ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ**

2008–18
На правах рукописи

Ерин Сергей Васильевич

# РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ГАЗОВЫХ КАЛОРИМЕТРОВ

01.04.23 – физика высоких энергий

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Протвино 2008

УДК 539.1.07 М-24

Работа выполнена в Институте физики высоких энергий (г. Протвино).

Научный руководитель – член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор С.П. Денисов (ИФВЭ, г. Протвино).

Официальные оппоненты – доктор физико-математических наук А.Н. Сытин (ИФВЭ, г. Протвино), кандидат физико-математических наук С.Я. Сычков (ОИЯИ, г. Дубна).

Ведущая организация – Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ (г. Москва).

Защита диссертации состоится “_____”_____ 2008 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 201.004.01 при Институте физики высоких энергий по адресу: 142281, г. Протвино Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФВЭ.

Автореферат разослан “_____”_____ 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 201.004.01 Ю.Г. Рябов

© Государственный научный центр
Российской Федерации
Институт физики высоких энергий, 2008

## Общая характеристика работы

**Актуальность проблемы**

Электромагнитные калориметры занимают особое место в ряду детекторов элементарных частиц. Это связано с тем, что многие частицы, исследования которых в настоящее время представляют значительный интерес, распадаются с испусканием электронов, позитронов и γ-квантов (например, $J/\psi \to e^+e^-$, $W^\pm \to e^\pm\nu$, $Z \to e^+e^-$, $H \to \gamma\gamma$, $Y \to e^+e^-$).

Настоящая работа посвящена разработке и исследованию газовых электромагнитных ионизационных калориметров. Подобные калориметры имеют хорошее энергетическое разрешение, высокую однородность отклика по площади, позволяют проводить электронную калибровку каналов, обладают высокой долговременной стабильностью при эксплуатации и сравнительно дёшевы. Существенное достоинство таких калориметров – большая радиационная стойкость, что особенно важно в современных экспериментах с фиксированной мишенью, использующих пучки с интенсивностью до $10^9$ част./с, либо в коллайдерных экспериментах, например LHC, где проектная светимость составляет $10^{34}$ см$^{-2}$с$^{-1}$.

Применение газовых ионизационных калориметров до последнего времени сдерживалось необходимостью использования газа под давлением свыше 20 атм. для получения приемлемых энергетического разрешения и отношения сигнал-шум, что вызывало удорожание детектора, а также значительное усложнение эксплуатации. Важным шагом в разработке таких калориметров было впервые предложенное нами решение использовать тяжёлый фреон $C_3F_8$ в качестве активной среды. Это позволило снизить рабочее давление до нескольких атмосфер.

**Целью диссертационной работы** являлось создание электромагнитного ионизационного калориметра, наполненного газом $C_3F_8$, и исследование его характеристик в диапазоне энергий от 10 до 40 ГэВ.

**Автор защищает:**

- Результаты исследования характеристик электромагнитных газовых калориметров, наполненных $C_3F_8$.
- Результаты исследования работы газовых детекторов, наполненных $C_3F_8$.

- Пакет программ для расчёта характеристик электромагнитного газового ионизационного калориметра, основанных на параметрической модели развития ливня, и результаты его использования для получения характеристик газовых ионизационных калориметров.

**Научная новизна и практическая ценность.** Впервые получены характеристики электромагнитного ионизационного калориметра, наполненного тяжёлым фреоном $C_3F_8$. В частности, измерено энергетическое разрешение, его зависимость от энергии падающей частицы и давления газа. Изучены свойства несамостоятельного газового разряда в $C_3F_8$.

Разработана конструкция и создан электромагнитный ионизационный калориметр. Оригинальные технические решения, использованные при создании калориметра, а также результаты исследований на пучках частиц могут быть использованы при создании электромагнитных калориметров для конкретных экспериментов. Разработана программа для расчёта характеристик электромагнитного газового ионизационного калориметра, основанная на параметрической модели развития ливня. Показана возможность использования $C_3F_8$ в детекторах частиц.

**Апробация работы, публикации.** Основные результаты, использованные в диссертации, были представлены на международных конференциях: Instrumentation for Colliding Beam Physics (INSTR02), IMAGING 2003, IEEE 2003 NSS&MIC, обсуждались на семинарах ОЭФ ИФВЭ. По результатам выполненных исследований имеются 3 публикации [1,2,3].

**Структура диссертации.** Работа изложена на 96 страницах, состоит из введения, четырёх глав и заключения, содержит 77 рисунков, 3 таблицы и список цитируемой литературы, включающий 40 наименований.

## Содержание диссертации

**Во введении** показана актуальность выбранной темы диссертации, отмечена новизна и практическая ценность результатов, сформулированы защищаемые положения, кратко описана структура диссертации.

**В первой** главе дан краткий обзор современных калориметрических детекторов электронов и фотонов. Рассмотрены свойства гетерогенных и гомогенных электромагнитных калориметров, их энергетическое, координатное и временное разрешения. Обсуждается влияние интеграции калориметра в экспериментальную установку на его энергетическое разрешение. Сравниваются свойства ионизационных калориметров, наполненных разными газами.

**Во второй главе** приведены устройство ионизационного газового калориметра, методика работы с таким калориметром, описание экспериментальной установки для изучения его свойств, процедуры калибровки и результаты измерения его характеристик в области энергий от 10 до 40 ГэВ. Приведены экспериментально измеренные зависимости отклика калориметра от энергии падающей частицы, напряжённости электрического поля, давления газа, толщины абсорбера.

Для изучения характеристик ионизационного газового калориметра были изготовлены 4 прототипа и проведены их испытания на пучке электронов на канале 2Б ускорителя ИФВЭ. Было измерено энергетическое разрешение прототипов калориметра и исследовано влияние конструкции, давления газа и высокого напряжения на разрешение. На рис. 1 представлена схема проведения эксперимента по измерению характеристик калориметра. Для создания триггера на проходящий электрон использовались сцинтилляционные счётчики $S_1$, $S_2$, $S_3$, $S_4$, $S_5$. Размер счётчика $S_5$ – 1см x1см. Импульс электрона определялся магнитной оптикой канала, а импульсный разброс составлял 3%.

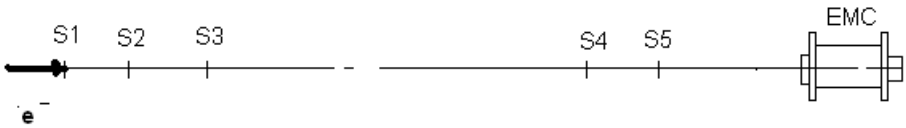


Рис. 1. Схема эксперимента: $S_1$, $S_2$, $S_3$, $S_4$, $S_5$ – сцинтилляционные счётчики, EMC – калориметр

Прототип калориметра (рис. 2, 3) представляет собой единый газовый объём (сосуд), в котором можно размещать разные сборки электродов и абсорберов. В центре переднего фланца сосуда находится отверстие с мембраной из лавсана (рис. 3) для прохождения пучка частиц. Сигналы с калориметра выводятся через вакуумноплотные разъёмы (1), расположенные на заднем фланце. Сосуд размещён на подвижной платформе. Калориметр изолирован от платформы диэлектрическими шайбами (2). Платформа позволяет перемещать прототип как вертикально, так и горизонтально относительно падающего пучка электронов с точностью ±1 мм. Изучались 4 различные структуры сборки калориметра (см. табл. 1).

Таблица 1.

| | | |
|---|---|---|
| Толщина абсорбера (мм) | 1.5 | 3 |
| Расстояние между соседними ячейками (мм) | 0.5 | 0.5 |
| | 5 | 5 |

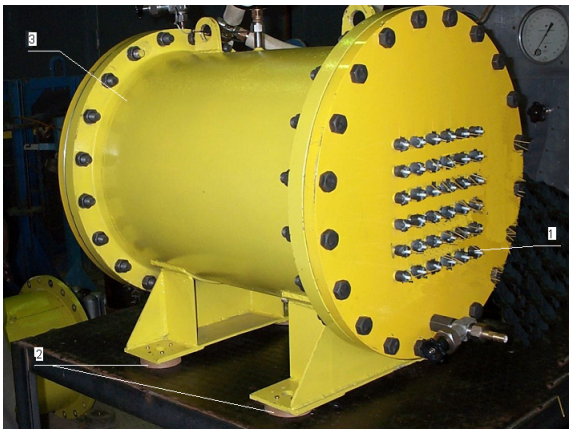


Рис. 2. Прототип электромагнитного калориметра: 1 – вакуумноплотный электрический разъём, 2 – диэлектрические шайбы, 3 – корпус калориметра.

На рис. 3 представлено устройство калориметра. Развитие ливня от падающего электрона и регистрация сигнала происходят в сборке, которая состоит из трёх модулей (6, 7, 8), закреплённых на общей подвеске 3. На общей подвеске предусмотрены специальные юстирующие устройства, обеспечивающие зазор между модулями не более 0.1 мм. Модуль калориметра состоит из чередующихся свинцовых пластин и сигнальных электродов. Общая толщина модуля составляет 21 радиационную длину.

Сигнальный электрод изготовлен из двухсторонне фольгированного стеклотекстолита толщиной 1.5 мм. Электрод разбит на 12 ячеек. Такое же количество ячеек находится на другой стороне электрода. Система: пластина абсорбера – сигнальный электрод – пластина абсорбера формируют 2 ионизационные камеры. Расстояние между сигнальным электродом и земляным равно 5±0.1 мм. Сигнал, образованный в результате продольного развития ливня, суммируется со всех ионизационных камер, образующих башню, и выводится на вакуумноплотный электрический разъём, расположенный на заднем фланце сосуда

Высокое напряжение подавалось на сигнальные электроды. Все пластины абсорбера были заземлены. Подключение низкошумящих усилителей к регистрирующим каналам калориметра осуществлялось через блокировочные ёмкости номиналом 2200 пФ х 6.3 кВ. Подача сигнала от генератора прямоугольных импульсов для калибровки каналов калориметра осуществлялась через калибровочные ёмкости номиналом 1пФ.

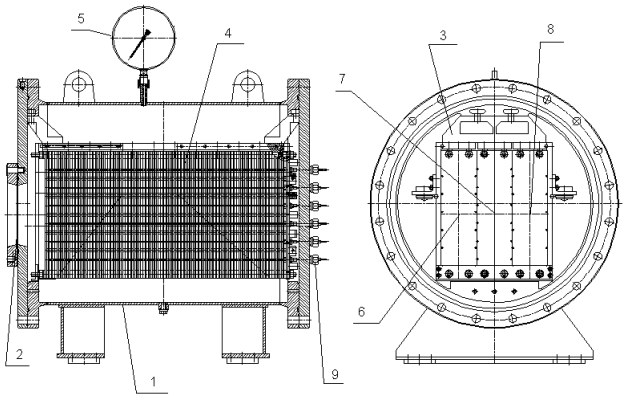


Рис. 3. Устройство газового ионизационного калориметра: 1 – общий газовый объём, 2 – мембрана, 3 – подвеска калориметра, 4 – сборка модулей, 5 – манометр, 6, 7, 8 – модули, 9 – электрический разъём.

В процессе измерений использовались 3 варианта зарядочувствительных усилителей со временем формирования 200 и 180 нс. Первые два варианта усилителей имели одинаковые шумовые характеристики. На рис. 4 представлены шумовые спектры для 1 и 9 башен, полученные для калориметра с толщиной абсорбера 3 мм и расстоянием между ячейками 0.5 мм. Среднеквадратичное отклонение $\sigma_ш$ амплитудного распределения шумового сигнала составило 6300 электронов для 1 башни и 18900 электронов для 9 башен. Сравнивая обе кривые на рис. 4, можно видеть, что вклад когерентного шума незначителен.

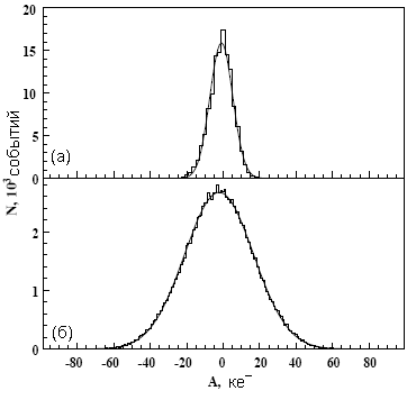


Рис. 4. Спектры шума с калориметра для одной и девяти башен, фитированные кривой Гаусса.

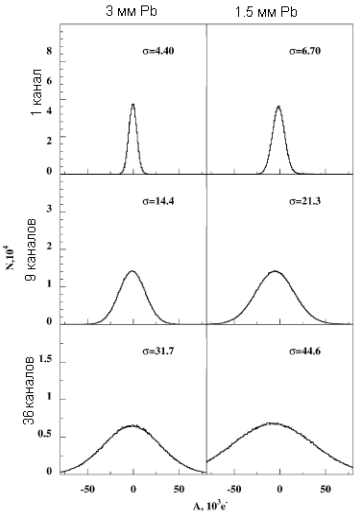


Рис.5. Спектр шума с калориметра с абсорбером толщиной 3 и 1.5 мм свинца, соответственно для 1, 9 и 36 башен.

На рис. 5 представлены шумовые спектры для калориметров с толщиной абсорбера 1.5 и 3 мм и расстоянием между соседними ячейками 5 мм. В этом случае использовался третий вариант регистрирующей электроники. Среднеквадратичное отклонение для одной башни составило 4400 электронов для калориметра с абсорбером толщиной 3 мм и 6700 для толщины абсорбера 1.5 мм. Чтобы избежать наводок от ускоряющих станций У-70, шумовые спектры со всех 36 регистрирующих каналов измерялись после окончания вывода пучка частиц в канал 2Б.

Было проведено систематическое изучение свойств прототипов калориметра в зависимости от энергия электрона, давления газа и высокого напряжения. На рис. 6 показан типичный амплитудный спектр с калориметра, фитированный кривой Гаусса. По оси абсцисс отложена амплитуда сигнала с калориметра в количестве электронов, образованных ливнем в калориметре. Данные величины получены с использованием результатов калибровки калориметра с помощью электронной калибровочной системы. Параметры кривой Гаусса – средняя величина $\overline{A}$ и дисперсия $\sigma^2$ – использовались для оценки энергетического разрешения калориметра,. которое определялось как $\frac{\sigma_c}{\overline{A}}$, где $\sigma_c = \sqrt{\sigma^2 - \sigma_b^2}$ и $\sigma_b$ – разброс частиц пучка по импульсу.

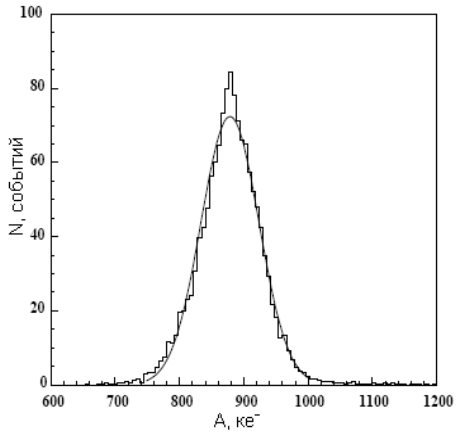


Рис. 6. Амплитудное распределение импульсов калориметра для электронов с энергией 25.6 ГэВ при давлении газа $p_{абс.}$ =1.5 атм. и высоком напряжении 1.5 кВ. Толщина абсорбера 3 мм, расстояние между ячейками 0.5 мм.

На рис. 7 представлена типичная зависимость энергетического разрешения калориметра от давления газа с квадратично вычтенным вкладом от шума электроники. Как следует из этого рисунка, энергетическое разрешение калориметра, начиная с давления газа в 1 атм., очень слабо зависит от давления газа, что позволяет снизить рабочее давление газа в калориметре без ухудшения разрешения. Такая зависимость энергетического разрешения от давления наблюдается для всех исследованных прототипов калориметра. Ограничивающим фактором при выборе рабочего давления является отношение сигнал/шум, которое зависит от конструкции калориметра и регистрирующей электроники.

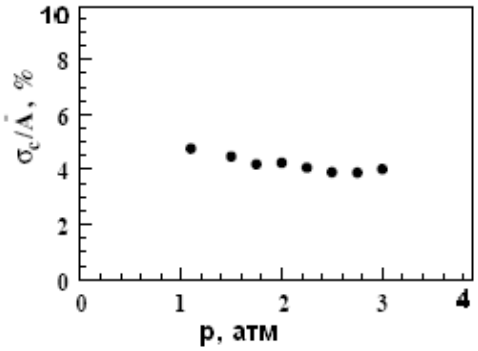


Рис. 7. Зависимость энергетического разрешения калориметра от давления газа $C_3F_8$ при энергии электронов E=25.6 ГэВ и приведённом напряжении на калориметре HV=1кВ/атм. Толщина абсорбера 3 мм, расстояние между ячейками 0.5 мм.

Важной характеристикой калориметра является его динамический диапазон и линейность отклика от энергии падающей частицы. На рис. 8 приведена зависимость средней амплитуды сигнала калориметра от энергии электрона.

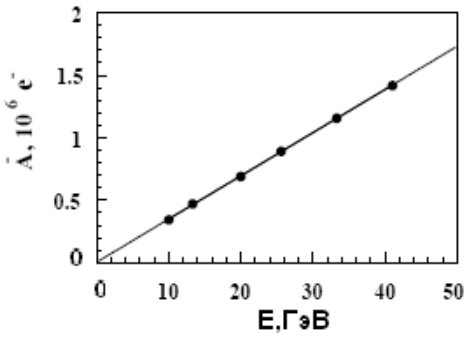


Рис. 8. Зависимость средней амплитуды сигнала с 9 башен калориметра от энергии электронов при напряжении HV=1 кВ и давлении газа $C_3F_8$ p=1.5 атм. Толщина абсорбера 3 мм, расстояние между ячейками 0.5 мм.

Видно, что она с высокой степенью точности линейна. На рис. 9 приведена экспериментальная зависимость энергетического разрешения калориметра от энергии падающей частицы.

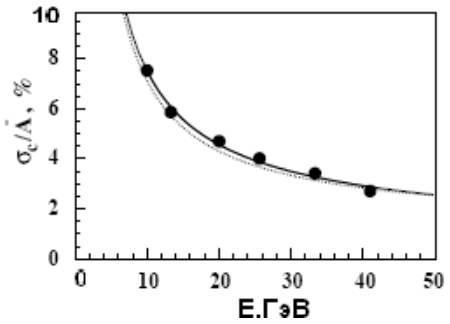


Рис. 9. Зависимость энергетического разрешения калориметра от энергии электронов при напряжении HV=1 кВ и давлении газа $C_3F_8$ p=1.5 атм. Толщина абсорбера 3 мм, расстояние между ячейками 0.5 мм.

Она хорошо фитируется формулой

$$\frac{\sigma_c}{E}(\%) = \frac{54.5 \pm 1.3}{E} \oplus \frac{16.4 \pm 0.2}{\sqrt{E}} \oplus (0.0 \pm 0.3) \qquad (1)$$

где E – энергия падающей частицы в ГэВ. Стохастический член энергетического разрешения имеет слабую зависимость от давления газа в диапазоне от 1 до 3 атм. и от приложенного высокого напряжения в диапазоне от 1 до 3.5 кВ. Энергетический эквивалент электронного шума с башни составляет для данной структуры 250 МэВ при давлении 1 атм. Постоянный член в пределах ошибки ±0.3% равен 0.

Было также проведено систематическое изучение свойств калориметра с толщиной абсорбера 3 и 1.5 мм, при расстоянии между ячейками в 5 мм и размером ячейки 4 x 4 см. При этом, для уточнения собственного энергетического разрешения калориметра, в экспериментальную установку был добавлен магнитный спектрометр для измерения импульсного разброса пучка. Целью изменений структуры ячеек служила необходимость уменьшения энергетического эквивалента электронного шума с башни калориметра. Энергетическое разрешение калориметров при разных толщинах абсорбера с вычетом вклада от электронного шума и импульсного разброса электронов представлено на рис. 10.

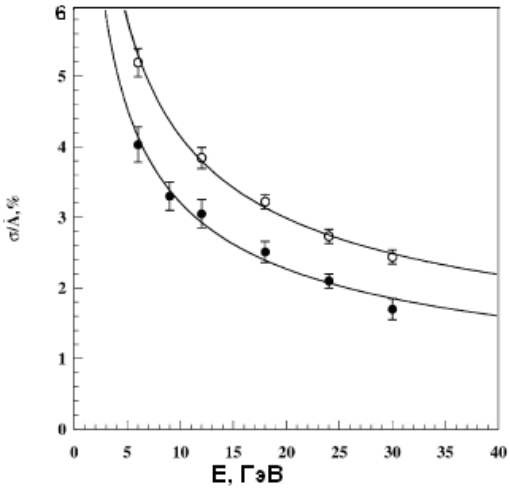


Рис.10. Зависимость энергетического разрешения калориметра от энергии электронов при давлении газа $C_3F_8$ p=1.8 атм. (● – толщина абсорбера 1.5 мм, ○ – толщина абсорбера 3 мм).

Оно может быть представлено в виде:

для калориметра с толщиной абсорбера 3 мм –

$$\frac{\sigma}{\overline{A}}(\%) = (12.9 \pm 0.6)/\sqrt{\overline{A}} \oplus (0.8 \pm 0.5), \qquad (2)$$

для калориметра с толщиной абсорбера 1.5 мм –

$$\frac{\sigma}{\bar{A}}(\%) = (10.1 \pm 0.5)/\sqrt{\bar{A}} \oplus (0.0 \pm 1.5). \qquad (3)$$

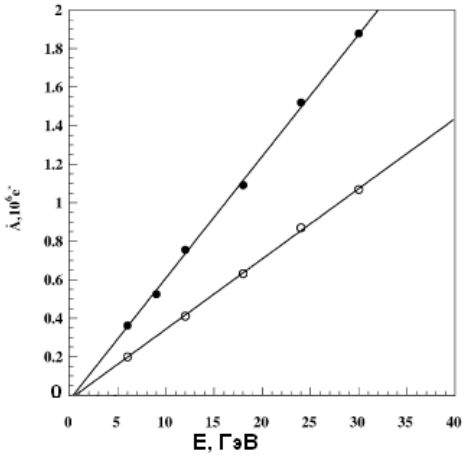


Рис. 11. Зависимость средней амплитуды сигнала калориметра от энергии электронов при давлении газа $C_3F_8$ p=1.8 атм. (● – толщина абсорбера 1.5 мм, ○ – толщина абсорбера 3 мм).

Зависимость средней амплитуды сигнала от энергии электронов для этих структур представлена на рис. 11. Полная толщина газа в случае структуры 1.5 мм свинца + 5 мм $C_3F_8$ в 2 раза больше, чем для структуры 3 мм свинца + 5 мм, что и отражено в величине амплитуд сигналов с калориметров.

Зависимости энергетического разрешения калориметров с разными толщинами абсорберов от давления газа $C_3F_8$ представлены на рис. 12. Видно, что энергетическое разрешение слабо зависит от давления, начиная с 0.9 атм. Для данных калориметров был также измерен энергетический эквивалент шума и он составил 180 МэВ/атм. для 3 мм абсорбера, 150 МэВ/атм. для 1.5 мм абсорбера.

В заключение необходимо отметить следующее:

1. Энергетическое разрешение газовых калориметров сравнимо с энергетическим разрешением жидкоаргоновых.
2. Энергетическое разрешение калориметра, начиная с давления газа близкого к атмосферному, слабо зависит от давления.
3. Отношение сигнал/шум зависит от давления газа и собственной ёмкости башен калориметра. Показано, что можно достичь энергетического эквивалента шума с 1 башни 150 МэВ/атм.

Отсюда можно сделать важный практический вывод, что во многих случаях возможна замена жидкоаргоновых калориметров на более простые и дешёвые газовые, которые имеют все преимущества жидкоаргоновых калориметров, за исключением, возможно, отношения сигнал/шум.

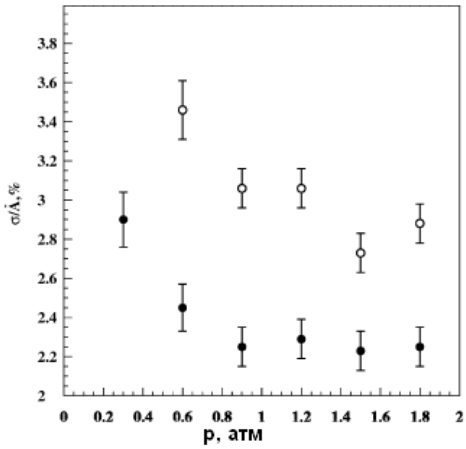


Рис. 12. Зависимость энергетического разрешения калориметра от давления газа $C_3F_8$ при энергии электронов E= 25.6 ГэВ (● – толщина абсорбера 1.5 мм, ○ – толщина абсорбера 3 мм).

**В третьей главе** рассматриваются особенности работы цилиндрических и плоскопараллельных счётчиков, наполненных $C_3F_8$, в ионизационном режиме и в режиме несамостоятельного газового разряда, представлены результаты изучения свойств газового разряда в зависимости от напряжённости электрического поля в газовом промежутке, приведены зависимости амплитудного разрешения от типа ионизации, рассмотрена возможность измерения чистоты $C_3F_8$ методом измерения тока в цилиндрическом счётчике, работающем в ионизационной моде.

Относительно большая плотность $8.4 \cdot 10^{-3}$ г/см$^3$ и высокая скорость дрейфа электронов делают $C_3F_8$ привлекательным не только для использования в калориметрии, но и в других газовых детекторах, в том числе и с газовым усилением. Так, например, для минимально ионизирующей частицы на одном сантиметре пути при атмосферном давлении в $C_3F_8$ образуется около 400 электрон-ионных пар. Указанные выше свойства могут позволить создать высокоэффективные, быстрые детекторы с толщиной в «субмиллиметровом» диапазоне.

Свойства $C_3F_8$ были подробно изучены применительно к его использованию в высоковольтных разрядниках-обострителях. В этих работах приведены данные по коэффициенту Таундсена и коэффициенту захвата электронов. Отме-

чается, что сечение захвата электронов простирается от 1 до 5 эВ и коэффициент прилипания (нормированный на плотность газа) $\eta/N$ зависит от плотности газа и температуры. Как видно из рис. 13, при низких значениях приведённой напряжённости электрического поля до $E/N \approx 20 \cdot 10^{-17}$ В·см$^2$ коэффициент прилипания электронов незначителен и резко возрастает с ростом $E/N$. На том же рисунке изображён коэффициент Таундсена. Видно, что лавинное размножение начинается с $E/N \approx 120 \cdot 10^{-17}$ В·см$^2$ и величины коэффициента прилипания и коэффициента Таундсена сравниваются при $E/N \approx 300 \cdot 10^{-17}$ В·см$^2$. Сильная зависимость коэффициента прилипания от давления в области $E/N \geq 40 \cdot 10^{-17}$ В·см$^2$ делает неочевидным применение $C_3F_8$ в качестве активной среды газовых детекторов. Поэтому нами были проведены дополнительные измерения и расчёты, подтвердившие перспективность использования $C_3F_8$ в детекторах частиц. Были изучены 2 типа детекторов, наполненных $C_3F_8$: с плоским однородным внутренним электрическим полем (случай плоскопараллельного счётчика), резко неоднородным радиальным полем (случай цилиндрического счётчика).

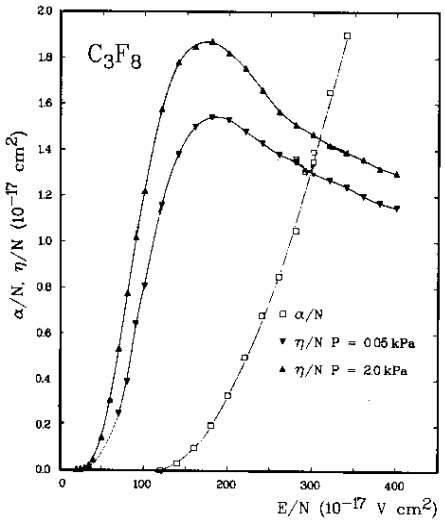


Рис. 13. Зависимость коэффициента Таундсена и прилипания от приведённой напряжённости электрического поля.

Используя зависимости коэффициента Таундсена и прилипания от приведённой напряжённости электрического поля, представленные на рис.13, была оценена вероятность выживания 1 электрона при дрейфе через плоскопараллельный счётчик с толщиной газового промежутка в 1 мм, заполненного газом $C_3F_8$

в зависимости от напряжённости электрического поля в промежутке (рис. 14). Как следует из этого рисунка, можно выделить три области:

1. Область А – в этой области коэффициент прилипания и коэффициент Таундсена близки к нулю. В этой области реализуется режим ионизационной камеры с полным сбором заряда.
2. Область Б – область, в которой коэффициент прилипания доминирует. Область начинается, когда электроны приобретают энергию свыше 1 эВ, и простирается до 5 эВ. Условно можно назвать эту область «мёртвой».
3. Область В – область, где происходит процесс лавинного размножения электронов.

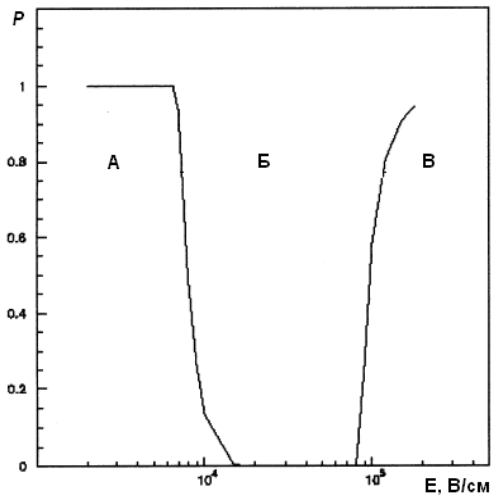


Рис. 14. Вероятность выживания одного электрона при прохождении 1 мм газа $C_3F_8$.

Опираясь на эти расчёты, можно выбрать область работы калориметра, наполненного газом $C_3F_8$. Очевидно, что для достижения наилучшего энергетического разрешения необходимо работать в области А – области с полным сбором ионизационного заряда.

На рис. 15 приведена зависимость средней амплитуды сигнала с 9 башен калориметра от напряжения, показывающая, что в ионизационной моде возможен полный сбор электронов. Работать в области газового усиления невыгодно из-за сильных флуктуаций газового усиления в плоскопараллельной камере, ухудшающих энергетическое разрешение калориметра, хотя при этом отношение сигнал/шум будет лучше. Кроме того, в случае работы в режиме газового усиления существенно возрастают требования к точности изготовления системы электродов

калориметра, и необходимо использование высокостабильного высоковольтного источника.

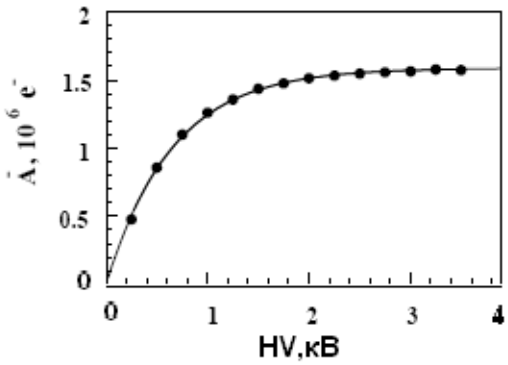


Рис. 15. Зависимость средней амплитуды сигнала с 9 башен калориметра от напряжения при давления газа $C_3F_8$ p=3 атм. при энергии электронов E=25.6 ГэВ.

Работа в области Б невозможна, стабильная работа в области лавинного усиления (В) для плоскопараллельного счётчика при давлении газа чуть выше атмосферного оказалась также невозможна из-за самостоятельных пробоев. В случае цилиндрического счётчика зависимости коэффициента Таундсена и коэффициента прилипания представлены на рис. 16.

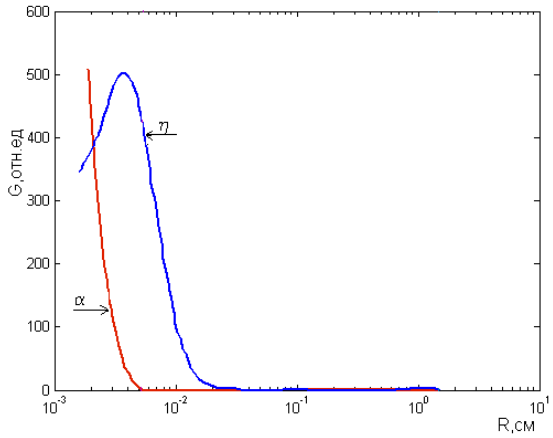


Рис. 16. Зависимость коэффициентов Таундсена α и прилипания η от радиуса в цилиндрическом счётчике.

Если счётчик работает в ионизационном режиме, то зависимости коэффициентов Таундсена α и прилипания η от радиуса в цилиндрическом счётчике как показано на рис. 17.

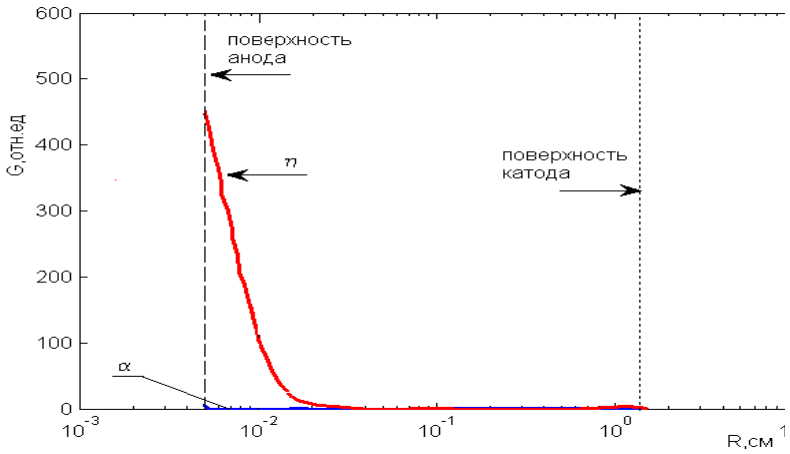


Рис. 17. Зависимость коэффициентов Таундсена и прилипания от радиуса в цилиндрическом счётчике при напряжении 1 кВ. Диаметр катода – 3 см, анода – 100 мкм.

Как можно видеть из рис. 17, коэффициенты Таундсена и прилипания равны нулю в широком диапазоне от 200 мкм и до 1,5 см. Резкое возрастание коэффициента прилипания начинается на 3 радиусах анодной проволоки, в то время как лавинное усиление при таком напряжении на счётчике не начинается. Исходя из этого, можно сделать вывод, что в случае работы цилиндрического счётчика в ионизационной моде происходит неполное собирание электронов (величина зависит от приложенного напряжения и геометрических параметров счётчика). На рис. 18а изображена зависимость доли дошедших до анода электронов от точки попадания частицы с точечной ионизацией. Возрастание доли электронов на расстояниях меньших 200 мкм объясняется уменьшением длины пути электронов, образованных в результате взаимодействия регистрируемой частицы в области с сильным прилипанием. На рис. 18б представлена доля дошедших до анода электронов в зависимости от расстояния трека до анода. Для протяжённой ионизации коэффициент усиления почти постоянен, начиная от анода и до половины радиуса катода, а дальше начинает заметно влиять уменьшение длины трека.

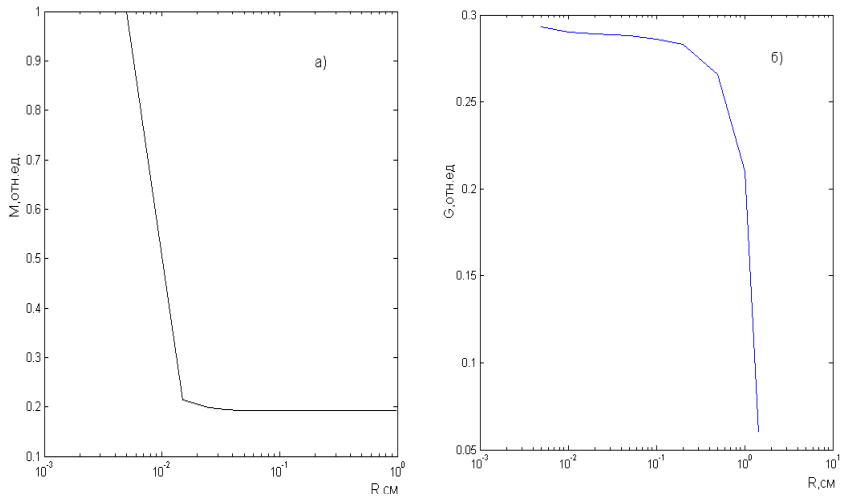


Рис. 18. Зависимость доли дошедших до анода электронов в цилиндрическом счётчике с диаметром катода 3 см и диаметром анода 100 мкм: а) от радиуса образования электрона при регистрации рентгеновского фотона (точечная ионизация); б) от расстояния между анодом и треком ионизирующей частицы (протяжённая ионизация).

Экспериментальное наблюдение вышеперечисленных зависимостей в ионизационной моде представляет сложную задачу, но её можно упростить, если работать в моде лавинного усиления.

Нами была исследована работа четырёх цилиндрических счётчиков с диаметром катода 10 мм и диаметрами анодов 11, 20, 50, 100 мкм. Отрицательное высокое напряжение подавалось на катод. Сигнал с анода подавался на вход низкошумящего предусилителя, выполненного на основе интегральной схемы EL2074 с усилением G ≈ 20, полосой пропускания 75 МГц и уровнем шума, приведённым ко входу, 2.2 нВ√Гц. Для измерений формы сигналов и амплитудных спектров со счётчиков использовался цифровой осциллограф TDS724 с шириной полосы 500 МГц. Изучался отклик счётчиков на ионизацию рентгеновскими фотонами от радиоактивного источника $Fe^{55}$ и от β-источника $Sr^{90}$. Источник $Fe^{55}$ обеспечивал точечную ионизацию газа счётчика. $Sr^{90}$ находился в магнитном монохроматоре, с помощью которого вырезались электроны с энергией около 2 МэВ, и обеспечивал ионизацию, аналогичную минимально ионизирующим частицам. Все тесты проводились с $C_3F_8$ с чистотой 99.99 и 99%.

На рис. 19а приведены счётные характеристики счётчиков с анодными проволоками разного диаметра. Была также измерена эффективность регистрации заряженной частицы для счётчика с диаметром анода 20 мкм. Она составила ~ 10%.

На рис. 19б представлены зарядовые характеристики для проволок с разными диаметрами. Надо отметить достаточно большую величину заряда лавины, которая находится в диапазоне от 0.3 до 10 пК. Для сравнения: в смеси Ar+50%$CO_2$ переход в СГС-режим начинается при заряде около 2 пК.

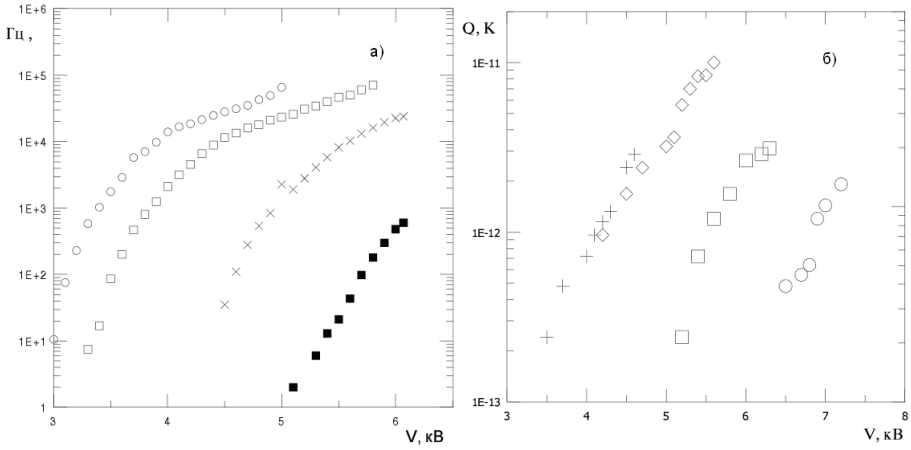


Рис. 19. Счётные (а) и зарядовые (б) характеристики счётчика от приложенного напряжения для анодной проволоки с диаметрами: а) o – 11мкм, – 20 мкм, × – 50 мкм, ■ – 100 мкм; б) + – 11 мкм, ◊ – 20 мкм, – 50 мкм, ○ – 100 мкм.

На рис. 20 приведены сигналы (наблюдаемые на осциллографе с нагрузкой 50 Ом на входе без усиления) со счётчика с диаметром анодной проволоки 11 мкм от $Fe^{55}$ (точечная ионизация) и от $Sr^{90}$ (протяжённая ионизация). Характерной особенностью сигналов для всех диаметров проволок является то, что длительность сигнала по основанию составила 2–3 нс как для $Fe^{55}$, так и для $Sr^{90}$, причём амплитуда сигнала больше для $Sr^{90}$. Было измерено также относительное амплитудное разрешение счётчика для разных диаметров анода от $Fe^{55}$ и от $Sr^{90}$ (после магнитного монохроматора). Разрешение для всех проволок составило ~50% для $Fe^{55}$ и ~ 30% для $Sr^{90}$.

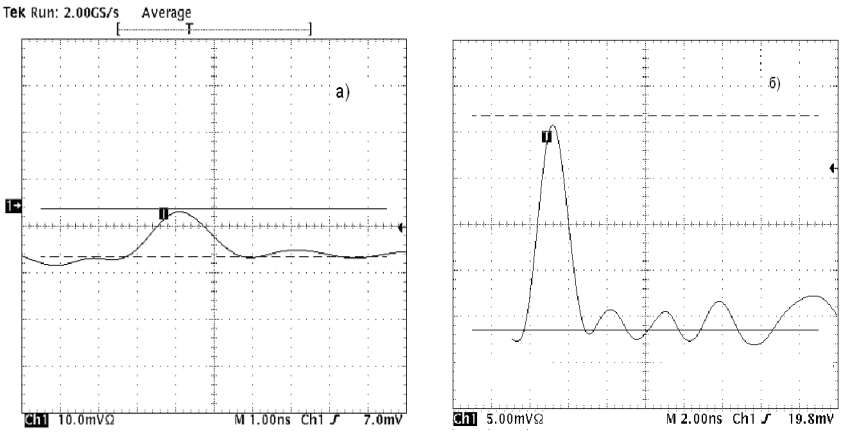


Рис. 20. Сигналы от счётчика, наполненного $C_3F_8$, с анодной проволокой диаметром 11 мкм при напряжении 4.5 кВ на в ходе осциллографа с нагрузкой 50 Ом: а) $Fe^{55}$ (точечная ионизации); б) $Sr^{90}$ (протяжённая ионизация).

**В четвёртой главе** рассматривается параметрическая модель развития электромагнитного ливня в газовом ионизационном калориметре. Сравниваются параметры модели в случае развития ливня в разных газообразных средах, проводится сравнение экспериментальных результатов для газового калориметра с результатами моделирования, полученными с использованием пакета Geant и с помощью параметрической модели.

Свойства газового калориметра изучались как на тестовых пучках (см. главу 2), так и с помощью моделирования. В процессе изучения калориметра с помощью моделирования преследуются различные цели – изучение его свойств, физический анализ, быстрая оценка характеристик. При физическом анализе требуется большое количество смоделированных событий. Необходимое время генерации таких событий увеличивается с ростом энергии, поглощённой в калориметре, и количеством событий. Поэтому генерация большого количества событий с использованием пакетов GEANT или EGS4 занимает слишком много времени. Используя параметрическую модель развития ливня, можно существенно сократить время вычислений без ущерба для точности.

Целью данной работы являлась параметризация развития электромагнитного ливня в газовых калориметрах и сравнение характеристик калориметра, наполненного различными газами: Ar, Xe, $C_3F_8$, а также жидким аргоном. Развитие электромагнитного ливня в калориметре моделировалось с помощью пакета GEANT и затем параметризовалось с использованием известных соотношений.

Результаты параметризации развития ливня в двух структурах газового калориметра, описанных в главе № 2 диссертации, сравнивались с расчётами, проведёнными с помощью пакета GEANT и экспериментальными данными.

Параметризация основана на том, что развитие отдельного ливня в продольном направлении можно аппроксимировать гамма-распределением:

$$\left\langle \frac{1}{E}\frac{dE(t)}{dt} \right\rangle = \frac{(\beta_i t)^{\alpha_i - 1}\beta_i \exp(-\beta_i t)}{\Gamma(\alpha_i)} \tag{4}$$

где индекс $i$ показывает, что рассматривается отдельный ливень.

Чтобы смоделировать продольный профиль ливня, кроме средних величин $T$ (глубина максимума ливня) и $\alpha$ (параметр формы ливня) нужно знать флуктуации и корреляции этих величин. Используется тот факт, что логарифмы величин этих параметров имеют нормальное распределение.

Зависимость среднеквадратичного отклонения от величины $y=E/E_c$, где $E$ – энергия падающей частицы, $E_c$ – критическая энергия:

$$\sigma = \left(a_1 + a_2 \ln y\right)^{-1} \tag{5}$$

а корреляция между $lnT$ и $ln\alpha$ даётся следующим выражением:

$$\rho\,(\ln T, \ln \alpha) = b_1 + b_2 \ln y \tag{6}$$

где $a_1$, $a_2$, $b_1$, $b_2$ – константы, зависящие от вещества.

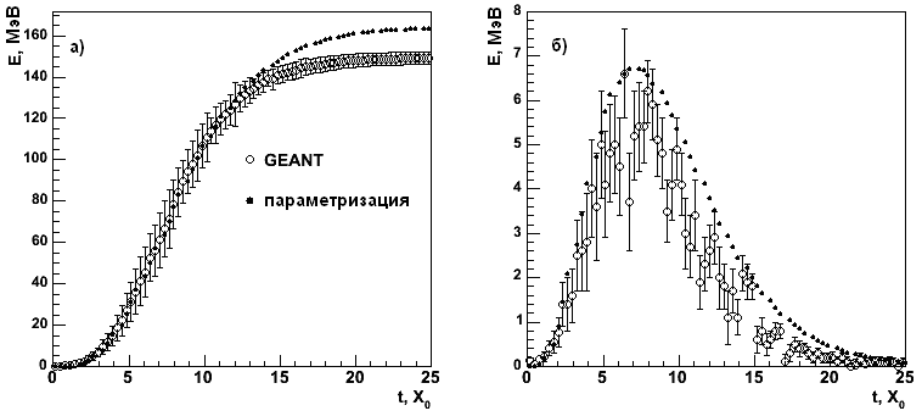


Рис. 21. Интегральное (а) и дифференциальное (б) распределения энергии ливня для калориметра с толщиной абсорбера 1.5 мм (∘ – GEANT, • – параметризация, газ – $C_3F_8$, давление 1.5 атм.).

На рис. 21 приведено интегральное и дифференциальное распределения энергии ливня для калориметра с толщиной абсорбера 1.5 мм. Из рис. 21 видно, что параметрическая модель хорошо согласуется с расчётами по программе GEANT до глубины 12 $X_0$ , где происходит основное выделение энергии ливня. После 12 $X_0$ наблюдается разница в поведении, обусловленная недостаточной точностью учёта энергии мягких электронов ливня. Подобные распределения были получены не только для калориметров, наполненных $C_3F_8$, но и для газов *Ar* и *Xe*.

Поперечное развитие ливня в гетерогенном калориметре можно параметризовать следующим образом:

$$f(r) = p \cdot f_C(r) + (1-p) \cdot f_T(r) = p \cdot \frac{2 \cdot r \cdot R_C^2}{(r^2 + R_C^2)^2} + (1-p) \cdot \frac{2 \cdot r \cdot R_T^2}{(r^2 + R_T^2)^2} \qquad (7)$$

$0 \le p \le 1$

Первое слагаемое отвечает “ядру” ливня, второе описывает “хвост” ливня, где коэффициенты $R_C$ $(R_T)$ – медианы данных компонент, а $p$ – вероятность, отражающая относительный вес компоненты “ядра” ливня. Оказалось, что параметры $R_C$, $R_T$, $p$ для разных газов отличаются незначительно и параметр $R_T$ практически не зависит от $Z_{eff}$ в отличие от жидкого аргона. Из рис. 22 видно, что поперечное распределение энергии ливня, вычисленное с помощью параметрической модели, находится в хорошем соответствии с результатами моделирования с использованием пакета GEANT. По оси абсцисс отложен поперечный размер калориметра в единицах размера ячейки (4.5 см). Хорошее согласие наблюдается также для других рассмотренных газов.

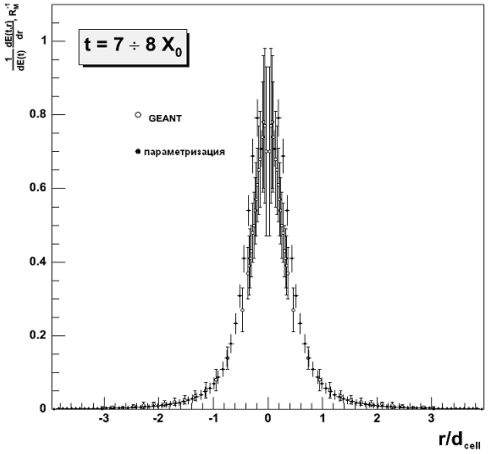


Рис. 22. Поперечный профиль электромагнитного ливня в калориметре с абсорбером толщиной 1.5 мм на глубине $8X_0$ (◦ – GEANT, • – параметризация) для газа $C_3F_8$.

На рис. 23, 24 показаны зависимости энергетического разрешения калориметра от энергии падающего электрона и давления газа. Также на данных рисунках проведено сравнение экспериментальных данных с расчётами по параметрической модели и с использованием пакета GEANT.

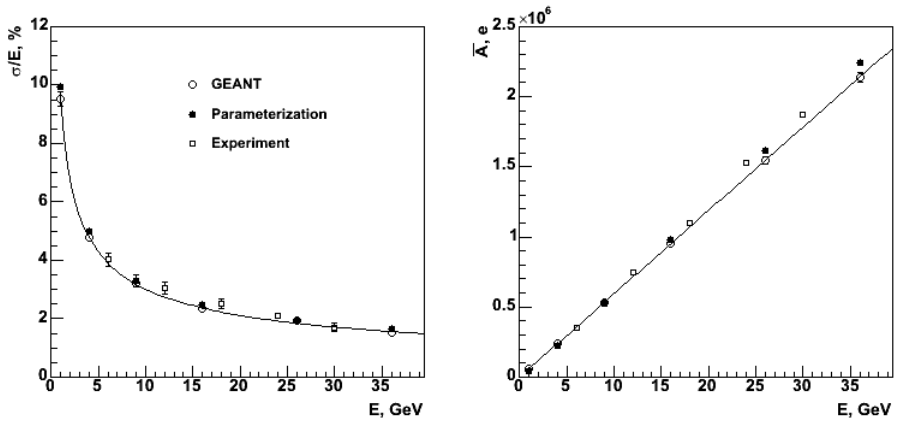


Рис. 23. Зависимость энергетического разрешения и сигнала с калориметра с абсорбером толщиной 1.5 мм от энергии пучка электронов (○ – GEANT, ● – параметризация, □ – эксперимент).

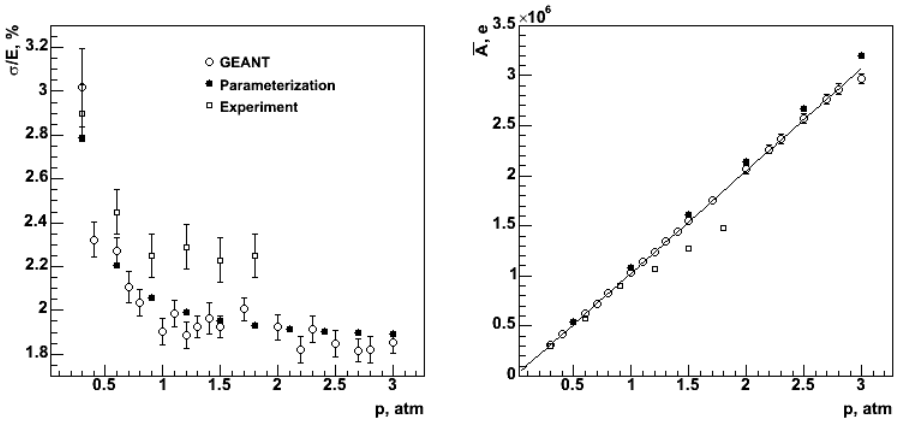


Рис. 24. Зависимость энергетического разрешения и сигнала с калориметра с абсорбером толщиной 1.5 мм от давления газа (○ – GEANT, ● – параметризация, □ – эксперимент).

По результатам моделирования и экспериментальным данным можно сделать вывод, что энергетическое разрешение не зависит от давления газа выше 0.9 атм., а при более низких давлениях энергетическое разрешение ухудшается. Экспериментальная зависимость среднего сигнала от давления нелинейна из-за наличия электроотрицательных примесей в газе, причем количество примесей было выше при изучении прототипа с тонкой структурой, что отражается в большем отклонении экспериментальных точек от прямой линии. При моделировании примеси не учитывались. Сравнение данных показывают, что параметрическое моделирование способно предсказать экспериментальные данные с калориметра с точностью достаточной для генерации большого количества Монте-Карло-событий, необходимых для физического анализа, и увеличить скорость их генерации примерно в 1000 раз.

**В заключении** кратко сформулированы основные результаты диссертации:

1. Разработаны и созданы газовые ионизационные электромагнитные калориметры типа «сэндвич» с конверторами из свинца толщиной 1.5 и 3 мм. Полная толщина конверторов – около 21 радиационной длины. Впервые в калориметрах такого типа в качестве рабочего газа был использован тяжёлый фреон $C_3F_8$, что позволило значительно (вплоть до одной атм.) снизить давление рабочего газа и, как следствие, заметно упростить конструкцию детектора и его эксплуатацию.
2. Выполнен цикл исследований характеристик калориметров на пучках электронов с энергией E от 10 до 40 ГэВ. Исследования проводились на канале 2Б ускорителя ИФВЭ.
3. Получено, что стохастический член в формуле для энергетического разрешения составляет $10\%/\sqrt{E}$ при толщине конверторов 1.5 мм и не зависит от давления, начиная с 1 атм., а постоянный член равен 0 в пределах ошибок измерений (несколько десятых процента).
   Энергетический эквивалент уровня шума составляет 150 МэВ при давлении $C_3F_8$ одна атмосфера и размере ячейки («башни») 45x45 мм$^2$ и уменьшается обратно пропорционально росту давления. Столь хорошие характеристики для газовых ионизационных калориметров получены впервые. Они позволяют сделать практически важный вывод: во многих случаях газовые калориметры могут заменить значительно более дорогие и сложные в эксплуатации жидкоаргоновые калориметры.
4. Исследованные калориметры обладают высокой однородностью. Это связано с тем, что в них, в отличие, например, от калориметров со сцинтилляционными счётчиками, отсутствует неконтролируемое усиление сигнала, а калибровка регистрирующей электроники проста и надёжна.
5. Важным свойством разработанных калориметров является их очень высокая радиационная стойкость, которая при условии периодической

замены рабочего газа определяется только конструктивными материалами и может достигать нескольких Град.

6. Исследованы характеристики цилиндрических счётчиков, наполненных $C_3F_8$, как в ионизационном режиме, так и в режиме газового усиления. В режиме газового усиления длительность сигнала со счётчика составляет 2–3 нс. по основанию при амплитуде 10–20 мВ. на нагрузке 50 Ω, причём форма сигнала не зависит от характера ионизации. Амплитуда сигнала оказалась больше для протяжённой ионизации по сравнению с локальной, что согласуется с проведёнными в диссертационной работе расчётами. Основным недостатком детектора является сравнительно низкая эффективность, составляющая около 10% и связанная с большой величиной коэффициента "прилипания" дрейфующих электронов к молекулам $C_3F_8$ в области больших электрических полей.
7. Развита параметрическая модель распространения электромагнитного ливня в газовых ионизационных калориметрах, которая позволяет быстро рассчитать характеристики калориметра с точностью, требуемой при физическом анализе данных.

Автор глубоко благодарен члену-корреспонденту РАН С.П. Денисову за постановку задачи и научное руководство.

Исследования, изложенные в настоящей диссертации, выполнены совместно с В.А. Беззубовым, Ю.В. Гилицким, В.М. Кораблёвым, А.М. Рыбиным, Н. Н. Федякиным, М.О. Лобановым, Л.Л. Курчаниновым, А.В. Солиным, В.И. Суздалевым, К.В. Суздалевым, В.В. Тихоновым, А.В. Ферапонтовым.

Автор признателен В.А. Беззубову, Ю.М. Гилицкому за многочисленные обсуждения, замечания и конструктивную критику.

Автор благодарен дирекции ИФВЭ за поддержку экспериментальной программы «ГАЗ», в рамках которой была выполнена эта работа.

## Список литературы

[1] V. Bezzubov, S. Denisov, **S. Erin**, A. Ferapontov, Yu. Gilitsky, V. Korablev, M. Lobanov, A. Rybin, A. Solin, V. Suzdalev. The performance of a gas electromagnetic calorimeter. . Nucl. Instrum. Meth. A 525:38-41, 2004.

[2] V. Bezzubov , S. Denisov , **S. Erin** , A. Ferapontov , Yu. Gilitsky , V. Korablev, L. Kurchaninov , M. Lobanov , A. Rybin , A. Solin , V. Suzdalev , V. Tikhonov. A gas ionization electromagnetic calorimeter filled with $C_3F_8$. Nucl. Instrum. Meth. A 494:369-372, 2002.

[3] H. Abramowicz, R. Ingbir, S. Kananov, A. Levy, K. Afanasev, V. Druga- kov, I. Emelyanchik, N. Shumeiko, F. Zyazyulya, S. Denisov, **S. Erin**, A. Rybin, V.Suz-dalev,R. Dollan, D. Drachenberg, E. Kuznetsova, R. Kwee, W. Lange, W. Lohmann, M. Luz, A. Stahl, A. Kowal, J. Lukasik, L. Suszycki, D. Miller, I. Minashvili, N. Rusakovich, U. Nauenberg, B. Pawlik, W.Wierba, V. Vrba, J. Zachorowski. Instrumentation of the very forward region of a linear collider detector. IEEE Trans. Nucl. Sci. 51:2983-2989, 2004.

*Рукопись поступила 3 октября 2008 г.*

С.В. Ерин
Разработка и исследование электромагнитных газовых калориметров.

Редактор Л.Ф. Васильева.

Подписано к печати 10.10.2008. Формат 60x84/16. Офсетная печать.
Печ.л. 1,6. Уч.-изд.л. 1,82. Тираж 100. Заказ 65. Индекс 3649.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
142281, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т 2008–18, И Ф В Э, 2008