

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ ИМ. В.П. ДЖЕЛЕПОВА

На правах рукописи



ШАЛЮГИН
Андрей Николаевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МОДУЛЕЙ ПРИ
СОЗДАНИИ ЖИДКОАРГОНОВОГО ТОРЦЕВОГО
АДРОННОГО КАЛОРИМЕТРА УСТАНОВКИ ATLAS.

Специальность 1.3.2 - Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Дубна – 2024

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В.П. Дзелепова
Объединённого института ядерных исследований.

Научный руководитель –

Глаголев Владимир Викторович,
доктор физико-математических наук,

Официальные оппоненты –

Коржик Михаил Васильевич,
доктор физико-математических наук,
заведующий лабораторией,
Научно-исследовательское учреждение
Институт ядерных проблем Белорусского
государственного университета, Лаборатория
экспериментальной физики высоких энергий.

Хабибуллин Марат Марсович,
кандидат физико-математических наук,
ст. научный сотрудник,
Институт ядерных исследований РАН, ОФВЭ,
Лаборатория физики электрослабых взаимо-
действий.

С электронной версией диссертации можно ознакомиться на официальном сайте
Объединённого института ядерных исследований в информационно-телекоммуникационной
сети «Интернет» по адресу:

<https://dissertations.jinr.ru/ru/Councils/NuclearPhysicsCouncil/dissertations>.

С печатной версией диссертации можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке
ОИЯИ (Московская область, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д.6).

Учёный секретарь диссертационного
совета ОИЯИ по ядерной физике

ОИЯИ.03.01.2022.П

доктор физико-математических наук

Г.А. Карамышева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В Европейском Центре Ядерных Исследований (CERN) в Женеве (Швейцария) создана и с 2009 года успешно работает экспериментальная мега-установка ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS) на Большом Адронном Коллайдере (LHC). Проектные характеристики LHC, а именно: максимальная энергия протон-протонных столкновений 14 ТэВ, частота столкновений 40 МГц, максимальная множественность вторичных частиц 50, максимальная светимость $\cdot 10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$ ставят установку ATLAS на передний край фундаментальной науки с точки зрения достижений в физике частиц и внедрения новых технологий.

Одним из главных достижений установки ATLAS являлось экспериментальное обнаружение и определение массы и свойств новой элементарной частицы Хиггс-бозона. Первый раз о существовании этой частицы в Стандартной Модели заявлялось физиками-теоретиками в 1964 году для описания механизма того, как фундаментальные частицы приобретают массу. Требовалось экспериментальное подтверждение этой гипотезы. Установка ATLAS успешно справилась с поставленным вызовом.

Цель диссертационной работы – обеспечить долгосрочную надёжность составных частей установки в сильном радиационном поле. Особенную значимость для жидкоаргонового торцевого адронного калориметра (далее НЕС-калориметр), находящегося в составе установки ATLAS, приобретают следующие факторы: радиационная стойкость электроники, степень загрязнения жидкого аргона кислородом из материалов и компонентов электроники в радиационных полях.

Речь идёт о нескольких этапах этой работы.

- Протестировать следующие составные элементы НЕС-калориметра с помощью специальных радиационных тестов на этапе подготовки к серийному производству модулей:
 - конструкционные материалы и электронные компоненты на предмет загрязнения жидкого аргона кислородом;
 - переднюю детекторную электронику (GaAs-чипы) при температуре жидкого азота и систему её низковольтного питания при комнатной температуре на предмет радиационной стойкости.
- Провести высоковольтный тест на воздухе и в жидком аргоне в финальной фазе процесса серийного производства модулей НЕС-калориметра.
- Провести выборочную проверку модулей НЕС-калориметра на тестовом пучке ускорителя SPS (CERN) с целью получения разрешения на электронах и адронах.

Научная новизна работы. Создан жидкоаргоновый торцевой адронный калориметр, который в условиях максимальной светимости $10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$ предназначен для получения триггера и обеспечения прецизионных измерений энергии адронов и недостающей энергии в диапазоне энергий 5 ГэВ÷14 ТэВ с линейностью не хуже 0.5% [1], который успешно работает с 2009 г. по настоящее время.

Проведено исследование всех элементов модулей, входящих в их состав, по радиационной стойкости и загрязнению жидкого аргона кислородом в радиационных полях (γ -доза вплоть до 107 кГр и интегральный поток вплоть до $1.3 \cdot 10^{16}$ быстрых нейтронов см^{-2}) на импульсном реакторе на быстрых нейтронах ИБР-2 ЛНФ ОИЯИ при низких температурах.

Практическая значимость. Создана облучательная установка по изучению поведения конструкционных материалов и электронных компонентов жидкоаргоновых торцевых калориметров (HEC, EMES, FCAL) на предмет загрязнения жидкого аргона кислородом и определению радиационной стойкости электроники HEC-калориметра.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Создана облучательная установка на канале №3 реактора ИБР-2 ЛНФ ОИЯИ, включающая радиационно стойкую ионизационную камеру с α -источником, электронный тракт регистрации и систему сбора данных, для проведения исследований загрязнения жидкого аргона кислородом из материалов и электроники жидкоаргоновых торцевых калориметров (HEC, EMES, FCAL) в сильных радиационных полях (суммарно получены γ -доза ~ 1 МГр и поток $\sim 10^{17}$ быстрых нейтронов см^{-2}) [A3-A8, A13, A14].
2. Показана необходимость исключения печатных плат PREPREG из жидкоаргоновых калориметров из-за загрязнения жидкого аргона кислородом на уровне ~ 4 ppm при γ -дозе 96 кГр и интегральном потоке $1.0 \cdot 10^{16}$ быстрых нейтронов см^{-2} и возможность использования остальных материалов и электронных компонентов в калориметрах (HEC, EMES, FCAL) [A4, A6-A8].
3. Экспериментально получены параметры функции аппроксимации зарядовой кривой ионизации жидкого аргона от α -частиц на созданной ионизационной камере в рамках современной интерпретации «бюкс»-модели: $a=(720.6 \pm 5.6) \text{ кВ/см}$, $b=(0.083 \pm 0.004) \text{ см/кВ}$, $k=(0.48 \pm 0.01)$, которые определяют напряженность поля при насыщении ионами «бюкса» как $E_0 = a \cdot (1 - k \cdot \exp(-b \cdot E))$ [A8].
4. Определена радиационная стойкость системы контроля и управления низковольтным питанием HEC-калориметра, состоящей из следующих элементов: QL-контроллера, ELMV-интерфейса и регуляторов напряжений положительной и отрицательной

полярности, которая составляет (381 ± 52) Гр по дозе ионизирующего излучения и $(11.1 \pm 2.5) 10^{12}$ нейтронов $\text{МэВ}^{-1} \text{см}^{-2}$ по потоку неионизирующего излучения до 20 МэВ. Эти величины удовлетворяют критериям радиационной стойкости [A2].

5. Создана трековая часть установки для тестирования модулей НЕС-калориметра и проведения комбинированных тестов с модулями ЕМЕС и FCAL на базе пучковых двухкоординатных пропорциональных камер (8 плоскостей) на тестовом пучке SPS-ускорителя (CERN) [A9-A12, A15].
6. Проведена проверка 33-ти передних и задних модулей НЕС-калориметра на тестовом пучке частиц SPS-ускорителя (CERN). Получено энергетическое разрешение для электронов $\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{(21.4 \pm 0.2) (\%)}{\sqrt{E(\text{ГэВ})}} \oplus (0.3 \pm 0.2) (\%)$ и заряженных пионов с учётом утечки $\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{(62.2 \pm 1.8) (\%)}{\sqrt{E(\text{ГэВ})}} \oplus (5.2 \pm 0.2) (\%)$, которые хорошо согласуются с Монте Карло моделированием с помощью программы GCALOR [A1, A9].

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на рабочих совещаниях подразделений коллаборации ATLAS, на международных конференциях ICHEP-2007 (Como) и ICALOR-2008 (Lisbon).

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 15-ти печатных работах: из них 9 статей в рецензируемых журналах [A1–A5, A9–A12] и 2 статьи [A6, A7] в сборниках трудов конференций.

Личный вклад автора. Из всех работ, выполненных в соавторстве, в диссертацию включены положения и результаты, полученные лично автором, либо при его определяющем участии в постановке задач и разработке методов их решения.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы, словаря сокращений и приложений. Общий объём диссертации — 174 страниц, включая 87 рисунка и 21 таблицу. Список литературы содержит 135 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются цели, задачи и научная новизна работы, описывается её практическая значимость.

В первой главе даётся характеристика НЕС-калориметра в составе установки ATLAS. Калориметр обеспечивает регистрацию адронных ливней в диапазоне псевдобыстрот $1.5 < |\eta| < 3.2$. НЕС-калориметр размещается в каждом из двух торцевых жидкоаргоновых криостатов вместе с торцевым электромагнитным калориметром (ЕМЕС-калориметром) и передним калориметром (FCAL-калориметром) (рис. 1). НЕС-калориметр

располагается позади ЕМЕС-калориметра и полностью перекрывается им по псевдобыстроте η (здесь $\eta = -\ln(\tan(\theta/2))$, где θ - зенитный угол вылета частиц относительно оси пучка).

Реконструкция адронов и измерение недостающей энергии определяет требование к энергетическому разрешению $\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{50\%}{\sqrt{E(\text{ГэВ})}} \oplus 3\%$ [1]. В торцевых калориметрах установки ATLAS используется жидкий аргон в качестве активного детектирующего материала. Он выбран из-за линейности в широком диапазоне энергий и стабильности отклика во времени и, что более важно, из-за своей радиационной стойкости.

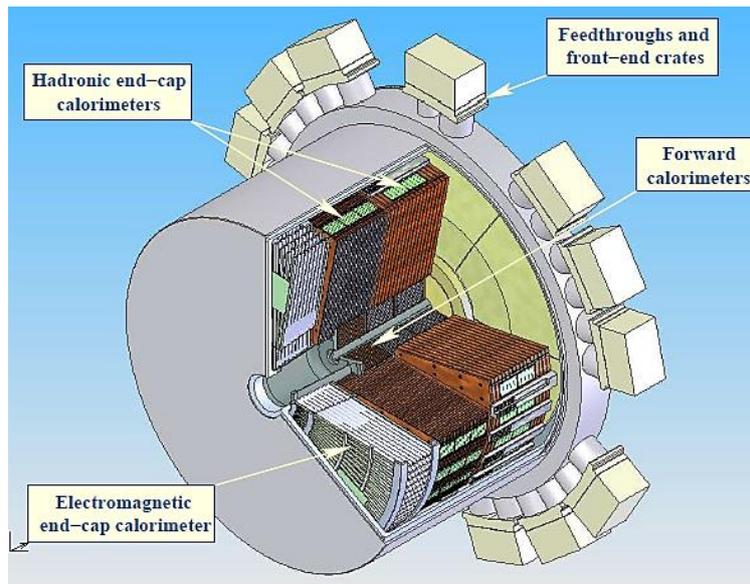


Рис.1. Торцевые жидкоаргоновые калориметры установки ATLAS в общем криостате: торцевой электромагнитный калориметр (ЕМЕС), передний калориметр (FCAL), торцевой адронный калориметр (НЕС).

Требуется приблизительно 12 длин ядерного взаимодействия (ядерных длин) $\lambda_{\text{вз}}$, чтобы полностью поглотить адроны в объёме калориметра от протон-протонных соударений с энергией 14 ТэВ в системе центра масс на LHC [2]. Суммарная толщина материала от точки соударения протонов до НЕС-калориметра (материал ЕМЕС-калориметра, внутреннего трекера и конструктива) даёт вклад около $2 \lambda_{\text{вз}}$. Требование уложиться в оставшиеся $10 \lambda_{\text{вз}}$ в поглотителе НЕС-калориметра [1] в комбинации с пространственными ограничениями ведёт к выбору меди в качестве абсорбера энергии для НЕС-калориметра.

Ещё одним требованием, предъявляемым к НЕС-калориметру, является его мозаичность. Поперечное сечение площадок считывания (РАД-ячеек) выбирается с целью реконструкции распада $W \rightarrow jet + jet$ с высоким поперечным импульсом адронных струй [1]. Размер РАД-ячеек считывания равен $\Delta\eta \cdot \Delta\phi = 0.1 \cdot 2\pi/64$ в области $|\eta| < 2.5$ и $\Delta\eta \cdot \Delta\phi = 0.2 \cdot 2\pi/32$ для больших значений псевдо-быстроты. Расположение РАД-ячеек считывания, вытравленных в медной фольге в каждом центральном электроде, формирует двухстороннюю симметрию (рис. 2). Чтобы обеспечивать хорошее соотношение сигнал-шум, особенно для мюонов, сигналы с РАД-ячеек считывания объединяются по глубине (см. рис. 2), усиливаются с

помощью GaAs-предусилителей и суммируются в жидком аргоне прежде, чем вывести сигналы через вакуумные вводы-выводы (feedthroughs) к «тёплой» электронике НЕС-калориметра, расположенной в крейтах непосредственно на криостате.

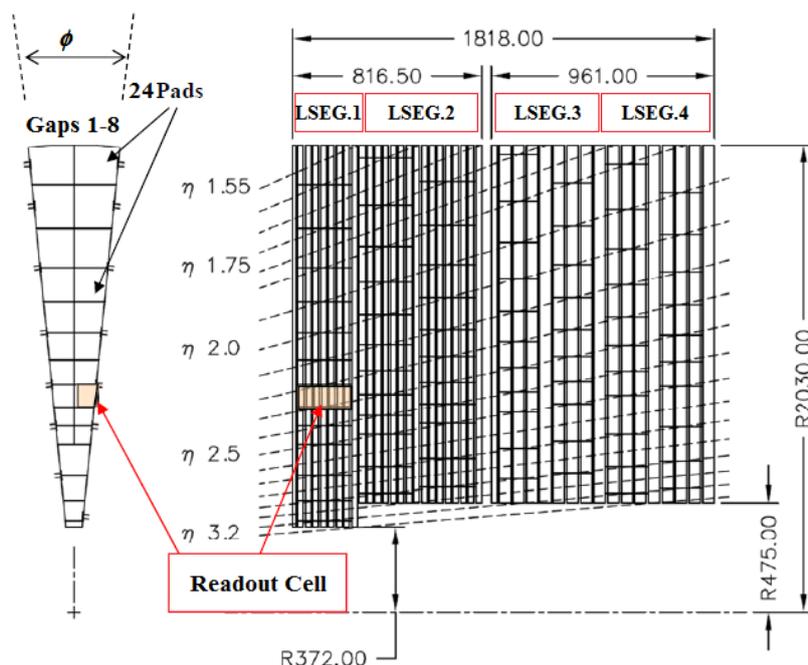


Рис. 2. Вид модулей НЕС-калориметра в системе координат r - ϕ (слева) и r - z (справа) с указанием габаритных размеров, псевдобыстрот η (справа) и структуры считывания (слева). НЕС-калориметр состоит из передней части (LSEG1, LSEG2) и задней части (LSEG3, LSEG4). Здесь LSEG – продольный сегмент (longitudinal segment) НЕС-калориметра по отношению к z -оси.

Высокая надёжность – необходимое требование к НЕС-калориметру из-за трудности доступа, когда невозможно будет совершать ремонтные работы во время эксплуатации. Поэтому для реализации принципа избыточности каждый жидкоаргоновый межплиточный зазор подразделяется на 4 детектирующих зазора (далее зазор), каждый из которых равен приблизительно 2.0 мм, с помощью трёх параллельных электродов: одного центрального и двух периферийных (рис. 3). Центральный электрод в каждом межплиточном зазоре является ROВ-электродом считывания (Read Output Board) с ячейками в форме трапециевидных площадок (PAD-ячеек), определяющими структуру считывания, как показано на рис. 2. Калориметр обеспечивается высоким напряжением через высоковольтный вакуумный ввод-вывод (feedthrough), расположенный в газовой фазе аргона поверх жидкого состояния в верхнем объёме криостата.

Система сбора и обработки физической информации с жидкоаргоновых калориметров установки ATLAS, включающая в себя примерно 190000 каналов регистрации, иерархически разделена на три уровня. На первом уровне находится передняя электроника непосредственно внутри криостатов в криогенных условиях при температуре жидкого аргона. Эта часть электроники – платы с «холодными» GaAs-чипами НЕС-калориметра и

материнские платы для усиления с суммированием сигналов с EMB-, EMEC- и FCAL-калориметров. На втором уровне – электроника снаружи криостатов в 58-ми крейтах. Эта часть детекторной электроники включает в себя модули аналогово-цифрового преобразования, модули построения логики триггерных зон типа «башня», модули драйверов передачи триггерных сигналов с NEC- и FCAL-калориметров, генераторы для калибровки каналов регистрации и платы контроллеров управления. Третий уровень – внешняя к детектору электроника, находящаяся за биологической защитой, которая состоит из накопительных и обрабатывающих электронных модулей, установленных в VME-крейтах, и модулей логической системы для выработки триггеров разных уровней установки ATLAS.

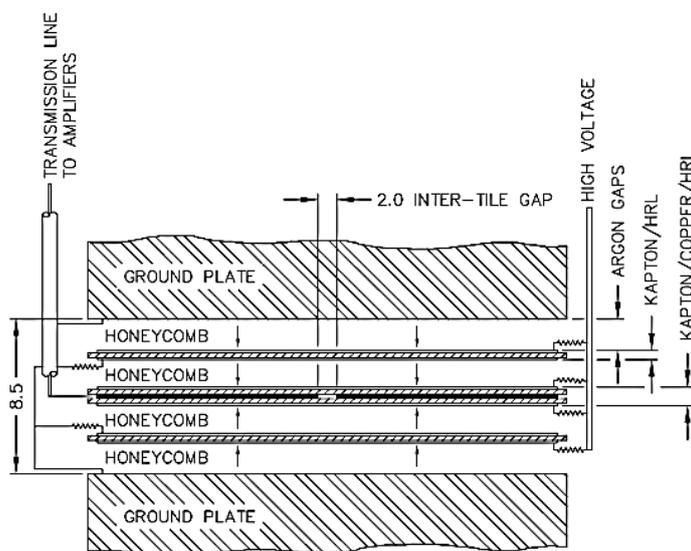


Рис. 3. Расположение электродов в межплиточном зазоре 8.50 мм. В середине находится ROB-электрод, сверху и снизу его – EST-электрод.

На самом детекторе располагается та электроника, которая не может быть отнесена на большее расстояние от него из-за жёстких требований по шумовой характеристике. Естественно, такая электроника будет функционировать в сильных радиационных полях в течение длительного периода времени, и поэтому для неё должны быть проведены тесты по радиационной стойкости [A3, A13, A14]. Другая электроника, которая может быть расположена вдали от детектора, находится в специальном помещении (USA15-cavern) вне радиационного поля. В качестве основного элемента детекторной электроники NEC-калориметра используется GaAs-предусилитель, спроектированный в Институте Физики им. Макса Планка (Мюнхен, ФРГ). Модель MPI-BB96B GaAs-чипа представляет собой ASIC-микросхему, которая была создана по 1 мкм технологии фирмы TriQuint с размерами кристалла 4.3 мм². Спроектированная микросхема состоит из восьми усилителей тока и двух сумматоров-драйверов. Такая конфигурация выбрана для обеспечения гибкости использования её при проектировании плат PSB (Preamplifier Summating Board), на которых необходимо суммировать до 8 каналов в сегменте LSEG2.

Во второй главе детализируется конструкция модуля НЕС-калориметра с пояснениями технологических моментов при его производстве [A1]. Модуль НЕС-калориметра (рис. 4) включает в себя следующие компоненты: плиты медного поглотителя, зазороформирующие прокладочные коврики из Honeycomb-материала (картон, пропитанный арамидной смолой и похожий на пчелиные соты с тонкими перегородками), ROV- и EST-электроды из полиимида разной структуры, стягивающие шпильки, корректирующие размер зазора спейсеры, балки несущей конструкции (по внутреннему и внешнему радиусу модуля), высоковольтные и сигнальные коаксиальные кабели с полиимидной изоляцией, платы передней детекторной электроники и калибровки.

Медные плиты поглотителя (замедлителя энергии частиц) в количестве 25 (17) штук, которыми комплектуют каждый модуль НЕС1(НЕС2)-калориметра, производятся в двух исполнениях с различными размерами по радиусу. Материалом плит толщиной 25 мм является холоднокатаная медь четвертной твёрдости, в то время как материалом плит толщиной 50 мм является медь горячего проката. Допуск по толщине плиты равен ± 0.050 мм. Плиты внутри модуля держатся вместе с помощью 7-ми стягивающих шпилек. Кольцевидные спейсеры на шпильках поддерживают межплиточный зазор в размере 8.50мм.

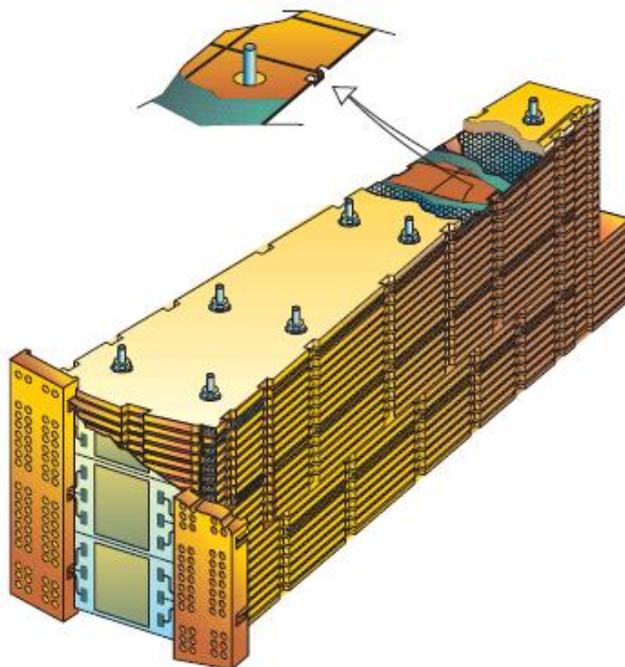


Рис. 4. Внешний вид переднего модуля НЕС-калориметра.

Прокладочные коврики из Honeycomb-материала формируют размер зазоров между ROV- и EST-электродами, а также между EST-электродами и медными плитами поглотителя и в то же самое время позволяют держать стабильное электростатическое поле (рабочее напряжение 1800 Вольт) внутри этих зазоров. Проектная номинальная толщина межэлектродного коврика из Honeycomb-материала равна 1.816 мм с производственным допуском ± 0.203 мм. Среднеквадратичное отклонения (rms) веса выборки Honeycomb-

материала равно 6.4%. Этот разброс приводит к изменению количества жидкого аргона в зазоре, который ведёт к оценочному отклонению суммарного сигнала в «башне» в 0.21%.

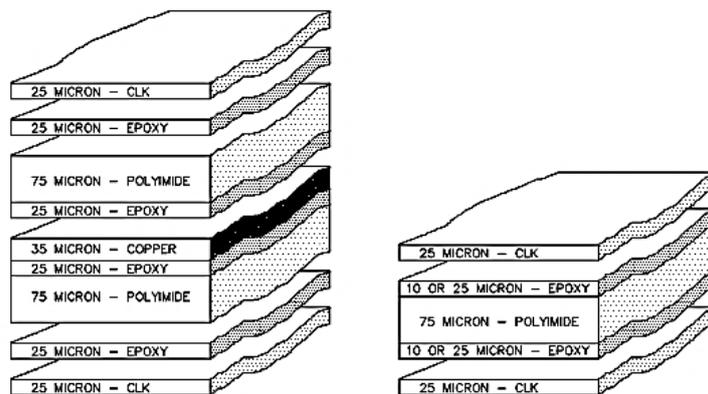


Рис. 5. Сечение ROB-электродов (слева) и EST-электродов (справа) по слоям, входящим в состав электродов.

ROB- и EST-электроды сделаны из 4-х исходных компонентов: так называемой полиимидной плёнки (POLYIMIDE – это термостойкий поликонденсационный полимер на основе ароматических тетракарбоновых кислот и ароматических диаминов), прослойки эпоксидного клея (EPOXY), рулонной медной фольги (COPPER) и полиимидной плёнки, наполненной углеродом (CLK). На рис. 5 демонстрируется внутренняя структура ROB- и EST- электродов, используемых при сборке модуля, вместе с составом материалов и порядком его соединения. В ROB-электроде реализуется структура считывания модуля. В центральном слое ROB-электрода из медной фольги толщиной 35 мкм вытравливаются дорожки, образующие ячейки в виде медных площадок. Всего используется семь различных семейств шаблонов, что позволяет ограничивать издержки производства ROB-электродов.

Третья глава посвящена облучательной установке на канале №3 реактора на быстрых нейтронах ИБР-2 ЛНФ ОИЯИ, которая предназначена для проведения радиационных исследований (рис. 6) [A3-A8, A13, A14].

Для измерений энергетического спектра быстрых нейтронов на канале №3 реактора ИБР-2 используется стандартный метод активации пороговых детекторов с последующим восстановлением исходного энергетического распределения нейтронов. Для этого измеряется выход следующих пороговых реакций: $In^{115}(n,n')In^{115m}$, $Ni^{58}(n,p)Co^{58}$, $Fe^{54}(n,p)Mn^{54}$, $Ti^{46}(n,p)Sc^{46}$, $Ti^{47}(n,p)Sc^{47}$, $Ti^{48}(n,p)Sc^{48}$, $Al^{27}(n,\alpha)Na^{24}$, который позволяет построить спектр быстрых нейтронов, начиная с 0.4 МэВ [3].

Энергетический спектр нейтронов реактора ИБР-2 в период во время радиационных исследований возможного загрязнения жидкого аргона кислородом представлен на рис. 7. Неопределённость в вычисляемых потоках нейтронов оценивается на уровне в 10÷15% в зависимости от расположения образца относительно оси пучка.

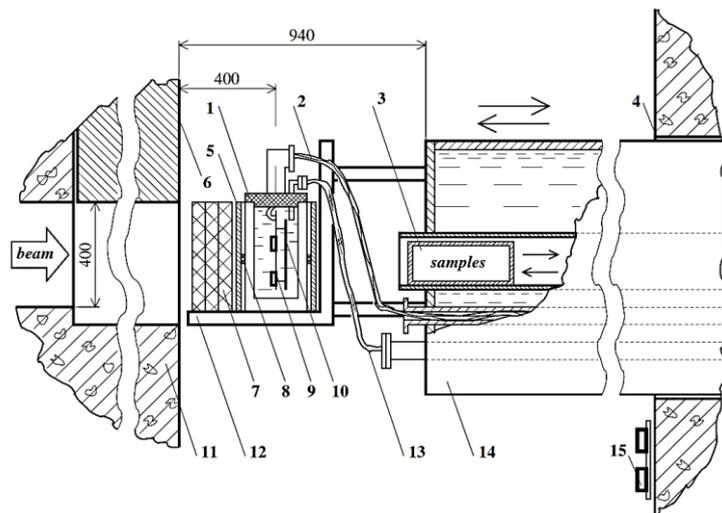


Рис. 6. Схема установки для радиационных исследований на канале №3 ИБР-2 ЛНФ ОИЯИ: 1 – криостат; 2 – сигнальные кабели; 3 – труба с транспортёром, используемая для параллельного облучения различных образцов; 4 – край биологической (второго слоя) защиты реактора; 5 – слой карбида бора (B_4C); 6 – задвижка (шибер) реактора; 7 – пучковый фильтр; 8 – дозиметр нейтронов и γ -квантов; 9 – материнская плата с чипами; 10 – фольга никеля (Ni); 11 – первый слой защиты реактора; 12 – рамка поддержки; 13 – линии криогеники; 14 – подвижная платформа с биозащитой; 15 – положение электроники для облучения низкими дозами.

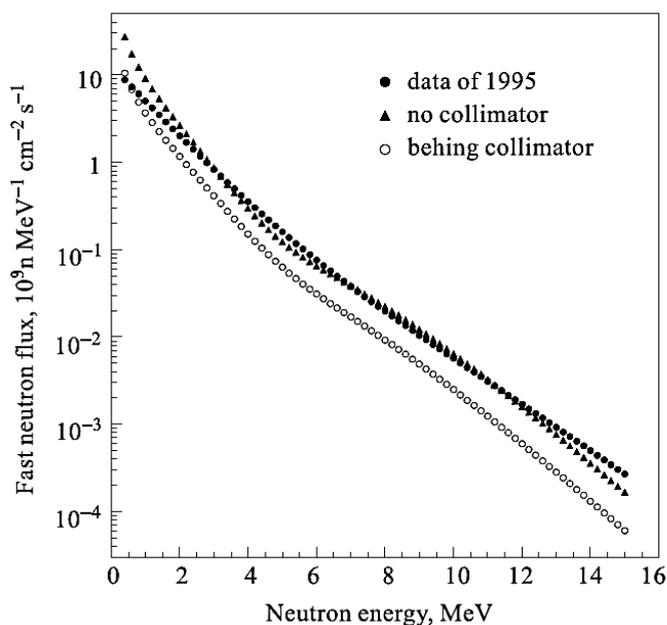


Рис. 7. Спектр быстрых нейтронов реактора ИБР-2, измеренный перед коллиматором и позади него на поверхности криостата (для сравнения измерения 1995г).

Для измерения мощности дозы от γ -составляющей в смешанном поле гамма-нейтронного излучения реактора ИБР-2 используются термолюминесцентные детекторы (TLD) TLD-700 компании Harshaw, а также широко используемые в CERN'е радиофотолюминесцентные (RPL) и фотолюминесцентные аланиновые дозиметры (PAD). Они позволяют измерять интегральные дозы до 10^6 Гр. Полученные измерения γ -излучения на установке представлены в таблице 1.

Таблица 1. Мощность поглощенной дозы γ -излучения(Гр/ч) со свинцовым фильтром.

	Перед криостатом	Внутри криостата	За криостатом
D_{γ_TLD}		48±8	
D_{total_PAD}	1164±16		435±3
D_{total_RPL}	759±60		195±27

Облучательная установка, включающая радиационно стойкую ионизационную камеру с α -источником, электронный тракт регистрации и систему сбора данных, проработала в 11 циклах измерений в сильных радиационных полях и получила суммарно γ -дозу ~ 1 МГр и поток $\sim 10^{17}$ быстрых нейтронов $см^{-2}$.

Четвёртая глава посвящена изучению ионизации в жидком аргоне с помощью α -частиц и современному развитию «бокс»-модели [4] с получением улучшенной функции аппроксимации экспериментальных данных, а также использованию сравнительного анализа зарядовых кривых ионизационной камеры (ИК) до и после облучения γ -квантами и быстрыми нейтронами при определении загрязнения жидкого аргона кислородом из материалов и компонентов торцевых калориметров (HEC, EMEC, FCAL) [A4, A6-A8].

Общая схема криогеники физической установки на основе Дубненской ИК иллюстрируется на рис. 8. Установка обеспечивает ожижение газообразного аргона в объёме внутреннего сосуда криостата посредством прогонки жидкого азота и удерживает постоянный уровень жидкого аргона в течение всего периода облучения. Она включает в себя криостат (1), приёмник газообразного аргона (2), танк Дьюара с жидким азотом (3), трубопровод жидкого азота, подпитывающий криостат, (4) и автоматическую систему регулирования постоянного уровня жидкого аргона (5). Образцы материалов для проведения тестирования помещаются внутрь криостата. Его собственный объём около 1 литра. Для стабильного тестирования объём образцов не рекомендуется брать более чем 50% от объёма внутреннего сосуда криостата. Внутри криостата располагаются конденсатор жидкого аргона (6), змеевик, с протекающим через него азотом. Внутренний объём криостата соединяется с газовым приёмником аргона объёмом в 286 литров. Максимальное давление в газовом приёмнике равно 2.5 атмосфер определяется прочностью газового приёмника и криостата. При пониженном давлении жидкого азота может образовываться аргоновый лёд на стенках конденсатора в результате замедления ожижения аргона и повышения расхода жидкого азота. Температура конденсации аргона в жидкость равна $T_{Ar} = 87.5^0$ К при давлении 1.05 атмосфер, а температура испарения жидкого азота $T_N = 83.0^0$ К при давлении 1.8 атмосфер. Таким образом, криогенная система регулируется в диапазоне температур $\Delta T = 4.5^0$ К.

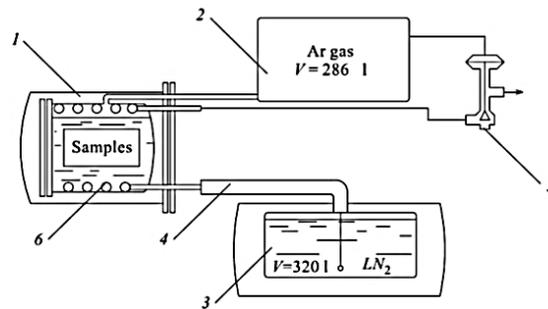


Рис. 8. Общая схема криогенной системы установки.

Объёмная доля аргона в стандартном баллоне, используемом для радиационных тестов, равна около 99,998% до очищения, и суммарное количество примесей получается $\sim 2 \div 5$ ppm в эквиваленте примеси кислорода. Ожидается, что очищение газообразного аргона, подготовленного для ожижения на физической установке, будет лучше, чем 1 ppm.

Общая схема электроники физической установки по изучению возможного загрязнения аргона представлена на рис. 9. Высокое напряжение в диапазоне от 0 до +2.0 кВольт с использованием специализированного источника питания дрейфовых и пропорциональных камер в стандарте КАМАК прикладывается к аноду ионизационной камеры, называемой « α -cell» (смотри рис. 9). Источник α -частиц на основе ^{241}Am с активностью $7.7 \text{ kBк}/4\pi$ размещается на катоде камеры и используется для инжекции электронов в жидкоаргоновый зазор в 0.7 мм между анодом и катодом. Выходной сигнал усиливается гибридным зарядочувствительным предусилителем, разработанным Институтом физики и астрофизики им. Макса Планка (MPI, Мюнхен, ФРГ). Плата с гибридным зарядочувствительным предусилителем и высоковольтный фильтр помещаются в защищающий от помех конструктив в виде коробочки. В период измерений передняя детекторная электроника монтируется к тёплому фланцу криостата и подсоединяется к аноду через 100-омный коаксиальный кабель длиной 0.5 м. Предусилитель имеет цепь обратной связи: резистор $R_f = 5.1 \text{ МОм}$ и конденсатор $C_f = 3.9 \text{ нФ}$. Выход предусилителя подключается к оборудованию в «домике экспериментатора» с помощью коаксиальных кабелей длиной 30м. Амплитуда сигнала равна почти 5 В на выходе усилительной системы.

Усиленный сигнал поступает через аттенюатор (ослабитель) в полосовой фильтр типа CRRC^2 (Shaper) с постоянной времени формировки 200 нс. Амплитудный спектр оцифровывается с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) QVT модель 3001 (ADC) в стандарте НИМ и сохраняется в виде файла на жёстком диске персонального компьютера. Калибровочные импульсы прямоугольной формы (амплитуда в диапазоне $0.2 \div 0.6 \text{ В}$, период следования 600 мкс и ширина 150 мкс), производимые генератором импульсов HP-8112A (Hewlett Packard, США), инжектируются на вход предусилителя через конденсатор тестового входа C_0 для проведения калибровки шкалы АЦП. Дополнительная

автоматизация набора данных реализуется через цифро-аналоговый преобразователь (DAC) в стандарте КАМАК, который имеет возможность делать точную установку напряжения источника с помощью ПК через магистраль обмена данными КАМАК.

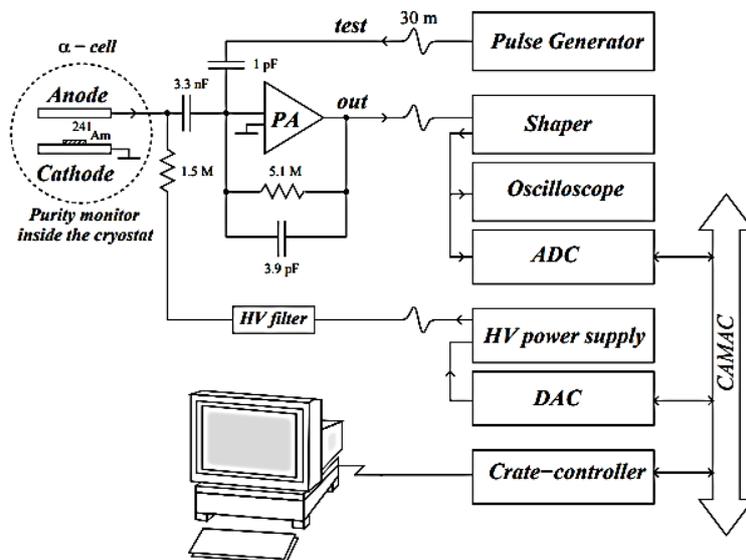


Рис. 9. Общая функциональная схема электроники физической установки по измерению загрязнения кислородом жидкого аргона.

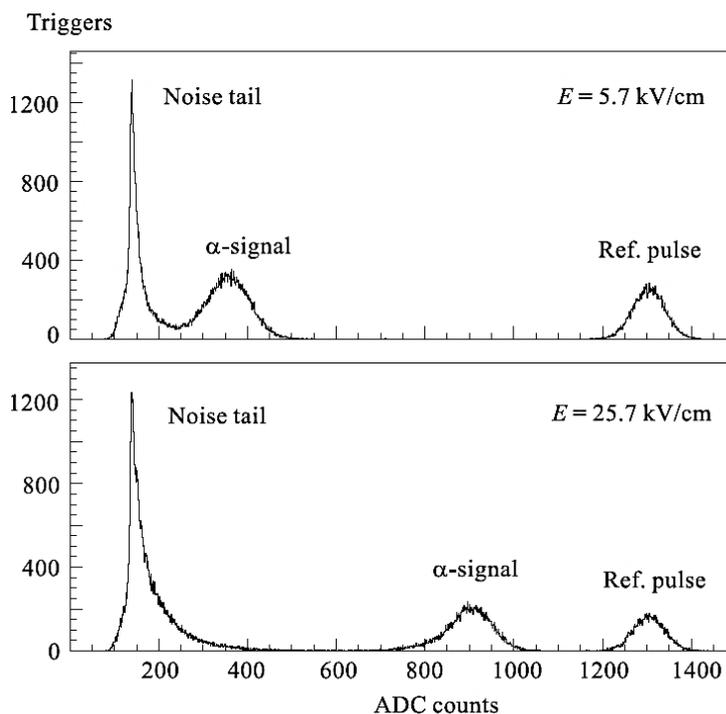


Рис. 10. Спектр ионизационной камеры в каналах АЦП, содержащий 10^6 триггеров, записанный для 2-х значениях напряжённости: 5.7кВ/см и 25.7кВ/см.

В период набора данных запись ионизационного заряда производится с помощью спектра АЦП для различных значений напряжённости электрического поля в ИК в диапазоне (2÷29) кВ/см. Затем определяется положение α -пика и строится зависимость величины заряда от напряжённости поля. Пример спектра АЦП показан на рис. 10, который представляет данные, набранные при 2-х различных значениях электрического поля в жидкоаргоновом зазоре « α -cell»: 5.7 кВ/см и 25.7 кВ/см. Очевидно, амплитуда α -пика растёт

с ростом электрического поля, тогда как позиция реперного пика (Reference pulse) от импульсного генератора используется для контроля усиления предусилителя. Хвосты α -пика негауссиановской формы свидетельствуют о вкладе фоновых сигналов в спектр. Детальный анализ систематических ошибок выполняется для всех сеансов облучения на реакторе ИБР-2, и значительного разброса систематики не найдено от сеанса к сеансу. Неопределённость в величине собираемого заряда находится на уровне ± 0.01 фКл.

Электроны, дошедшие до анода после взаимодействия с ионами кислорода, образуют уменьшенный ионизационный ток в цепи ИК: Получение аналитического вида фактора уменьшения заряда за счёт ионов кислорода происходит следующим образом:

$$I(t) = \begin{cases} \frac{Q_0}{t_{drift}} e^{-\frac{t}{\tau}}, & 0 < t < t_{drift} \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (1)$$

$$Q_{ATT} = \int_{t=0}^{t=t_D} \frac{Q_0}{t_{drift}} e^{-\frac{t}{\tau}} dt = \frac{Q_0 \tau}{t_{drift}} \left(1 - e^{-\frac{t_{drift}}{\tau}}\right) = Q_0 \frac{\lambda}{d} \left(1 - e^{-\frac{d}{\lambda}}\right). \quad (2)$$

$$F_{ATT} = \frac{Q_{After}}{Q_{Before}} = \frac{Q_{ATT}}{Q_0} = \frac{\lambda}{d} \left(1 - e^{-\frac{d}{\lambda}}\right), \text{ где } \lambda = \frac{\alpha|E|}{p}. \quad (3)$$

Здесь F_{ATT} (Attenuation Factor) – фактор ослабления, Q_{Before} и Q_{After} – измеренный заряд до и после загрязнения, t_{drift} – время дрейфа в зазоре ($t_{drift} = \frac{d}{v_{drift}}$), v_{drift} – скорость дрейфа ($v_{drift} = \frac{\lambda}{\tau}$), λ – средняя длины свободного пробега электронов, α – коэффициент пропорциональности для α -источника в жидком аргоне равен $0.14 \left(\frac{ppm \text{ см}^2}{\text{В}}\right)$ [6], ρ – концентрация атомов кислорода, d – зазор между электродами равен 0.07 см, $|E|$ – модуль напряжённости электрического поля.

Чувствительность Дубненского предусилителя проверяется на установке в Майнце (кольцевой ускоритель электронов с энергией 1.6 ГэВ) [7], который подключается к монитору загрязнения жидкого аргона на основе прецизионной лазерной камеры, позволяющий прецизионное определение инжектированной калиброванной пробы загрязнения кислородом. Дубненский предусилитель тестируется в электронном тракте работы лазерной камеры чистоты аргона (межэлектродный зазор равен 0.8 мм) для получения выходного сигнала от α -источника (Am^{241}). Полученные данные в Майнце, показанные на рис. 11 (слева), демонстрируют способность предусилителя распознать загрязнение жидкого аргона кислородом на уровне лучше, чем 1 ppm .

Аналогичные тесты с пробами кислорода также повторяются на установке в Дубне без облучения на пучке реактора ИБР-2. Для этого криостат и соединяющие трубопроводы (8 мм в диаметре) откачиваются, и проба кислорода известной величины вводится внутрь криостата. Затем открывается газоприёмник, заполненный очищенным газообразным

аргоном и расположенный в 10 м вдали от криостата, и стартует процесс ожигения. Результаты аппроксимаций показываются сплошной, пунктирной и точечной линиями на рис. 11 (справа). Они находятся в хорошем согласии с ожидаемыми величинами.

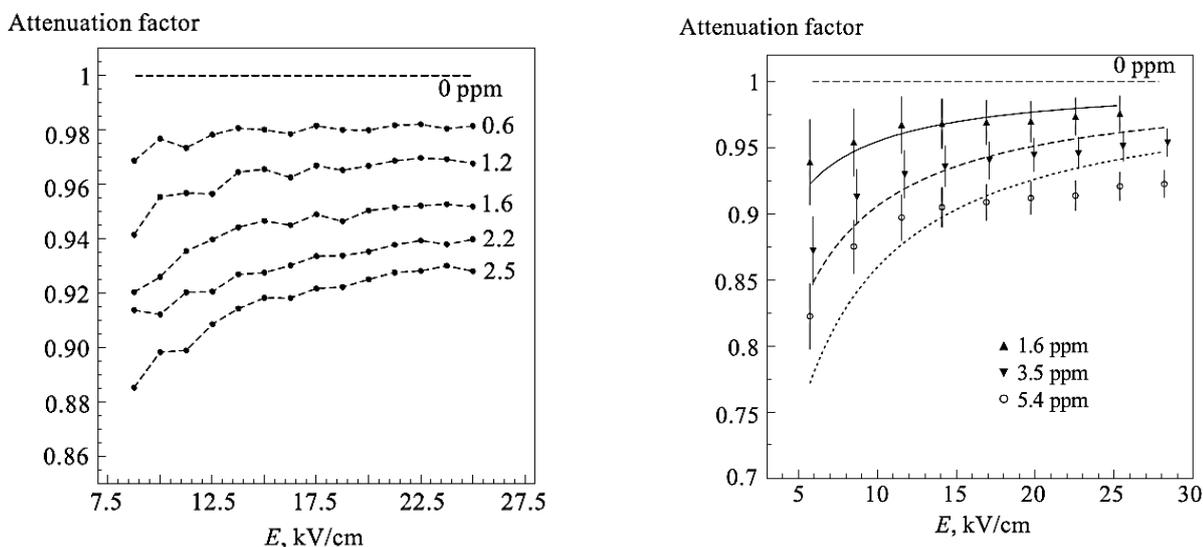


Рис. 11. Фактор ослабления заряда (F_{ATT}) при загрязнении примесями кислорода в малых дозах, измеренный с Дубненским предусилителем совместно с лазерной ИК в Майнце (слева) и Дубненским предусилителем совместно с Дубненской ИК (справа). Линии справа представляют результат аппроксимации.

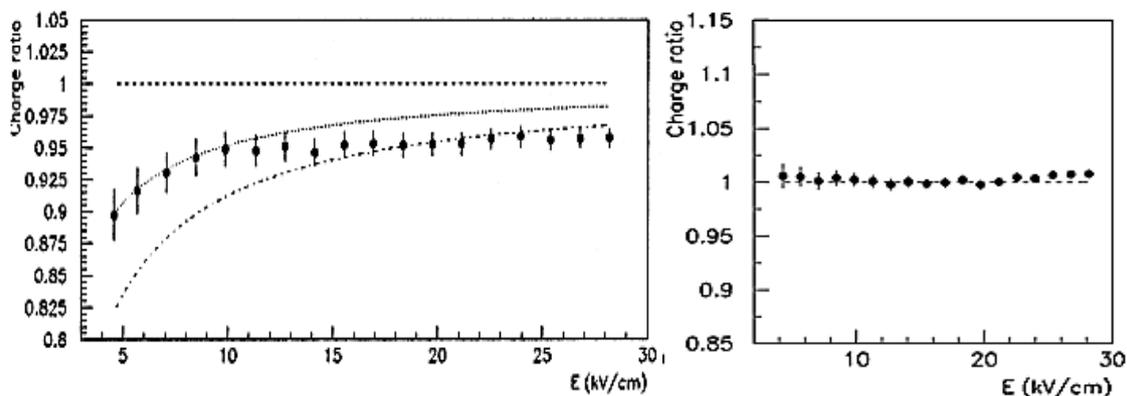


Рис. 12 Фактор ослабления (F_{ATT}) ионизирующего заряда при облучении электродов FCAL-калориметра на основе печатных плат типа PREPREG (слева) и типа FR4 (справа). Слева точечной и пунктирной линиями обозначаются калибровочные кривые загрязнения кислородом в 3.5 ppm и 5.4 ppm.

После проверочных измерений переходим к изучению возможного загрязнения жидкого аргона кислородом из конструкционных материалов и электронных компонентов калориметров (HEC, ЕМЕС, FCAL) после облучения в сильных радиационных полях с помощью Дубненской ИК. На рис. 12 представляются отношения полученных зарядовых кривых до и после облучения материалов FCAL-калориметра, касающихся электродов из стеклотекстолита двух типов: PREPREG и FR4. Обнаружено загрязнение жидкого аргона кислородом на уровне ~ 4 ppm у стеклотекстолита типа PREPREG. Он забракован. Другие

материалы и электронные компоненты калориметров (HEC, EMES, FCAL) демонстрировали отсутствие загрязнения в 10 циклах измерений. Тест этих образцов пройден успешно.

Таким образом, показана необходимость исключения печатных плат PREPREG из жидкоаргоновых торцевых калориметров из-за загрязнения жидкого аргона кислородом на уровне ~ 4 ppm при γ - дозе 96 кГр и интегральном потоке $1.0 \cdot 10^{16}$ быстрых нейтронов см^{-2} и возможность использования остальных материалов и компонентов электроники в калориметрах (HEC, EMES, FCAL).

Главным параметром в описании ионизации в жидком аргене от α -частиц является величина E_0 – напряжённость насыщения ионами колонны или «бокса», величина которой различна в моделях из-за своих граничных условий (798 кВ/см в колоннообразной модели против 470 кВ/см в «бокса»-модели). Автором рассмотрена идея, что в формуле Дж. Томаса - Д.А. Аймела E_0 не является постоянным параметром, а имеет экспоненциальную зависимость от E . Получается следующая улучшенная формула аппроксимации экспериментальных данных (F_N – нормировочный фактор систематической ошибки):

$$Q = F_N \cdot Q_0 \cdot \frac{E}{E_0} \cdot \ln \left(1 + \frac{E_0}{E} \right), \quad \text{где } E_0 = a (1 - k e^{-bE}) \left(\frac{\text{кВ}}{\text{см}} \right). \quad (4)$$

Для определения параметров аппроксимации используются данные зарядовых кривых последнего цикла тестирования (рис. 13), относящегося к электронным компонентам FCAL-калориметра (кривые до и после облучения совпадают). Получены параметры функции аппроксимации зарядовой кривой ионизации жидкого аргона от α -частиц на созданной ионизационной камере в рамках современной интерпретации «бюкс»-модели:

$$a = 720.6 \pm 5.6 \text{ кВ/см}, \quad b = 0.083 \pm 0.004 \text{ см/кВ}, \quad k = 0.48 \pm 0.01, \quad F_N = 0.997 \pm 0.005.$$

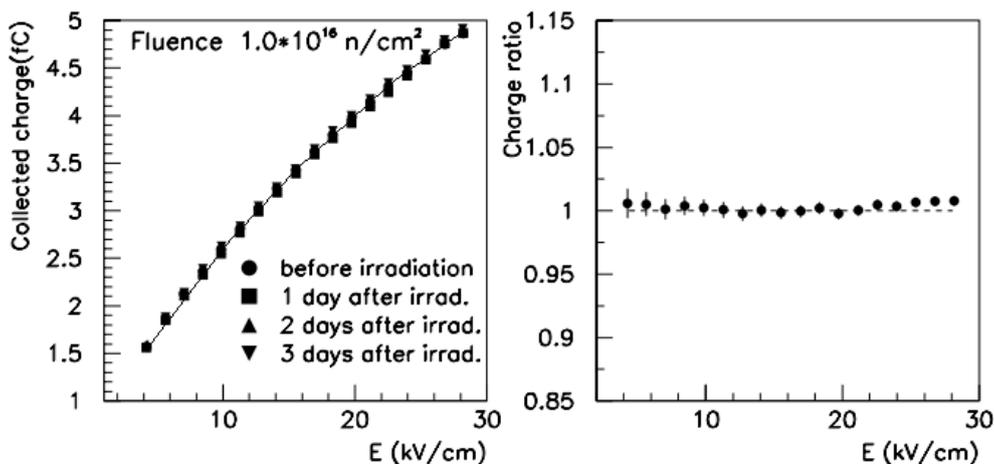


Рис. 13. Ионизация в жидком аргене от α -частиц в последнем тесте компонентов FCAL (75 смд-конденсаторов, 72 смд-резисторов, 6 пластиковых дисков из синтимида, 5 электролитических конденсаторов): абсолютная зарядовые кривые (слева) и фактор ослабления заряда $F_{ATT} \approx 1$ (справа). Причём, на левом графике сделаны измерения для трёх дней после облучения, которые совпадают между собой.

При схожести геометрии Дубненской ионизационной камеры с французской из Гренобля повторяемость значения параметров современной интерпретации «бюкс»-модели ионизации в жидком аргоне от α -частиц [63] не наблюдается.

Отличительная черта нашей улучшенной функции состоит в том, что она сопрягает описанные выше модели Дж. Томаса - Д.А. Аймела и Г. Йаффэ. На малых E до 7 кВ/см E_0 близко к 470 кВ/см как в «бюкс»-модели, а на больших E после 30 кВ/см – E_0 близко к 798 кВ/см как в колоннообразной модели.

В пятой главе рассматривается радиационная стойкость системы низковольтного питания детекторной электроники НЕС-калориметра при комнатной температуре [A2].

Низковольтное питание распределяется по 320 платам предусилителей с сумматорами внутри двух криостатов. Каждый модуль распределителя, который питает платы, обеспечивается мощным входным постоянным напряжением $270\div 300\text{В}$, CANbus-магистралью обмена с сервером DCS-системы и водным охлаждением. Внутри модуля размещаются DCDC-конвертеры (компания GSG-Elektronik, специализирующейся на производстве радиационно стойких устройств для космоса [8]) с преобразованием $270\div 300\text{В}$ в пониженное постоянное напряжение $+12\text{В}$ и $\pm 5\text{В}$, 4 платы 10-тиканального распределителя питания аналоговой электроники ($+7.2\text{В}$, $+3.3\text{В}$ и -1.6В) с возможностью их включения, выключения и регулирования с помощью интеллектуальной части в виде ELMB-интерфейса и QL-контроллера. В начальной версии дизайна десятиканального распределителя питания предусматривалось использование в качестве контроллера программируемого чипа QL3012-2PL84C (тип корпуса PLCC). Однако, в дальнейшем количество функций управления увеличивается, и поэтому его архитектура «зашивается» в чип QL3012-2PF144C (тип корпуса TQFP).

Для принятия решения по использованию того или иного электронного компонента в детекторе вводятся критерии радиационной стойкости для каждого вида излучений. Соответственно, главным условием применения электронных компонентов по радиационной стойкости является работа этих устройств с допустимым качеством в радиационных полях (γ -кванты, нейтроны), границы которых задаются критериями радиационной стойкости (RTC_i) за 10 лет работы LHC по следующей формуле [9]:

$$RTC_i = 10 \cdot SRL_i \cdot SFsim_i \cdot SFldr_i \cdot SFlot_i \quad (i = TID, NIEL) \quad (5)$$

Факторы безопасности ($SFsim_i$, $SFldr_i$, $SFlot_i$) используются для того, чтобы учесть погрешность в определении уровня радиации при моделировании, отличие в скорости набора дозы излучения в тесте по отношению к режиму работы детектора и разброс значений радиационной стойкости закупленных электронных компонентов от партии к партии и внутри самой партии.

Определяются значения критериев радиационной стойкости QL-контроллеров, находящихся в составе низковольтной системы, по γ -квантам и нейтронам с учётом их принадлежности к категории радиационно стойких микросхем типа ASIC и расположения в районе TILE_EB-калориметра. Выполняем процедуру вычисления критериев (см. табл. 2). В итоге получаем следующие критерии радиационной стойкости QL-контроллеров системы питания HEC-калориметра: $RTC_{TID} = 23.1 \text{ Гр}$ и $RTC_{NIEL} = 4.95 \cdot 10^{12} \text{ нейтрон МэВ}^{-1} \text{ см}^{-2}$.

Таблица 2. Расчёт критериев радиационной стойкости (RTC_i) для QL-чипов.

	Описание	γ -кванты Гр	нейтроны $\text{н МэВ}^{-1} \text{ см}^{-2}$
SRL_i	Промоделированный уровень излучения за 10 лет работы установки ATLAS на LHC	2.2	$3.3 \cdot 10^{11}$
$SFsim_i$	Фактор безопасности, учитывающий неопределённости в моделировании уровней излучения	3.5	5
$SFlrd_i$	Фактор безопасности, учитывающий неопределённость от скорости набора излучения	1.5	1.5
$SFlot_i$	Фактор безопасности, учитывающий технолог. различия при производстве купленных компонентов между собой	2	2
RTC_i	Критерий радиационной стойкости за 10 лет работы LHC	23.1	$4.95 \cdot 10^{12}$

Тестирование архитектуры заключается в проверке с помощью прикладной программы, написанной в среде TestPoint, работоспособности наиболее важных регистров внутри QL-контроллера. После каждого шага программы все входные и выходные сигналы записываются в таблицу действий. Если при сравнении соответствия выходных данных входным появляется ошибка, то информация о ней заносится в поле таблицы. Более детальное описание аппаратной и программной частей теста даётся в [10].

Помимо проверки архитектуры QL-контроллеров тестируется основная электрическая характеристика – ток потребления по шине питания (+5В). Для этого используется аналоговый канал регистрации с использованием АЦП.

Два чипа QL3012-2PL84C с предварительной архитектурой демонстрируют работоспособность до γ -дозы $(3.05 \pm 0.45) \text{ кГр}$ и интегрального потока $(19 \pm 3) \cdot 10^{12} \text{ нейтронов МэВ}^{-1} \text{ см}^{-2}$. Случайно отобранные 10 чипов QL3012-2PF144C с окончательной архитектурой из партии 70 шт. получают повреждения при γ -дозе $(381 \pm 52) \text{ Гр}$ и интегральном потоке $(11.1 \pm 2.5) \cdot 10^{12} \text{ нейтронов МэВ}^{-1} \text{ см}^{-2}$. Альтернативный показатель работы чипов в виде тока потребления указывает, что повреждение QL-контроллеров происходит в среднем при $63 \pm 6 \text{ мА}$ (рост почти в 11 раз относительно первоначальной величины тока). Другие элементы низковольтной системы HEC-калориметра: интерфейс связи с компьютером ELMB128, регуляторы напряжений LHC4913 и LHC7913 – успешно протестированы по радиационной стойкости ранее [11-13, A2].

В результате определена радиационная стойкость системы контроля и управления низковольтным питанием НЕС-калориметра, состоящей из следующих элементов: QL-контроллера, ELMВ-интерфейса и регуляторов напряжений положительной и отрицательной полярности, которая составляет (381 ± 52) Гр по дозе ионизирующего излучения и $(11.1 \pm 2.5) 10^{12}$ нейтронов $MэВ^{-1} см^{-2}$ по потоку неионизирующего излучения до 20 МэВ. Эти величины удовлетворяют критериям радиационной стойкости.

Шестая глава посвящена описанию требований к производственным участкам и процедуры серийного производства модулей НЕС-калориметра [A1]. Серийное производство модулей НЕС-калориметра проводилось в Канаде, Германии и России. НЕС1-калориметр производили Институт физики им. Макса Планка (Мюнхен) и ОИЯИ (Дубна), а НЕС2-калориметр – ИФВЭ (Протвино) и канадский ускорительный центр TRIUMF (Ванкувер). Высокая надёжность модулей НЕС-калориметра накладывает очень жёсткие требования к качеству помещений, в которых производится сборка. Степень запылённости и относительная влажность воздуха значительно влияют на штатную установку электрического поля внутри межэлектродных зазоров, поэтому сборка модулей совершалась в специализированном производственном участке (так называемой «чистой комнате», класс помещения по запылённости «1000» [14]).

Процедура тестирования всех элементов детектирующего зазора (кроме медных плит, для которых тестирование не требуется, а достаточно контроля качества изготовителя) заключалась в последовательном прохождении ими высоковольтного теста. Критерием прохождения теста является то, что Nonеусomb-материал должен иметь ток утечки меньше, чем 5 нА при относительной влажности в 30%. Чтобы считать высоковольтный тест пройденным при другой относительной влажности воздуха, должна исследоваться зависимость тока утечки (I_{leak} в нА) от относительной влажности воздуха (H – Humidity в %). Аппроксимирующая функция для этих данных имеет следующий вид:

$$I_{leak} = e^{A + B \cdot H(\%)} . \quad (6)$$

Параметр B для всех кривых одинаков и равен 0.106 (1/%). Параметр A варьируется в зависимости от прикладываемого напряжения от -1.81 (для 1.0 кВ) до $+0.28$ (для 3.0 кВ). Таким образом, полученная зависимость позволяет формализовать критерий прохождения теста Nonеусomb-материалом при относительной влажности воздуха в диапазоне 31–59 %. Дополнительно при тестировании ROВ-электродов предусматривается измерение ёмкости РАD-ячеек для определения передаточной функции канала регистрации.

После сборки модуля монтируется проверочная цепь с присоединением проводов к EST-электродам и выполняется двухдневная проверка в режиме усиленного питания 2000 Вольт при токе срабатывания защиты источника ВИНК-Д 100-150 мкА. По её окончании

проводится аналогичный высоковольтный экспресс-тест с подсоединением проводов к ROV-электродам. Далее выполняется последняя на производстве длительная процедура по выдерживанию в течение 20 дней всего модуля при 2000 Вольт на воздухе. Сбой (превышение током утечки заданного предела) в этом тесте приводит к поиску и локализации источника пробоя, разборке до проблемного зазора, устранению причины неисправности путём замены компонента, новой сборке модуля и продолжению теста. Окончательное тестирование модулей НЕС-калориметра перед сборкой в «колесо» завершается «холодным» высоковольтным тестом в криостате (CERN).

В ЛЯП ОИЯИ нами созданы и успешно протестированы 16 модулей переднего НЕС-калориметра. Предложен и реализован новый подход в тестировании компонентов модуля, который позволил учесть зависимость тока утечки Honeycomb-материала от относительной влажности и совместить процесс его просушивания с длительным высоковольтным тестом всего модуля, что существенно сократило время производства модулей.

В седьмой главе описывается проверка модулей НЕС-калориметра на тестовом пучке заряженных частиц SPS-ускорителя (CERN). Главной задачей тестирования на пучке частиц является получение энергетической шкалы на электронах и калибровка модулей НЕС-калориметра адронами (пионами) [A9]. В заключительной фазе производства делаются два комбинированных пучковых теста модулей: первый в комбинации с ЕМЕС-калориметром для ячеек модулей в области $1.6 < |\eta| < 1.8$ [A10], а второй в комбинации с калориметрами НЕС, ЕМЕС и FCAL в области $2.5 < |\eta| < 4.0$ [A11, A12], целью которых является отладка совместной работы детекторов в жидкоаргоновом криостате. Схема экспериментальной установки для проверки серийных модулей НЕС-калориметра на тестовом пучке заряженных частиц SPS-ускорителя представлена на рис. 15.

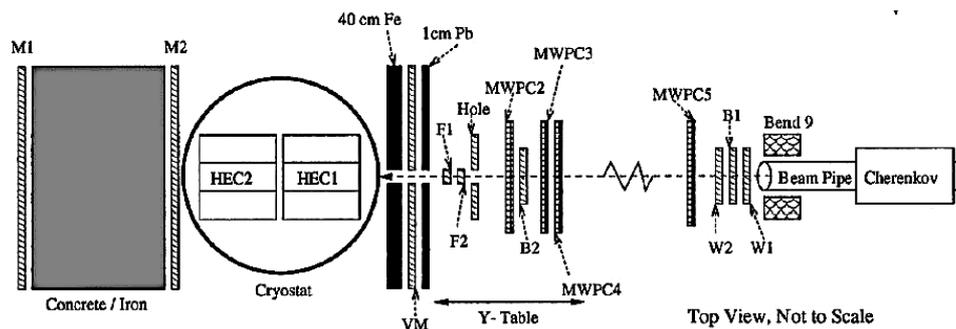


Рис. 15. Схема экспериментальной установки для тестирования серийных модулей НЕС-калориметра на пучке SPS-ускорителя (линия H6).

Триггер вырабатывается из сигналов черенковского детектора (CEDAR-07), одного переднего сцинтилляционного счётчика (B1), трёх сцинтилляционных годоскопических «стенок» (VM, M1 и M2) и 2 апертурных сцинтилляционных счётчиков размером 50 x 50 мм² для быстрой временной отметки с $\sigma=70$ псек (F1 и F2). Место входа пучковой частицы в

модуль калориметра и её угол отклонения от нормали определяются с использованием четырёх многопроволочных пропорциональных камер (*MWPC2-MWPC5*) с двумя плоскостями (вертикальной и горизонтальной) в каждой. Шаг намотки проволок в камерах *MWPC2*, *MWPC3*, *MWPC4* равен 1 мм и в камере *MWPC5* - 2 мм, соответственно. Вето-счётчики (*VM*) используются для отсева событий из гало пучковых протонов. Перед годоскопической вето-«стенкой» (*VM*) добавляется дополнительный слой свинца для уменьшения фоновых протонов. Для выделения фоновых мюонов на выходе из криостата используется железный поглотитель со сцинтилляционными годоскопическими «стенками» спереди (*M1*) и сзади (*M2*) поглотителя. В экспериментальном павильоне ЕНН1 (линия Н6) обеспечивается прохождение через установку электронов, позитронов, пионов или мюонов в диапазоне энергий $6 \leq E \leq 200$ ГэВ.

В качестве трековой части экспериментальной установки тестирования модулей НЕС-калориметра используются 4 двухкоординатные многопроволочные пропорциональные камеры *MWPC2-MWPC5* с ортогональной XY-ориентацией сигнальных проволок, спроектированные для установки «Гиперон» [15] на ускорителе У-70 (ИФВЭ, Протвино). Основные параметры пучковых пропорциональных камер приведены в таблице 3.

Таблица 3. Основные характеристики пучковых пропорциональных камер.

Наименование	MWPC2-MWPC4	MWPC5
Диаметр проволоки, мкм	10	20
Шаг намотки проволоки, мм	1	2
Зазор анод-катод, мм	4	4
Эффективная площадь, мм	128 x 128	128 x 128
Напряжение питания катода, В (выход на плато эффективности)	3550	2750
Плато эффективности, Вольт	~400	~700

Выбор такого варианта продиктован его относительной дешевизной, стабильностью работы в комплексе с электроникой PCOS-II (производство Le Croy, США) и большим опытом обслуживания и ремонта на модернизированной установке «Гиперон» в 1989-96гг. [A15]. Пучковые пропорциональные камеры *MWPC2-MWPC5* продуваются так называемой «магической» смесью под небольшим избыточным давлением около 0,1 атм. [15, A15]:



Здесь iso-C₄H₁₀ – изобутан, C₃H₈O₂ – изопропиловый спирт, CF₃Br – фреон типа 13B1. С её помощью достигается большой коэффициент газового усиления, который позволяет работать с достаточно высоким порогом дискриминации 2÷3 мкА. Пример типичного профиля пучка, полученного пропорциональными камерами, демонстрируется на рис. 16.

Перед тестом модули НЕС-калориметра собираются, как часть *HEC1* и *HEC2* колёс по 3 модуля калориметра типа *HEC1* и *HEC2*, соответственно, формируя 3 полных ϕ -клина.

НЕС-калориметра. Фронтальный вид частичной сборки колеса НЕС-калориметра представлен на рис. 17.

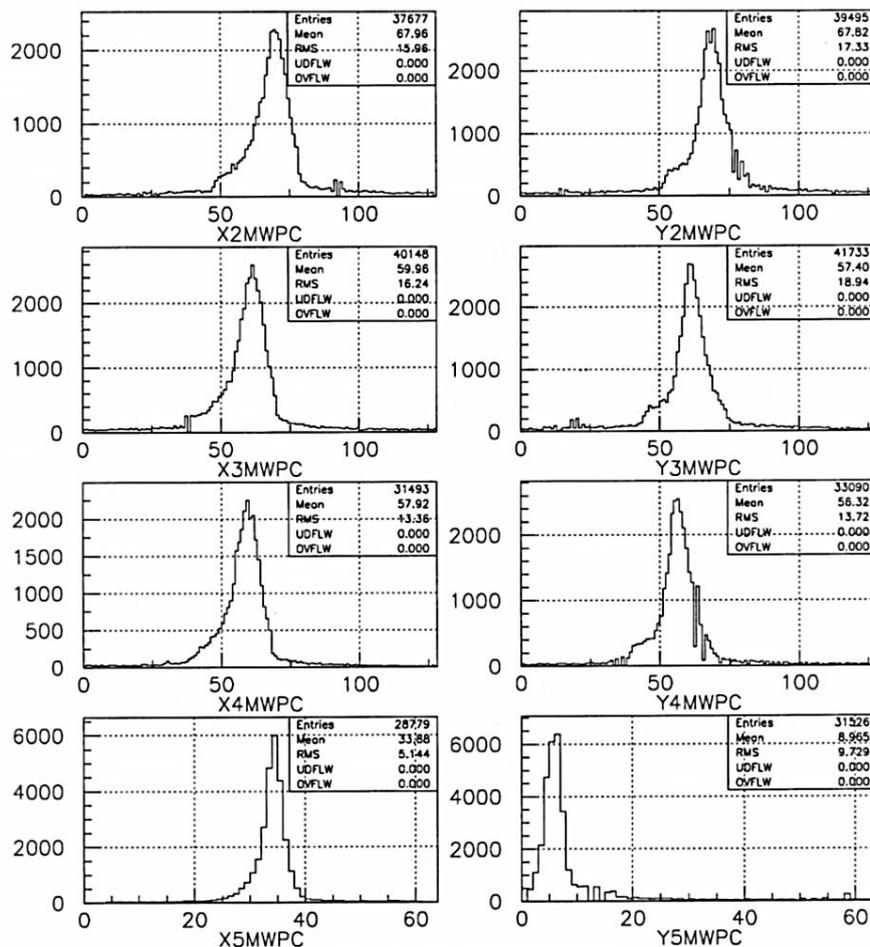


Рис. 16. Профиль пучка π^+ -мезонов из цикла №2150 от 10.10.2004 г. (цена деления по оси X для камер — 1мм, а для последней камеры X5/Y5MWPC — 2мм).

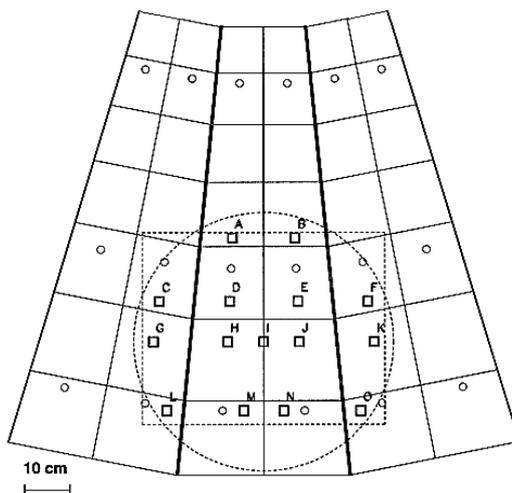


Рис. 17. Поперечный вид модулей в криостате. Пунктиром отмечены зоны, доступные для пучковых частиц: окружность (диаметр 60 см) – окно криостата и прямоугольник (60·50 см²) – возможная область попадания частиц при работе вертикально отклоняющего магнита BEND 9 и поперечном движении криостата.

Отклик кластера ячеек НЕС-калориметра при прохождении частицы является основой для реконструкции её энергии. Детектируемый в жидкоаргоновых зазорах ток, получаемый в

нА, конвертируется в МэВ с помощью электромагнитного калибровочного коэффициента α_{em} . Он находится для каждой точки входа отдельно. Например, среднее значение α_{em} для точек входа F, G, H равно 3.82 ± 0.04 МэВ/нА для всех циклов измерений энергии электронов [134]. На рис. 18 представлен результат реконструкции энергии электронов 10, 20, 80 и 147.8 ГэВ в точке входа J . Реконструкция энергии электронов для точек входа G и K производится аналогичным образом.

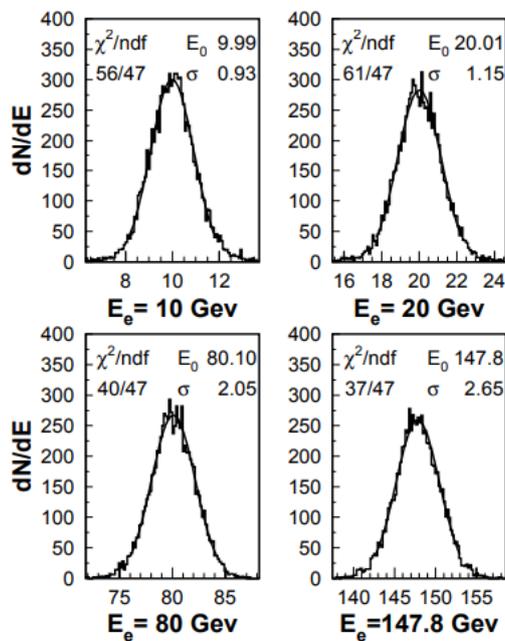


Рис. 18. Реконструкция энергии электронов в точке входа J .

Энергетическое разрешение – одно из главных характеристик калориметра. На рис. 19 показывается зависимость разрешения σ/E от энергии для электронов в трёх различных точках входа G, J, K , относящимся к трём различным модулям. Стоит отметить, что шум электроники в кластере, имеющим отношение к регистрации энергии электрона, вычитается квадратично для каждой индивидуальной энергии и точки входа, как когерентный шум (независящий от энергии частиц), а зависимость энергетического разрешения от энергии аппроксимируется следующим выражением:

$$\sigma/E = a(\%)/\sqrt{E(\text{ГэВ})} \oplus b(\%), \quad (8)$$

где a – стохастический член (sampling term) и b – постоянный член (constant term). Линии показывают результат аппроксимации полученных данных параметрическим выражением (8) для трёх точек входа электронов G, J и K . Аппроксимация одной функцией всех наборов данных даёт результат $a = (21.4 \pm 0.2)\% \cdot \text{ГэВ}^{1/2}$ и $b = (0.3 \pm 0.2)\%$. Эти величины находятся в хорошем согласии со значениями из Монте Карло моделирования $a_{MC} = (21.7 \pm 0.1)\% \cdot \text{ГэВ}^{1/2}$ и $b_{MC} = (0.0 \pm 0.2)\%$.

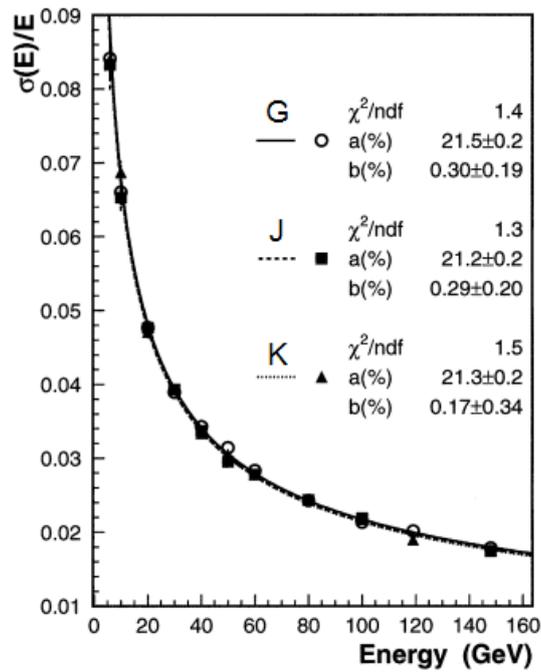


Рис. 19. Энергетическое разрешение для электронов в трёх точках входа G, J и K, относящимся к трём различным модулям.

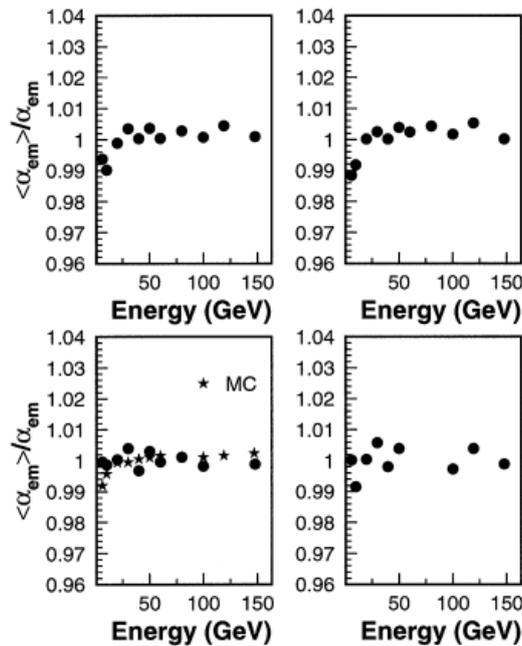


Рис. 20. Обратное отношение отклонения электромагнитного калибровочного коэффициента α_{em} для четырёх точек входа G, H, J и K относительно среднего.

Линейность сигнала отклика также изучена и иллюстрируется на рис. 20. Здесь демонстрируется обратное отклонение значений электромагнитного калибровочного коэффициента α_{em} относительно среднего значения для электронов различных энергий. Значок «чёрный кружок» относится к экспериментальным данным в четырёх точках входа G, H, J и K, а символ «чёрная звёздочка» – к данным Монте Карло моделирования в точке входа J. Отклик линеен внутри полосы допуска в $\pm 1\%$. Уменьшение отклика при небольших

энергиях проявляется благодаря «мертвому» веществу, находящемуся впереди НЕС-калориметра.

Энергия адронов, в частности пионов, реконструируется с использованием адронного калибровочного коэффициента α_π . Этот коэффициент α_π трансформирует измеряемый ионизационный ток I_π (нА) в энергию пионов E_π (ГэВ). Поскольку НЕС-калориметр является не скомпенсированным, то этот коэффициент определяется для каждой энергии отдельно. На рис. 21 демонстрируется зависимость адронного калибровочного коэффициента α_π от энергии пионов для четырёх точек входа G, H, J и K .

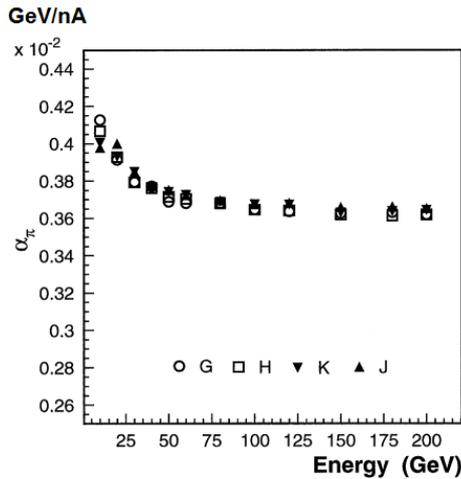


Рис. 21. Зависимость адронного калибровочного коэффициента от энергии пионов для четырёх точек входа G, H, J и K .

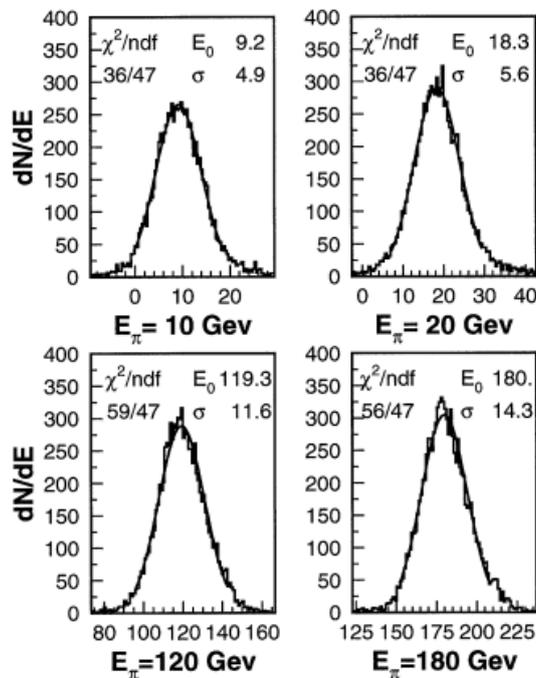


Рис. 22. Реконструкция энергии пионов в точке входа J .

Результат реконструкции энергии пионов 10, 20, 120 и 180 ГэВ в точке входа J представлен на рис. 22. Аналогичным образом производится реконструкция энергии пионов для точек входа G и K .

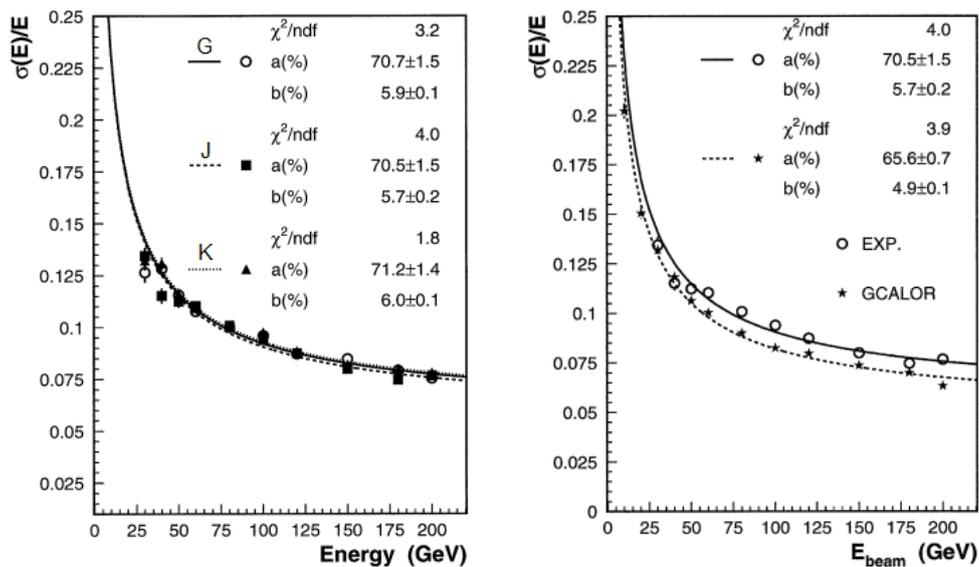


Рис. 23. Энергетическое разрешение пионов: для точек входа G, J, K (слева) и для точки входа J (справа) с результатом моделирования программой GCALOR (сплошная линия – эксперимент, пунктирная линия – моделирование).

Рис. 23 (слева) демонстрирует зависимость энергетического разрешения σ/E от энергии для пионов в трёх различных точках входа G, J и K. Результирующее соотношение σ/E аппроксимируется выражением (8). Для полученных данных параметры аппроксимации следующие: $a = (70.5 \pm 1.5)\% \cdot \Gamma \text{ЭВ}^{1/2}$ и $b = (5.7 \pm 0.2)\%$ (точка входа J). Сравнение данных по энергетическому разрешению для пионов в точке входа J с Монте Карло моделированием программой GCALOR, в которой наилучшим образом описывается форма адронного ливня, показано на рис. 23 (справа). Результат моделирования программой GCALOR следующий: $a_{MC} = (65.6 \pm 0.7)\% \cdot \Gamma \text{ЭВ}^{1/2}$ и $b_{MC} = (4.9 \pm 0.1)\%$. Он отличается от приведённых выше измерений. В представленном анализе используется простой метод с применением одного общего калибровочного коэффициента α_π без оптимизации.

Улучшить энергетическое разрешение НЕС-калориметра для пионов позволяет методика из работы [16], которая учитывает вклад, связанный с утечкой энергии для каждой энергии в каждой точке входа. Этот подход приближает результат моделирования к экспериментальным данным. Как правило, получается типичные значения стохастического члена $a = (62.2 \pm 1.8)\% \cdot \Gamma \text{ЭВ}^{1/2}$ и постоянного члена $b = (5.2 \pm 0.2)\%$ в сравнении с моделированием программой GCALOR, где стохастический член $a_{MC} = (61.3 \pm 0.6)\% \cdot \Gamma \text{ЭВ}^{1/2}$ и постоянного члена $b_{MC} = (3.5 \pm 0.1)\%$.

В заключении приведены основные результаты работы, которые отражены в выводах.

- 1 Создана облучательная установка на канале №3 реактора ИБР-2 ЛНФ ОИЯИ, включающая радиационно стойкую ионизационную камеру с α -источником, электронный тракт регистрации и систему сбора данных, для проведения исследований загрязнения жидкого аргона кислородом из материалов и электронных компонентов

жидкоаргоновых торцевых калориметров (HEC, EMEC, FCAL) в сильных радиационных полях (суммарно получены γ -доза ~ 1 МГр и поток $\sim 10^{17}$ быстрых нейтронов $\text{МэВ}^{-1} \text{см}^{-2}$).

- 2 Показана необходимость исключения печатных плат PREPREG из жидкоаргоновых торцевых калориметров из-за загрязнения жидкого аргона кислородом на уровне ~ 4 ppm при γ -дозе 96 кГр и интегральном потоке $1.0 \cdot 10^{16}$ быстрых нейтронов см^{-2} и возможность использования остальных материалов и электронных компонентов в калориметрах (HEC, EMEC, FCAL).
- 3 Экспериментально получены параметры функции аппроксимации зарядовой кривой ионизации жидкого аргона от α -частиц на созданной ионизационной камере в рамках современной интерпретации «бюкс»-модели: $a=(720.6\pm 5.6)\text{кВ/см}$, $b=(0.083\pm 0.004)\text{см/кВ}$, $k=(0.48\pm 0.01)$, которые определяют напряженность поля при насыщении ионами «бюкса».
- 4 Определена радиационная стойкость системы контроля и управления низковольтным питанием HEC-калориметра, состоящей из следующих элементов: QL-контроллера, ELMV-интерфейса и регуляторов напряжений положительной и отрицательной полярности, которая составляет (381 ± 52) Гр по дозе ионизирующего излучения и $(11.1\pm 2.5) \cdot 10^{12}$ нейтронов $\text{МэВ}^{-1} \text{см}^{-2}$ по потоку неионизирующего излучения до 20 МэВ. Эти величины удовлетворяют критериям радиационной стойкости.
- 5 Создана трековая часть установки для тестирования модулей HEC-калориметра и проведения комбинированных тестов с модулями EMEC и FCAL на базе пучковых двухкоординатных пропорциональных камер (8 плоскостей) на тестовом пучке SPS-ускорителя (CERN) [A9-A12, A15].
- 6 Проведена проверка 33-ти передних и задних модулей HEC-калориметра на тестовом пучке частиц SPS-ускорителя (CERN). Получены значения стохастического члена a и постоянного члена b энергетического разрешения для электронов: $a = (21.4\pm 0.2)\% \cdot \text{ГэВ}^{1/2}$ и $b = (0.3\pm 0.2)\%$, а также заряженных пионов с учётом утечки энергии $a = (62.2\pm 1.8)\% \cdot \text{ГэВ}^{1/2}$ и $b = (5.2\pm 0.2)\%$. Экспериментальные данные хорошо согласуются с Монте Карло моделированием с помощью программы GCALOR.

Публикации автора по теме диссертации.

- A1) D.M. Gingrich, ..., A. Shalyugin et al., Construction, assembly and testing of the ATLAS hadronic end-cap calorimeter, Jour. of Instrum., 2007-2-P05005 33pp.
- A2) N.J. Buchanan, ..., A. Shalyugin et al., Radiation qualification of the front-end electronics for the readout of the ATLAS liquid argon calorimeters, Jour. of Instrum., 2008-3-P10005 43pp.

- A3) J. Ban, ..., A. Shalyugin et al., Radiation hardness tests of GaAs amplifiers operated in liquid argon in the ATLAS calorimeter, Nucl. Inst. and Method A594 (2008), p.389-394
- A4) C. Leroy, ..., A. Shalyugin et al., Liquid argon pollution tests of the ATLAS detector materials at the IBR-2 reactor in Dubna, Part. Nucl. Lett., 2000 №5(102) p.5-19.
- A5) C. Leroy, ..., A. Shalyugin et al., Irradiation tests of readout chain components of the ATLAS liquid argon calorimeters, Part. Nucl. Lett., 2000 №5(102) p.20-24.
- A6) C. Leroy, ..., A. Shalyugin et al., Radiation hardness studies of components of the ATLAS Forward and Hadronic End Cap calorimeters at Dubna, 8-th International Conference on Calorimetry in High Energy Physics(CALOR Lisbon'99), World Scientific, 2000, p.653-660.
- A7) C. Leroy, ..., A. Shalyugin et al., Liquid argon pollution tests of ATLAS detector materials at the IBR-2 reactor in Dubna. 7-th International Conference on Advanced Technology and Particle Physics (ICATPP Como 2001), World Scientific, New Jersey, 2002, p.800-805.
- A8) C. Leroy, ..., A. Shalyugin et al., Irradiation tests of ATLAS liquid argon forward calorimeter (FCAL) electronics components, ATL-LARG-2002-003, CERN, Geneva, 19pp.
- A9) B. Dowler, ..., A. Shalyugin et al., Performance of the ATLAS hadronic end-cap calorimeter in beam tests, Nucl. Instrum. Meth. A482 (2002), p.94-124.
- A10) C. Cojocaru, ..., A. Shalyugin et al. Hadronic calibration of the ATLAS liquid argon end-cap calorimeter in the pseudorapidity region $1.6 < |\eta| < 1.8$ in beam test, Nucl. Inst. and Meth. A531 (2004), p.481-514.
- A11) J. Pinfold, ..., A. Shalyugin et al., Performance of ATLAS liquid argon endcap calorimeter in the pseudorapidity $2.5 < |\eta| < 4.0$ in beam tests, Nucl. Inst. and Method A593 (2008), p.324-342.
- A12) J. Pinfold, ..., A. Shalyugin et al., Evaluation of the local hadronic calibration with combined beam-test data for the endcap and forward calorimeters of ATLAS in the pseudorapidity region $2.5 < |\eta| < 4.0$ in beam tests, Nucl. Inst. and Method A693 (2012), p.74-97.
- A13) J. Ban, ..., A. Shalyugin et al. Radiation hardness tests of GaAs amplifiers for liquid argon calorimetry. JINR-E13-95-222, MPI-PHE-95-08 May 1995, 12pp.
- A14) A. Cheplakov, ..., K. Jakobs, ..., A. Shalyugin et al. Radiation hardness of GaAs preamplifiers for liquid argon calorimetry at LHC. JINR-E13-96-358, MPI-PHE-96-15 Nov 1996, 13pp.
- A15) Ю.И. Давыдов, ... А.Н. Шалюгин и др., Трековая система модернизированного спектрометра «Гиперон». Сообщение ОИЯИ Р13-94-411, Дубна, 1994, 13с.

Цитируемая литература.

- 1) ATLAS collaboration, Expected performance of the ATLAS experiment: detector, trigger, and physics, CERN-OPEN-2008-020, 2009, CERN, Geneva.
- 2) R. Wigmans, Calorimetry energy measurement in Particle Physics, Clarendon Press, Oxford 2000.

- 3) В.В. Голиков и др. Облучательная установка крупногабаритных объектов на канале №3 реактора ИБР-2, Сообщение ОИЯИ P13-96-403, Дубна, 2002, 20с.
- 4) M.L. Andrieux et al., Response of an α -source mounted in a liquid argon ionization cell and read out in full charge collection mode, Nucl. Instr. and Meth. A427 (1999), p.568-573.
- 5) J. Thomas and D.A.Imel, Recombination of electron-ion pairs in liquid argon and liquid xenon, Phys. Rev. A36 No.2, 1987, p.614-616.
- 6) W. Hoffman et al., Production and transport of conduction electrons in a liquid argon ionization chamber, Nucl. Instr. and Meth. v.135 (1976), p.151-156.
- 7) M.Adams et al., The Concept of the ATLAS Liquid Argon Purity Monitoring System, ATLAS Note, ATL-LARG-96-053, 26 November 1996.
- 8) H. Brettel et al., Low Voltage Control for the Liquid Argon Hadronic End-Cap Cal of ATLAS, 7th Workshop on Electronics for LHC Experiments, Stockholm, Sweden, 2001, p.309-313.
- 9) M. Dentan and P. Farhouat, ATLAS Policy on Radiation Tolerant Electronics, ATC-TE-QA-0001 v.1, Draft 3 Apr 2000, CERN, Geneva, 38pp.
- 10) H. Brettel et al., Irradiation Test of QL-chips for MPI Munich at Dubna Oct. 2000 (MPIrad1) ATLAS HEC-Note-132 20 Dec 2002 8pp.
- 11) H. Boterenbrood and B. Hallgren, NIEL Qualification of the ELMB128 Series Production, ATLAS Internal Working Note DCS-IWN21, CERN, Geneva, 18 Feb 2004.
- 12) ST Microelectronics LHC radiation hardened voltage regulator, доступно на сайте <http://lhc-voltage-regulator.web.cern.ch/lhc-voltage-regulator/>.
- 13) N. Boetti, P. Jarron, B. Kisielewski and F. Faccio, Radiation performance of the L4913 voltage regulator, in IEEE Radiation Effects Data Workshop, Phoenix, Arizona, July 15–19 2002, p. 115, <http://dx.doi.org/10.1109/REDW.2002.1045540>.
- 14) Чистые помещения: проблемы, теория, практика, ред. А.Е. Федотова, АСИНКОМ, 2003.
- 15) А.С. Курилин и др., Двухкоординатная пропорциональная камера с шагом сигнальных проволок 1 мм спектрометра «Гиперон», Препринт ОИЯИ 13-83-774, Дубна, 1983, 6с.
- 16) А.А. Minaenko, Analysis of testbeam data, obtained with module zero of the hadronic end-cap calorimeter, ATL-LARG-99-011, 1999, CERN, Geneva, 41pp.