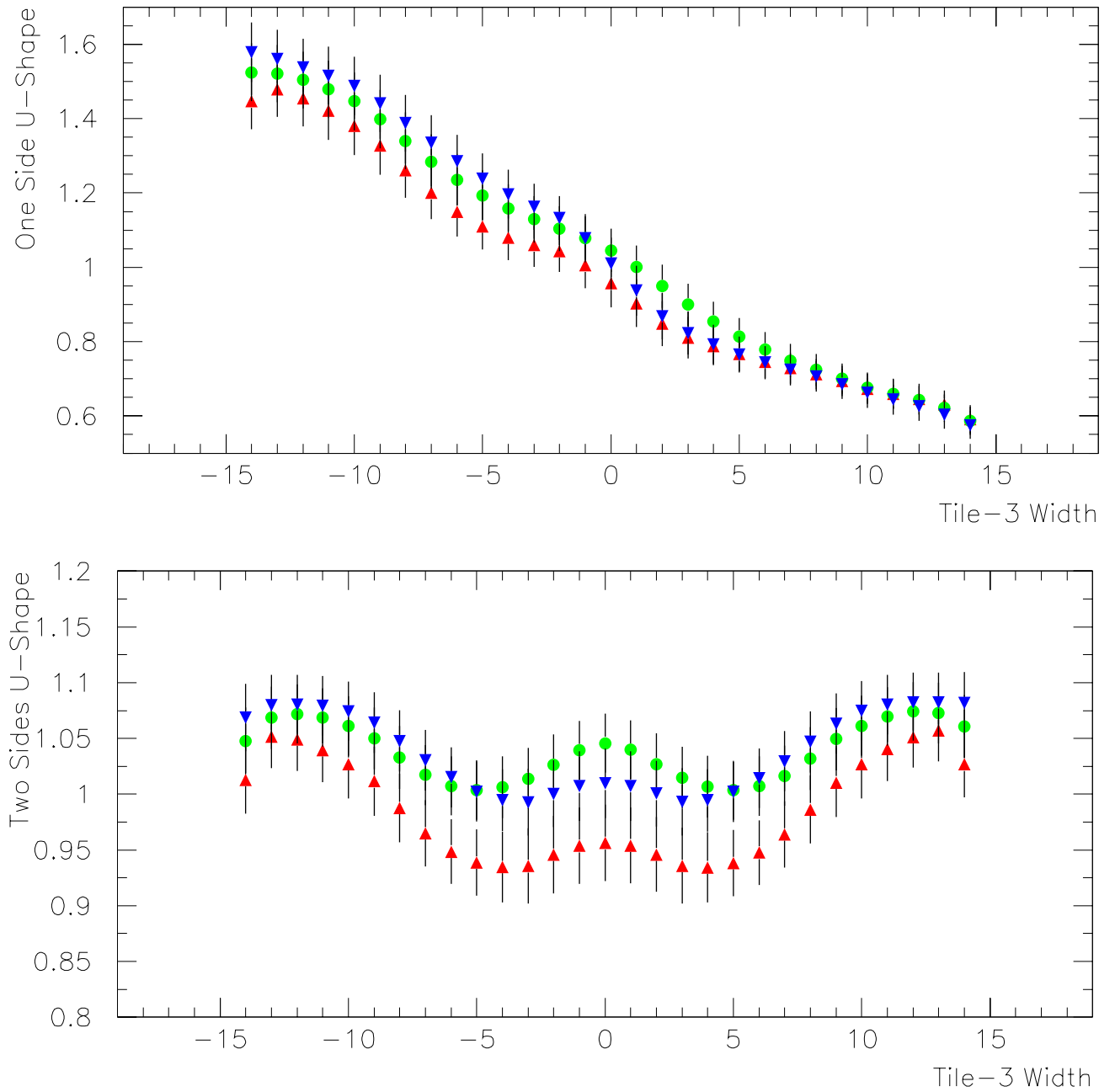


Рис. 4.17. Нормализованная зависимость световыхода тайла по оси X (U-форма) в случае сбора света с одной (вверху) или обеих (внизу) граней. Красные (вверх) треугольники соответствуют 25-ти миллиметровой полоске по оси X ближе к короткой стороне, зеленые точки — средней полоске и синие (вниз) треугольники соответствуют полоске ближе к широкой стороне тайла. В центре видно увеличение сигнала на 3–5 % из-за отражения света от отверстий в центре тайла.

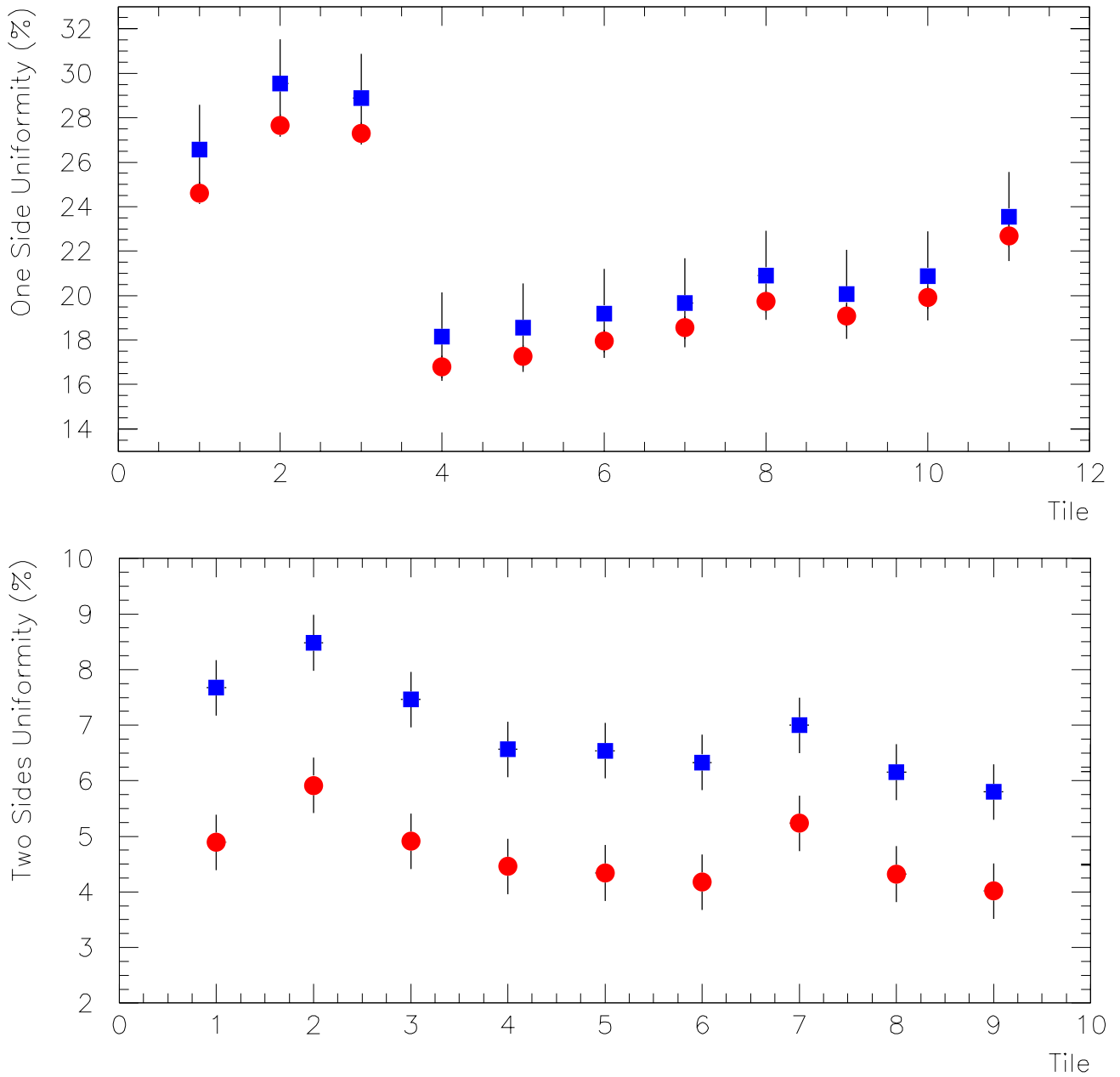


Рис. 4.18. Неоднородность тайлов, определенная как отношение RMS к среднему и вычисленное как для всей поверхности тайла (квадраты), так и для небольшой площади диаметром 5 см в центре тайла (кружки)

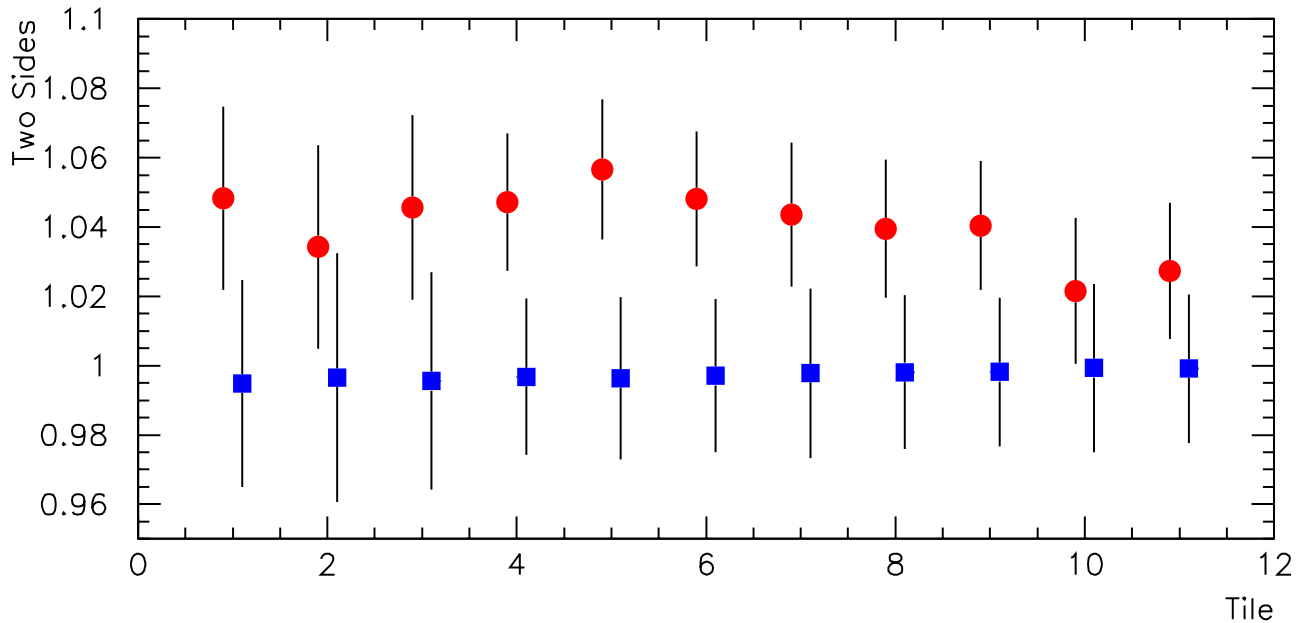


Рис. 4.19. Отношение сигнала внутри центральной части диаметром 5 см к среднему значению по всему тайлу (кружки) и то же самое отношение для остальной части тайла (квадраты)

отклики систематически выше других областей тайла. На рисунке 4.19 показаны отношения средних откликов внутри и вне центральной части к среднему отклику по всему тайлу. Это показывает, что для всех размеров тайлов отклик центральной части на 3–5 % выше, чем в среднем по тайлу, что должно быть принято во внимание при калибровке узкими пучками частиц.

При обычной калибровке цезиевый источник проходит через отверстие в широкой части тайла, но в нескольких случаях (тайл 7 в ЕВ) второе отверстие тоже используется для прохода источника, и полученные отклики отличаются из-за оптической анизотропии, возникающей из трапецеидальной формы тайла. В этом случае правильное отношение, экспериментально измеренное для некоторых тайлов, должно быть принято во внимание. Этот специальный случай также позволяет проверить согласованность измерений источником ^{90}Sr и их реконструкции, путем сравнения с экспериментально полученным значением отношения.

На рисунке 4.20 точки отклика, полученные от ^{90}Sr источника взвешены на фактор взаимодействия с ^{137}Cs для эмуляции средних откликов по тайлу, в

случае когда ^{137}Cs источник проходит через одно или другое отверстие. Используемая здесь весовая функция энергосыделения описывается уравнением 4.1, где R — это расстояние от точки измерения до центра соответствующего отверстия. На том же самом рисунке представлено отношение откликов для всех тайлов. Результаты для тайлов 1–7 (отношение $94 \pm 2 \%$) находятся в хорошем соответствии с тем фактом, что взаимодействие источника ^{137}Cs с маленькими тайлами может быть описано простой экспоненциальной зависимостью. Это позволяет использовать весовую функцию Cs, упомянутую ранее, для экстраполяции результатов измерений маленьких тайлов на обрезанные, для предсказания изменений вызванных операцией обрезания.

Набор из трех стандартных типоразмеров (1, 2, 3) тайлов по 4 образца каждого был просканирован ^{90}Sr источником до и после обрезания. Первые 3 образца каждого типоразмера подвергались обрезке, 4-й образец оставался контрольным — стабильность и повторяемость процедуры сканирования оставалась в пределах 2 %. По завершении первого раунда сканов 3 из 4-х образцов каждого размера были вынуты из светоотражающих конвертов, обрезаны до требуемых форм, и помещены обратно в свои конверты, а весь набор был снова просканирован. Из-за большой асимметричности обрезанных тайлов, каждая из двух светособирающих граней была измерена по отдельности. Сравнение полученных откликов использовалось для оценки эффекта обрезания на отклик и однородность. Пример результатов измерения для стандартного тайла номер 3 приведен на рисунке 4.21, до, и после того, как тайл номер 3 был обрезан и стал тайлом номер 34.

Средний отклик обрезанного тайла может быть вычислен «как есть», или с использованием весовой функции цезиевого источника (см. формулу 4.1), которая описывает пространственное распределение выделенной энергии. Хорошее согласие результатов от этих двух подходов позволяет использовать цезиевые калибровочные данные для ячеек сделанных из обрезанных тайлов.

В таблице 4.2 приводятся отношения откликов обрезанных тайлов к исход-

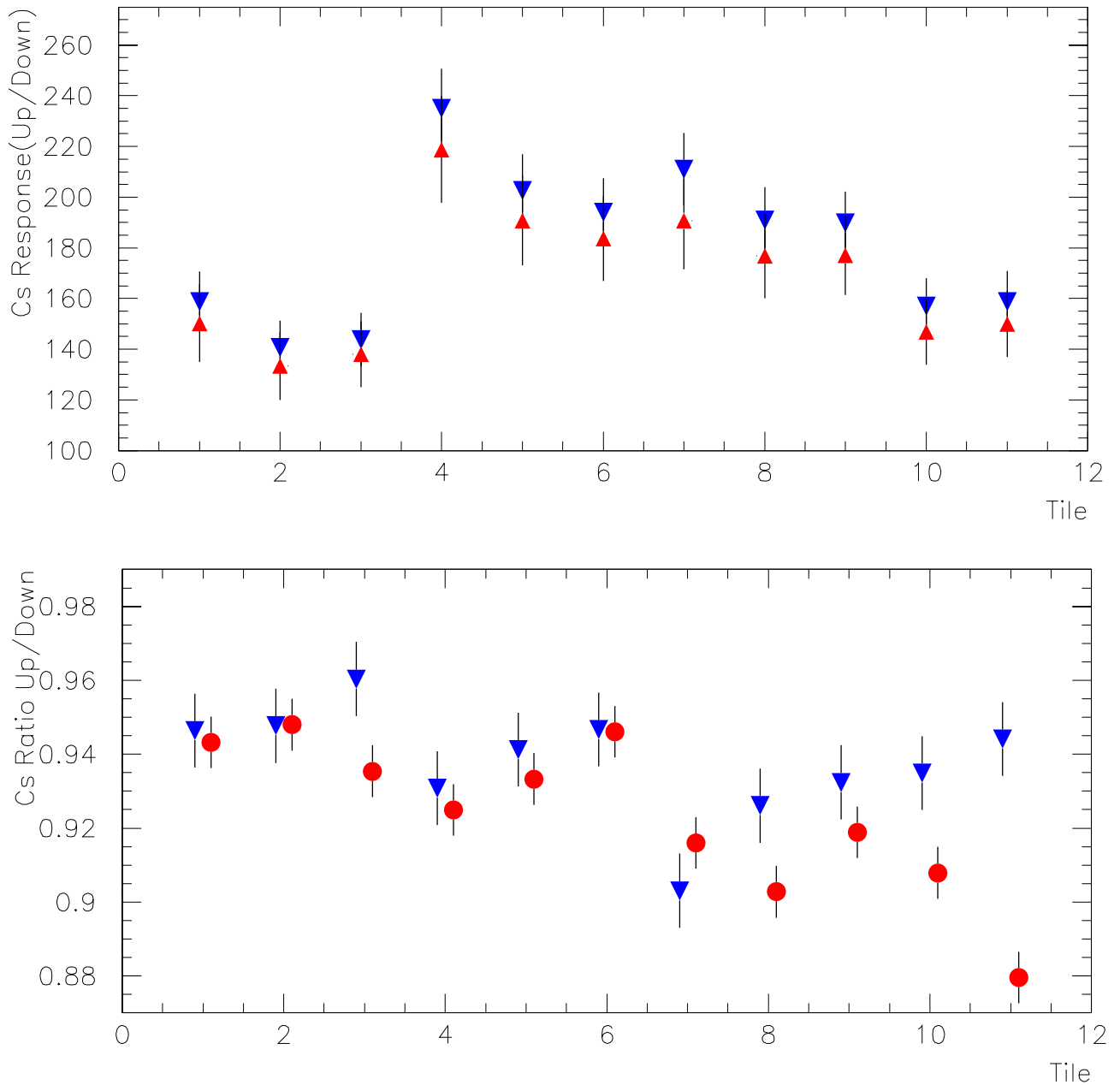


Рис. 4.20. Вверху: ожидаемые средние отклики тайла в случае прохождения Cs источника через отверстие внешнего радиуса (синие треугольники) или внутреннего радиуса (красные треугольники). Внизу: отношение откликов (синие треугольники) полученное из данных Sr источника с использованием цезиевой весовой функции и экспериментальные данные, полученные с помощью цезиевого источника на стенде (красные кружки)

ным (A/A_0), в предположении что вся поверхность тайла учитывается равномерно (Sr) или с использованием специальной весовой функции (Cs).

Полученные отношения могут быть использованы во время вычисления цезиевых калибровочных коэффициентов для обрезанных ячеек во время эква-

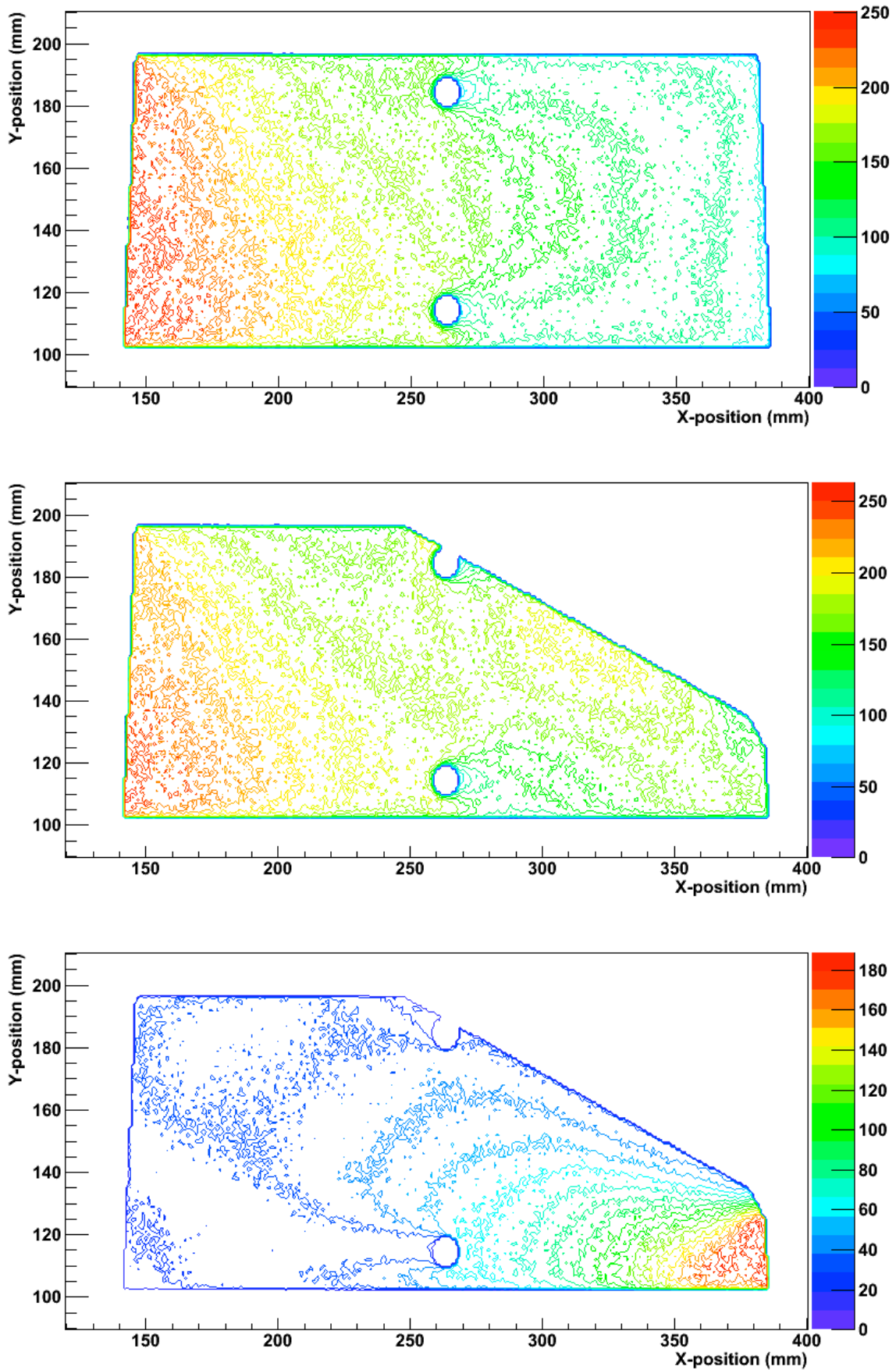


Рис. 4.21. Вверху: двумерная карта отклика стандартного тайла номер 3 в плоскости XY при чтении с одной (левой) грани. Та же самая карта отклика после обрезания тайла при чтении с левой (в середине) грани и обрезанной (внизу)

Индекс	Исходная сторона A/A0 (MC)	Обрезанная A/A0 (MC)	Обе стороны (A1+A2)/2A0
14 (Sr)	1,41 ± 0,02 (1,41)		
14 (Cs)	1,37 ± 0,03 (1,39)		
15 (Sr)	1,29 ± 0,03 (1,29)	0,45 ± 0,01 (0,45)	0,87 ± 0,03
15 (Cs)	1,39 ± 0,06 (1,18)	0,43 ± 0,01 (0,41)	0,91 ± 0,03
24 (Sr)	1,23 ± 0,13 (1,15)	0,21 ± 0,03 (0,20)	0,74 ± 0,07
24 (Cs)	1,20 ± 0,13 (1,06)	0,23 ± 0,02 (0,20)	0,71 ± 0,07
25 (Sr)	1,33 ± 0,02 (1,15)	0,56 ± 0,03 (0,49)	0,94 ± 0,01
25 (Cs)	1,33 ± 0,02 (1,07)	0,47 ± 0,01 (0,51)	0,91 ± 0,01
26 (Sr)	1,40 ± 0,02 (1,40)	0,17 ± 0,01 (0,17)	0,78 ± 0,01
26 (Cs)	1,49 ± 0,02 (1,35)	0,15 ± 0,01 (0,17)	0,82 ± 0,01
34 (Sr)	1,24 ± 0,04 (1,24)	0,32 ± 0,01 (0,33)	0,78 ± 0,03
34 (Cs)	1,24 ± 0,04 (1,16)	0,27 ± 0,01 (0,34)	0,76 ± 0,03

Таблица 4.2. Измеренные отношения откликов обрезанных тайлов (A) к исходным (A0). В скобках приведены смоделированные значения (MC). См. рис. 4.13 для геометрии обрезанных тайлов

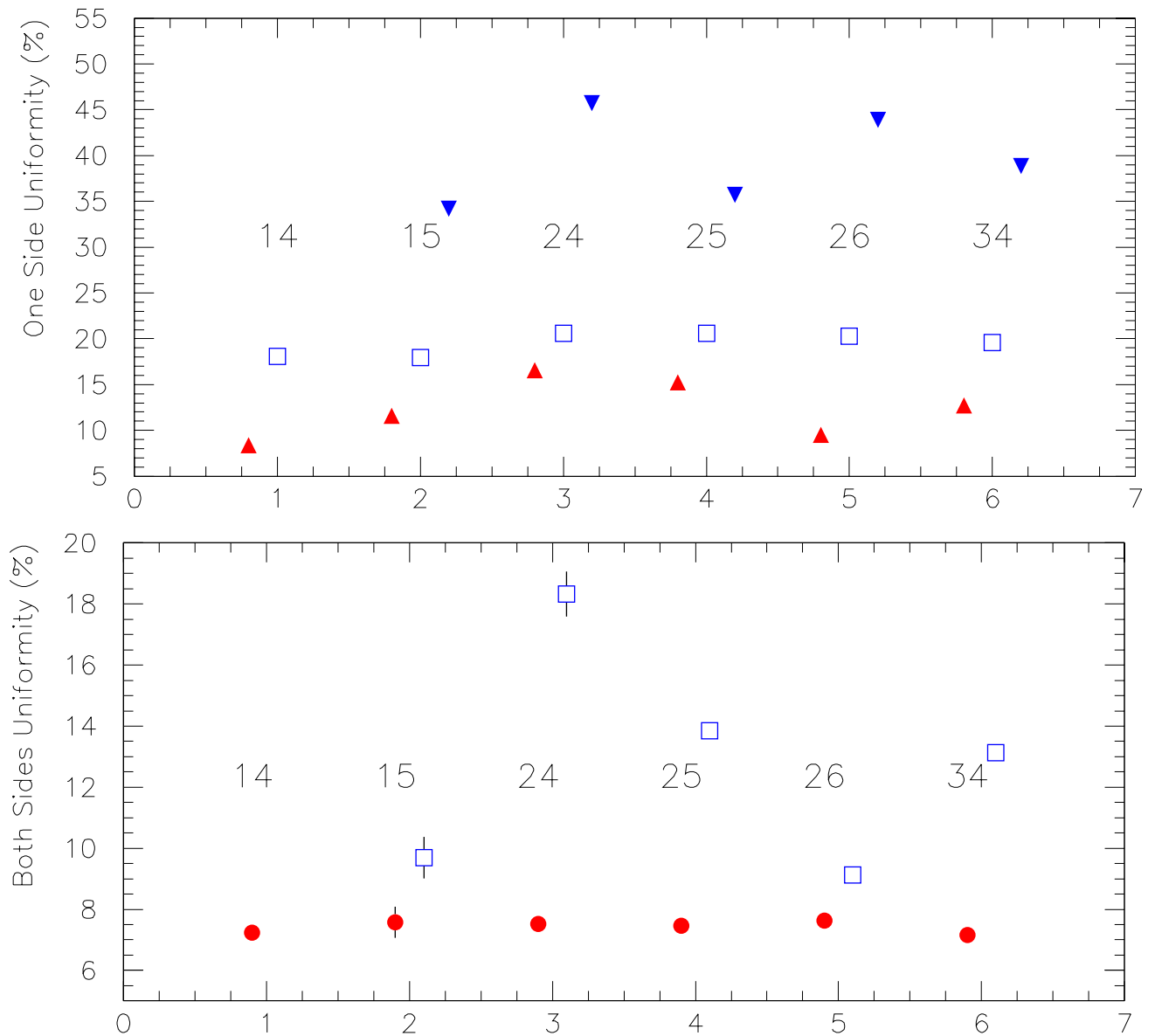


Рис. 4.22. Вверху: неоднородность отклика для 6-ти типов обрезанных тайлов: необрезанная сторона (красные треугольники вверх) и обрезанная сторона (синие треугольники вниз). Квадраты — исходный тайл перед операцией обрезания. Внизу: неоднородность для тех же самых 6-ти типов обрезанных тайлов при чтении с обеих граней: квадратики — весь тайл, кружки — центральная область диаметром 5 см

лизации калориметра. На рисунке 4.22 показаны неоднородности обрезанных тайлов для случаев чтения с одной или с двух граней вместе с исходной (для необрезанного тайла) неоднородностью.

После операции обрезания однородность тайла при чтении с одной стороны сильно изменяется. При чтении с длинной стороны однородность остается неизменной, тогда как короткая сторона показывает гораздо худший результат.

В то же время чтение с обеих сторон несколько поправляет итоговую однородность. Принимая во внимание разницу в масштабе, чтение обрезанных тайлов с двух сторон обладает примерно в 2 раза большей неоднородностью по сравнению с необрезанным тайлом по всей поверхности тайла (10–18 % вместо 6–8 %). При этом ухудшение неоднородности в центральной части тайла присутствует на гораздо меньшем уровне.

4.3. Измерение характеристик сцинтилляционных счетчиков

Для измерения взаимодействия в нечувствительном материале в пространстве между криостатом электромагнитного калориметра и адронным калориметром используются сцинтилляционные счетчики, обозначаемые как ячейки E3/E4 и считываемые регистрирующей электроникой адронного калориметра. На рисунке 4.23 показан боковой цилиндр калориметра вместе с установленными счетчиками и их чертеж.

Поскольку сквозь эти счетчики не проходят калибровочные трубки цезиевой системы, их нельзя откалибровать тем же способом, что и остальные ячейки калориметра. В первом сеансе набора статистики 16 из 128 счетчиков не были установлены для возможности прокладки световодов от триггерных сцинтилляционных счетчиков (MBTS).

Для второго сеанса набора статистики недостающие счетчики были установлены. Ввиду сильной радиационной нагрузки в местах расположения этих счетчиков, для изучения новых перспективных радиационно-стойких сцинтилляторов несколько счетчиков были оборудованы сцинтиллятором Vicron и Eljen.

Для изучения оптических свойств новых сцинтилляторов и сравнения их со старыми, были проведены измерения на стронциевом стенде (рис. 4.24). По результатам сканов не было обнаружено значительного отличия между неоднородностью облученных и не облученных пластин сцинтиллятора (7 %). Новый

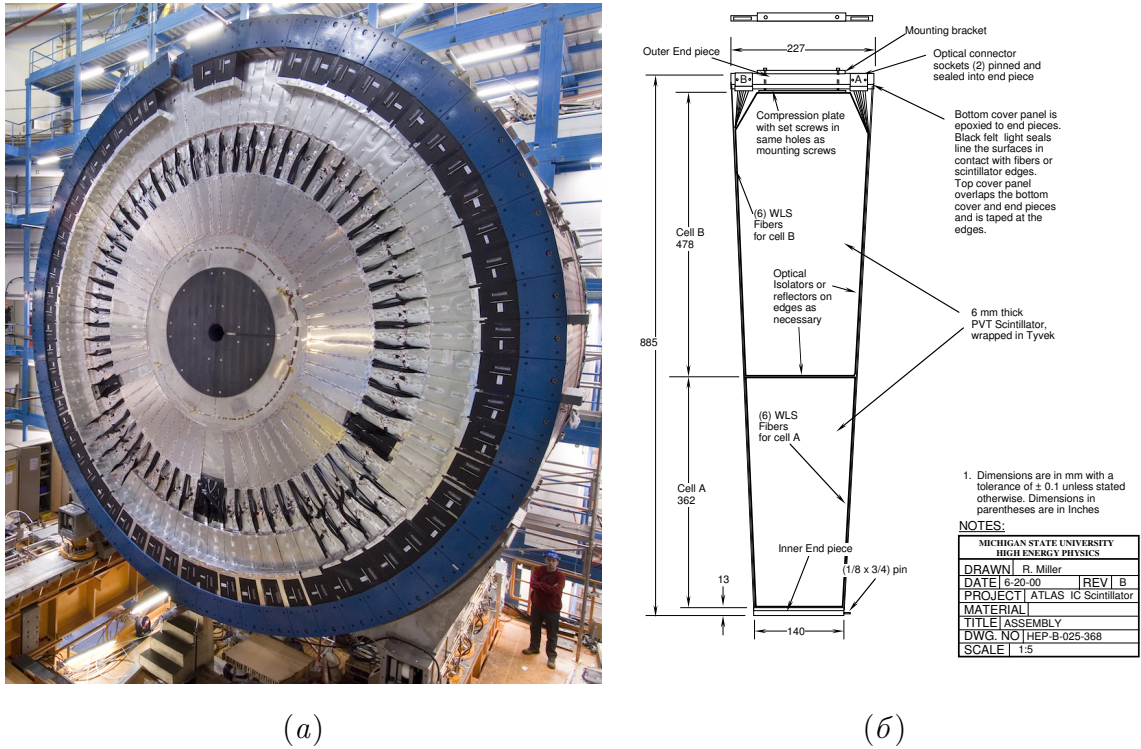


Рис. 4.23. Сцинтиляционные счетчики TileCal: Вид секции калориметра со стороны сцинтиляционных счетчиков (а). Чертеж сцинтиляционного счетчика E3/E4 (б)

сцинтилятор от E1jen показал сигнал на 50 % больший по амплитуде и на 50 % меньшей неоднородности.

Для предварительной относительной калибровки сцинтиляционных счетчиков они были просканированы с помощью тестовой цезиевой системы. Испытуемый счетчик прикреплялся на боковую поверхность модуля калориметра и считывался фотоумножителями, расположенными в этом модуле (рис. 4.25а). При прохождении источника по калибровочным трубкам внутри модуля ослабленный, но достаточно большой поток гамма-квантов попадал на счетчик. Были просканированы все счетчики, подлежащие установке для второго сеанса, что позволило осуществить контроль их качества (рис. 4.25б).

Кроме сцинтиляционных счетчиков, расположенных между криостатом и адронным калориметром, фотоумножители адронного калориметра считывают сигнал с триггерных сцинтиляционных счетчиков, использующихся для выработки триггера на минимальное взаимодействие (MBTS) [58]. Сцинтиляцион-

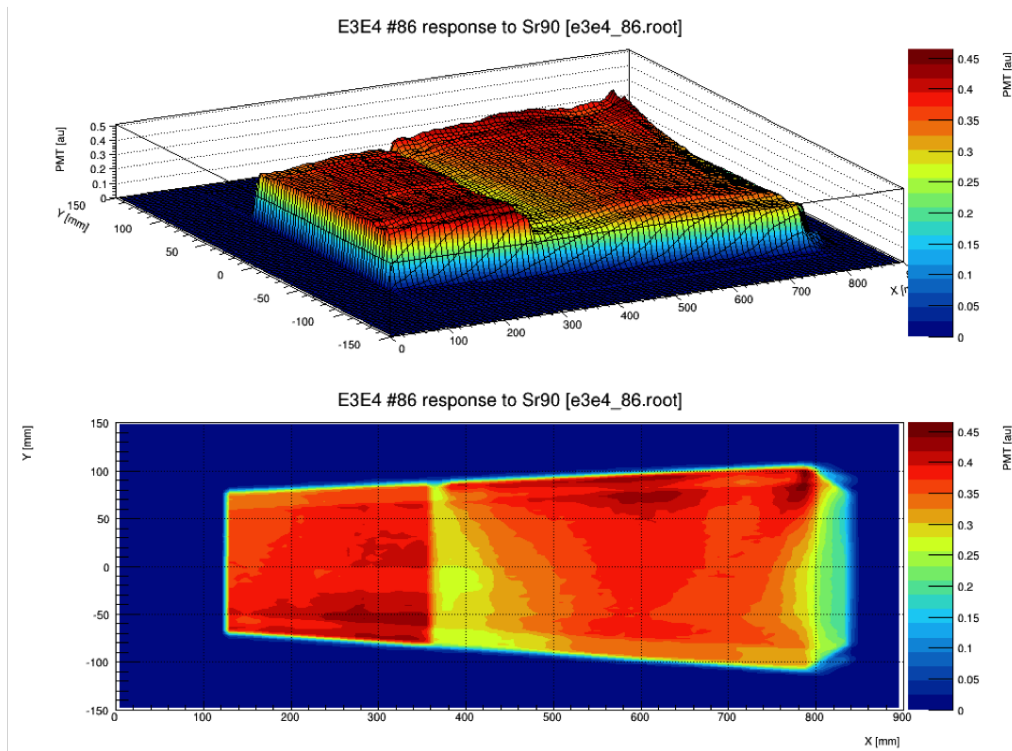
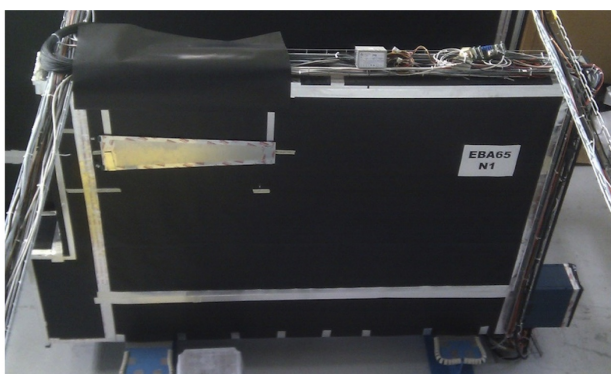
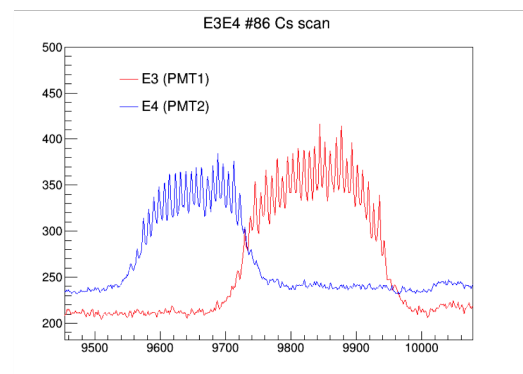


Рис. 4.24. Двумерная карта отклика одного из сцинтилляционных счетчиков E3/E4 на ^{90}Sr источник



(a)



(б)

Рис. 4.25. Сертификация сцинтилляционных счетчиков E3/E4 на ^{137}Cs стенде: Модуль калориметра с закрепленным счетчиком (а). Отклик счетчика во времени на проходящий вдоль него ^{137}Cs источник (б)

ные пластины этих счетчиков были заменены в связи с сильным ослаблением сигнала вследствие радиационного повреждения. Кроме того, для улучшения световыхода и однородности сигнала была изменена схема светосбора. Образцы сцинтилляционных пластин для новых счетчиков были просканированы на стронциевом стенде. Для осуществления контроля качества и относительной калибровки счетчиков все собранные триггерные счетчики были просканированы цезиевым источником, тем же способом, как и сцинтилляционные счетчики E3/E4, упоминавшиеся ранее (рис. 4.26).

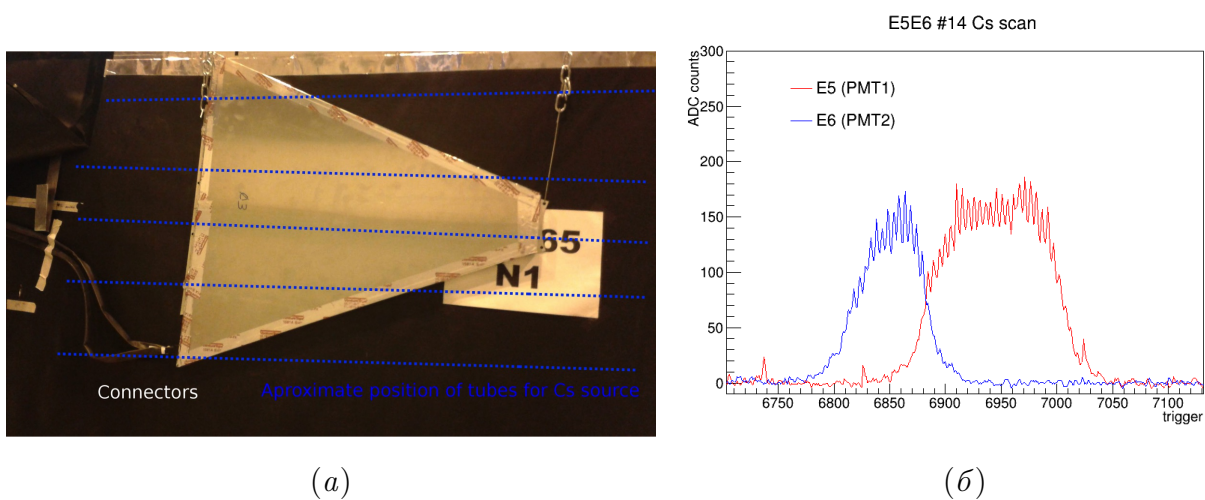


Рис. 4.26. Сертификация триггерных сцинтилляционных счетчиков MBTS на ^{137}Cs стенде: Модуль калориметра с закрепленным счетчиком (а). Отклик счетчика во времени на проходящий вдоль него ^{137}Cs источник (б)

Использование стронциевого и цезиевого стендов позволило осуществить контроль качества и провести сравнительную калибровку счетчиков перед их установкой на детекторе.

Заключение

Представленная в диссертации система калибровки и мониторинга сцинтилляционного адронного калориметра с помощью ^{137}Cs источников, перемещаемых потоком жидкости (Cs MonSys), была разработана, построена и применяется в настоящее время на установке ATLAS в CERN.

Использование прототипов системы для целей контроля оптической структуры модулей калориметра помогло достичь лучше чем 10 %-ной однородности модулей на этапе сборки и их взаимной калибровки на тестовых пучках, распространив тем самым, калибровку электромагнитной шкалы от отдельных (12 %) модулей на весь калориметр.

Достигнутая точность и долговременное слежение (мониторинг) за поведением отклика ячеек прототипов модулей калориметра в 1997–1998 годах, позволили скорректировать технологию производства фотоумножителей используемых в настоящее время калориметре. А практика 2009–2013 годов — дополнительно уточнить некоторые аспекты работы используемых ФЭУ.

Для широко разветвлённой и распределенной системы спроектировано и изготовлено соответствующее исполнительное, контрольно-измерительное и тестовое оборудование, работающее с 2006 года по настоящее время. Разработано программное обеспечение выполнения процессов подготовки и проведения калибровок, включая визуализацию, экспресс-анализ, выработаны оптимальные алгоритмы производимых операций и обработки данных.

Достигнутая точность 0,2–0,3 % для стандартных ячеек калориметра и на уровне лучше чем 2 % для отклика индивидуальных сцинтилляционных пластин (тайлов) адекватна задачам детектора в рамках всей установки.

Первое выравнивание отклика ячеек всего калориметра (эквализация) произведено с помощью системы в 2009 году с результатом лучше чем 0,5 %. Процедура эквализации может быть повторена в любой удобный момент и производится при масштабной замене или сколько-нибудь значительном ремонте

калориметра, что особенно важно при серьёзном вмешательстве в структуру регистрирующей электроники. Регулярный мониторинг стабильности работы калориметра позволяет отслеживать оптическую однородность модулей, нестабильность отдельных каналов и зависимость характеристик калориметра от используемой светимости.

Точность системы оказалась достаточной для наблюдения изменения чувствительности активного материала (органического сцинтиллятора) в присутствии сильного магнитного поля на 0,1—1,5 %, что позволило связать между собой результаты калибровок сделанных при активной и отключенной магнитной системе установки.

Данные, полученные цезиевой калибровочной системой, согласуются с другими используемыми в установке калибровочными системами, такими как лазерная и регистрация фоновых токов от столкновений, и, дополняя их, позволяют выделить и проанализировать изменения в сцинтилляторе из общей картины поведения калориметра.

В процессе проектирования и создания системы были произведены дополнительные исследования и получены вспомогательные результаты, такие как, например, сравнение стандартных и нестандартных («обрезанных») ячеек калориметра, мониторинга и взаимной калибровки радиоактивных источников и сертификации дополнительных (триггерных) сцинтилляционных счетчиков.

Применённые методы, технические решения и опыт создания Cs MonSys использованы также в создании аналогичной системы калибровки адронного калориметра, задействованной в эксперименте LHCb в CERN.

Список литературы

1. Wigmans R. Calorimetry: Energy measurement in particle physics. 2000. Vol. 107. P. 1–726.
2. Beer A., Bonaudi F., Bonnefoy L. et al. The Central Calorimeter of the UA2 Experiment at the CERN anti-p p Collider // *Nucl.Instrum.Meth.* 1984. Vol. A224. P. 360.
3. Bonesini M. et al. Calibration of an Electromagnetic Calorimeter for Direct Photon Physics // *Nucl.Instrum.Meth.* 1988. Vol. A270. P. 32.
4. Bamberger A., Lehmann J., Schäcke D., Wülker M. Calibration of the ZEUS calorimeter // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment.* 1989. Vol. 277, no. 1. P. 46 – 55. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0168900289905342>.
5. Behrens U., Gloth G., Kammerlocher H. et al. Quality control and calibration of the ZEUS forward and rear calorimeters with Co-60 sources // *Nucl.Instrum.Meth.* 1992. Vol. A323. P. 611–625.
6. Bohnet I., Feller R.-P., Krumnack N. et al. Long-term studies of the optical components in the ZEUS calorimeter using a moving ^{60}Co source // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment.* 2009. Vol. 599, no. 1. P. 53 – 59. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900208015817>.
7. Hahn S. et al. Calibration Systems for the CDF Central Electromagnetic Calorimeter // *Nucl.Instrum.Meth.* 1988. Vol. A267. P. 351.
8. Barnes V., Laasanen A. Calibration of a scintillating fiber calorimeter prototype using a moving radioactive source. 1990.
9. Barnes V., Laasanen A. Calibration of scintillating calorimeters using a moving radioactive source. 1990.

10. Barnes V., Laasanen A., Ross J. Calibration of scintillating tile calorimeters using a moving radioactive source. 1991.
11. Barnes V., Laasanen A., Pompos A., Wilson M. Calibration of the CDF tile-fiber endplug calorimeters using moving radioactive sources. Vol. 450. 1998. P. 420–427.
12. Hearty C. Recommended Isotopes for Calorimeter Source Calibration: Tech. rep.: 1992.
13. Green D. Source calibrations and SDC calorimeter requirements: Tech. rep.: Fermilab, 1992.
14. Barnes V. Construction, calibration and characterization of an SDC hadron calorimeter wedge using a moving radioactive source. 1994.
15. Button-Shafer J. et al. Use of radioactive photon sources with the BABAR electromagnetic calorimeters: Tech. rep.: 1996.
16. Bauer J. M. Absolute energy calibration with the neutron activated liquid source system at BABAR's CsI(Tl) calorimeter // [IEEE Trans.Nucl.Sci.](#) 2004. Vol. 51. P. 1596. [arXiv:physics/physics/0312128](#).
17. Hazen E., Lawlor C., Rohlf J. et al. Radioactive source calibration technique for the CMS hadron calorimeter // [Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment](#). 2003. Vol. 511, no. 3. P. 311 – 327. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900203019715>.
18. Abdullin S., Abramov V., Acharya B. et al. Design, performance, and calibration of CMS hadron-barrel calorimeter wedges // [The European Physical Journal C](#). 2008. Vol. 55, no 1. P. 159–171. URL: <http://dx.doi.org/10.1140/epjc/s10052-008-0573-y>.
19. Akchurin N., Gavrilov V., Krokhotin A. et al. Calibrating the forward calorimeter of the CMS detector using a ^{60}Co radioactive source // [Instruments and Experimental Techniques](#). 2007. Vol. 50, no 6. P. 744–749. URL: <http://dx.doi.org/10.1134/S002044120706005X>.

20. Evans L., Bryant P. LHC Machine // [JINST](#). 2008. Vol. 3. P. S08001.
21. Zimmermann F., Oide K. The Circular Road to a Higgs Factory and Beyond // [PoS](#). 2013. Vol. EPS-HEP2013. P. 554.
22. Aad G. et al. The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider // [JINST](#). 2008. Vol. 3. P. S08003.
23. ATLAS magnet system: Technical design report. 1997.
24. ten Kate H. The ATLAS superconducting magnet system at the Large Hadron Collider // [Physica C: Superconductivity](#). 2008. Vol. 468, no. 15-20. P. 2137 – 2142.
25. ATLAS tile calorimeter: Technical design report. 1996.
26. Abdallah J. et al. Design, construction and installation of the ATLAS hadronic barrel scintillator-tile calorimeter. 2008.
27. Aad G. et al. Readiness of the ATLAS Tile Calorimeter for LHC collisions // [Eur.Phys.J](#). 2010. Vol. C70. P. 1193–1236. [arXiv:physics.ins-det/1007.5423](#).
28. Carvalho J. Calibration and monitoring of the ATLAS tile calorimeter // [AIP Conf.Proc](#). 2006. Vol. 867. P. 385–392.
29. Febbraro R. Calibration and signal reconstruction in the ATLAS tile hadronic calorimeter // [Nucl.Phys.Proc.Suppl](#). 2011. Vol. 215. P. 341–343.
30. Boumediene D. Calibration and monitoring systems of the ATLAS tile hadron calorimeter // [Nucl.Instrum.Meth](#). 2013. Vol. A718. P. 66–68.
31. Anderson K., Gupta A., Merritt F. et al. Design of the front-end analog electronics for the ATLAS tile calorimeter // [Nucl.Instrum.Meth](#). 2005. Vol. A551. P. 469–476.
32. Viret S. LASER monitoring system for the ATLAS tile calorimeter // [Nucl.Instrum.Meth](#). 2010. Vol. A617. P. 120–122.
33. Clément C., Nordkvist B., Solovyanov O., Vivarelli I. Time Calibration of the ATLAS Hadronic Tile Calorimeter using the Laser System. 2008.
34. Solovyanov O. The ATLAS tile calorimeter: Commissioning and preparation for collisions // [J.Phys.Conf.Ser](#). 2009. Vol. 160. P. 012053.

35. González Parra G. Integrator based readout in Tile Calorimeter of the ATLAS experiment. // [Phys. Procedia](#). 2012. Vol. 37. P. 266–270.
36. Blanchot G., Bosman M., Cavalli-Sforza M. et al. Cell Intercalibration and Response Uniformity Studies Using a Movable Cs137 Source in the TILECAL 1994 Prototype: Tech. Rep. ATL-TILECAL-94-044. ATL-L-PN-44. Geneva: CERN, 1994. — Dec.
37. Starchenko E. et al. Cesium monitoring system for ATLAS Tile Hadron Calorimeter // [Nucl.Instrum.Meth](#). 2002. Vol. A494. P. 381–384.
38. Budagov Y. A., Cavalli-Sforza M., Ivaniouchenkov Y. et al. Radioactive sources for ATLAS hadron tile calorimeter calibration: Tech. Rep. JINR-E13-97-104. Dubna: Joint Inst. Nucl. Res., 1997. — Mar.
39. Karyukhin A., Kopikov S., Shalanda N. et al. A capsule detection sensors for the TiCal Cesium calibration system. 1998.
40. Shalanda N. et al. Radioactive source control and electronics for the ATLAS tile calorimeter cesium calibration system // [Nucl.Instrum.Meth](#). 2003. Vol. A508. P. 276–286.
41. Barczyk M. et al. Verification and diagnostics framework in ATLAS trigger / DAQ // eConf. 2003. Vol. C0303241. P. TUGP005. [arXiv:hep-ex/hep-ex/0305106](#).
42. Anderson K. J., Arabidze G., Blumenschein U. et al. A mobile data acquisition system // [JINST](#). 2007. Vol. 2. P. P07002.
43. Solovyanov O., Solodkov A., Starchenko E. et al. ATLAS tile calorimeter cesium calibration control and analysis software // [J.Phys.Conf.Ser](#). 2008. Vol. 119. P. 022012.
44. Kolos S. et al. [Experience with CORBA communication middleware in the ATLAS DAQ](#) // Computing in high energy physics and nuclear physics. Proceedings, Conference, CHEP'04, Interlaken, Switzerland, September 27-October 1, 2004. 2005. P. 105–110. URL: <http://doc.cern.ch/yellowrep/2005/2005-002/p105.pdf>.

45. Abdallah J., Adragna P., Alexa C. et al. The Production and Qualification of Scintillator Tiles for the ATLAS Hadronic Calorimeter: Tech. Rep. ATL-TILECAL-PUB-2007-010. ATL-COM-TILECAL-2007-026. Geneva: CERN, 2007. — Dec.
46. Abdallah J. et al. The optical instrumentation of the ATLAS tile calorimeter // [JINST](#). 2013. Vol. 8. P. P01005.
47. Dzhelyadin R. I. The LHCb hadron calorimeter // [Nucl. Instrum. Meth.](#) 2002. Vol. A494. P. 332–339.
48. Dzhelyadin R. The LHCb calorimeter detectors // [Nucl. Instrum. Meth.](#) 2007. Vol. A581. P. 384–388.
49. Guz Y. The LHCb hadron calorimeter // [J. Phys. Conf. Ser.](#) 2009. Vol. 160. P. 012054.
50. Anderson K. J., Batkova L., Cavalli-Sforza M. et al. Calibration of ATLAS Tile Calorimeter at Electromagnetic Scale: Tech. Rep. ATL-TILECAL-PUB-2009-001. ATL-COM-TILECAL-2008-016. Geneva: CERN, 2008. — Nov.
51. Adragna P., Alexa C., Anderson K. et al. Testbeam studies of production modules of the ATLAS tile calorimeter // [Nucl.Instrum.Meth.](#) 2009. Vol. A606. P. 362–394.
52. Kulchitskii Y. A., Tsiareshka P. V., Budagov Y. A. et al. Electromagnetic Cell Level Calibration for ATLAS Tile Calorimeter Modules: Tech. Rep. ATL-TILECAL-PUB-2007-001. ATL-COM-TILECAL-2006-013. CERN-ATL-TILECAL-PUB-2007-001. Geneva: CERN, 2006. — Dec.
53. Anderson K., Batkova L., Cavalli-Sforza M. et al. Calibration of ATLAS Tile Calorimeter at Electromagnetic Scale. 2008.
54. Solovyanov O. Performance of the ATLAS Tile Hadronic Calorimeter at LHC in Run 1 and planned upgrades // [Journal of Instrumentation](#). 2014. Vol. 9, no. 10. P. C10006. URL: <http://stacks.iop.org/1748-0221/9/i=10/a=C10006>.
55. Blomker D., Holm U., Klanner R., Krebs B. Plastic scintillators in magnetic

- fields // [Nucl.Instrum.Meth.](#) 1992. Vol. A311. P. 505–511.
56. Mainusch J., Corriveau F., Klanner R., Levman G. Influence of magnetic fields on the response of a uranium scintillator sampling calorimeter // [Nucl.Instrum.Meth.](#) 1992. Vol. A312. P. 451–456.
57. Errede S., Henriques A., Isaev A. et al. The Effect of Tile Light Collection Reduction along Radius on the ATLAS Tile Calorimeter Uniformity: Tech. Rep. ATL-TILECAL-PUB-2009-005. ATL-COM-TILECAL-2008-014. Geneva: CERN, 2008. — Nov.
58. Sidoti A. Minimum Bias Trigger Scintillators in ATLAS Run II // [JINST.](#) 2014. Vol. 9, no. 10. P. C10020.