

**Государственный научный центр Российской Федерации
Институт Теоретической и Экспериментальной Физики
им. А. И. Алиханова**

На правах рукописи

Волошин Кирилл Геннадьевич

**РАЗРАБОТКА И ОПТИМИЗАЦИЯ ПЛОСКО-ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ КАМЕР
ДЛЯ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ ПРОЛЕТА
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ЭКСПЕРИМЕНТА ALICE**

Специальность 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

МОСКВА 2007 г.

УДК 539.1.074.2

Работа выполнена в ГНЦ РФ «Институт теоретической и экспериментальной физики им. А. И. Алиханова»

Научный руководитель: кандидат физ.-мат. наук С. В. Кулешов
(ГНЦ РФ ИТЭФ, г. Москва)

Официальные оппоненты: доктор физ.-мат. наук С. В. Семенов
(ГНЦ РФ ИТЭФ, г. Москва)

кандидат техн. наук В. А. Канцеров
(МИФИ, г. Москва)

Ведущая организация: Научно-исследовательский институт
ядерной физики им. Д. В. Скобельцына
(НИИЯФ МГУ, г. Москва)

Защита состоится 18 декабря 2007 года в 11 часов на заседании диссертационного совета Д.201.002.01 в конференц-зале ГНЦ РФ ИТЭФ по адресу:
г. Москва, ул. Б. Черемушкинская, д. 25.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГНЦ РФ ИТЭФ.

Автореферат разослан 14 ноября 2007 года.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук

В. В. Васильев

1. Общая характеристика работы

1.1. Актуальность темы

Единственным доступным способом лабораторного исследования свойств ядерной материи при высокой (≥ 1 ГэВ/фм³) плотности энергии является столкновение ультрарелятивистских тяжелых ионов во встречных пучках или с фиксированными ядерными мишенями. Главной задачей таких экспериментов является поиск и исследование кварк-глюонной плазмы (КГП) – особого состояния вещества, которое характеризуется большим количеством степеней свободы, представленных свободными кварками и глюонами. Глубоко неупругие процессы, происходящие во время столкновений тяжелых ядер, могут приводить к образованию очень большого числа частиц (адронов, фотонов, электронов) с высоким поперечным импульсом. Для идентификации этих частиц должны быть использованы установки, способные эффективно и точно работать в условиях крайне высокой множественности. В частности, идентификация заряженных адронов методом измерения времени пролета (TOF) требует создания большой по площади высокогранулярной эффективной системы с временным разрешением на уровне 100 пс.

В 2008 году в Европейской организации ядерных исследований (ЦЕРН, Швейцария–Франция) стартует эксперимент ALICE, который продолжит научные программы экспериментов, проводившихся ранее на ускорителе SPS в ЦЕРН и ныне действующих экспериментов на ускорителе RHIC в BNL (США). Установка ALICE использует возможности Большого Адронного Коллайдера (БАК) и оптимизирована для изучения столкновений встречных пучков ионов свинца с энергией 5.5 ТэВ на нуклонную пару в с.ц.м. Ожидаемая множественность заряженных адронов при этом составляет $dN/d\eta \leq 8000$ (η – псевдобыстрота). Для успешной их идентификации система ALICE-TOF, имеющая форму барреля с внутренним радиусом 3.7 м и закрывающая диапазон $|\eta| \leq 0.9$, должна состоять примерно из 150 000 каналов, обладать временным разрешением на уровне 100 пс и эффективностью регистрации частиц с минимальной ионизацией (MIP), близкой к 100%. Создание такой системы на основе сцинтилляторов и фотоумножителей труднореализуемо – прежде всего, по соображениям стоимости. В качестве альтернативы в рамках эксперимента ALICE детально изучались различные варианты плоско-параллельных газовых детекторов: искровые счетчики Пестова с электродами из низко-резистивного стекла, заполненные электрически-перенапряженным газом под давлением 12 атм, и разработанная группой ИТЭФ абсолютно новая методика TOF, использующая камеры, работающие в ограниченно-лавинном режиме газового

усиления. После многолетних исследований выбор был сделан в пользу последнего варианта.

1.2. Цели диссертационной работы

Диссертация посвящена первым этапам развития новой методики TOF, выполненным в рамках R&D для эксперимента ALICE на основе опытных образцов плоско-параллельной камеры (ППК). Обнадеживающие результаты испытаний одиночных ППК позволили довести эту работу до создания функциональных прототипов многоканальных модулей TOF, удовлетворяющих требованиям эксперимента, пригодных для массовой сборки и оптимизированных для интеграции в большую систему.

Основные цели настоящей работы:

1. Подтверждение принципиальной возможности использования газовых детекторов плоско-параллельной геометрии, работающих в ограниченно-лавинном режиме газового усиления, для эффективного и высокоточного измерения времени пролета ионизирующих частиц на примере ППК;

2. Моделирование работы ППК на основе простейшей теории лавинного газового разряда для уточнения методов обработки сигналов с камеры и для оптимизации различных ее параметров;

3. Поиск оптимальных параметров ППК для системы ALICE-TOF, включая геометрию камеры, материалы электродов, точность изготовления механических деталей, технологию производства, состав газовой смеси, напряженность электрического поля, электронный канал и пр.;

4. Разработка и реализация методов обработки сигналов с ППК;

5. Разработка, создание и испытания прототипов многоканальных систем TOF, основанных на ППК;

6. Выявление основных недостатков ППК и обсуждение путей их преодоления.

1.3. Научная новизна и практическая ценность работы

Целенаправленные усилия экспериментальной группы, в составе которой работает диссертант, привели к созданию современных надежных и недорогих детекторов, позволяющих осуществлять эффективную идентификацию частиц в ядерных ускорительных экспериментах. Помимо эксперимента ALICE, эта методика, безусловно, найдет применение во многих будущих установках, требующих прецизионных измерений времени пролета в условиях высокой множественности частиц и при высоких нагрузках.

Основные достижения настоящей работы:

1. Впервые продемонстрирована принципиальная возможность использования ограниченно-лавинного режима газового усиления для получения точной временной привязки при регистрации ионизирующего излучения;

2. Детально измерены амплитудные и временные спектры одно- и двухзазорных модификаций ППК при различных условиях;
3. Впервые на опыте продемонстрирована зависимость эффективности плоско-параллельных газовых детекторов от количества газовых зазоров;
4. Впервые, на примере ППК, получено временное разрешение плоско-параллельного газового детектора на уровне 200 пс при эффективности регистрации не ниже 95%, намечены пути улучшения этих характеристик;
5. Собраны и испытаны прототипы многоканальных модулей TOF на основе ППК, продемонстрирована их работоспособность, изучена вероятность наводок между каналами внутри модулей.

1.4. Результаты, выносимые на защиту

1. Результаты многочисленных испытаний различных модификаций ППК и сборок из них, проводившихся на ускорителях в ИТЭФ и ЦЕРН.
2. Результаты моделирования газового разряда в плоско-параллельном зазоре, их сравнение с результатами испытаний, оптимизация параметров ППК на основе результатов моделирования.
3. Амплитудные и временные спектры, полученные на различных модификациях ППК с использованием разнообразных газовых смесей.
4. Существенное увеличение эффективности ППК за счет введения электроотрицательных добавок в газовую смесь.
5. Существенное увеличение эффективности ППК за счет использования двух и более газовых зазоров.
6. Успешное применение метода $T-A$ -коррекции при обработке сигналов с ППК для получения наилучшего временного разрешения.
7. Вероятность и происхождение «больших» сигналов в ППК.
8. Оптимальные параметры ППК и электронного канала, соответствующие требованиям эксперимента ALICE.
9. Конструкция и результаты испытаний 32- и 512-канальных прототипов модулей TOF, собранных из ППК.

1.5. Личный вклад диссертанта

1. Диссертант сделал основной вклад в создание методов обработки результатов испытаний ППК, включая выбор оптимального способа $T-A$ -коррекции.
2. Диссертант участвовал в сборке и эксплуатации тестового пучка для испытаний ППК в ИТЭФ, отвечал за обслуживание газового стенда.
3. Диссертант впервые произвел компьютерное моделирование флуктуаций развития электронной лавины в ППК с целью предсказания ее временных свойств.

4. Диссертант участвовал в многочисленных методических сеансах по испытанию ППК в ИТЭФ и ЦЕРН, занимался обработкой и анализом данных.

5. Диссертант принимал непосредственное участие в подготовке выносимых на защиту результатов к публикации.

1.6. Апробация работы и публикации

Основой содержания диссертации являются материалы двух статей, опубликованных в российском журнале «Приборы и техника эксперимента». Кроме того, история развития ППК изложена в инженерно-техническом отчете (TDR) системы ТОФ эксперимента ALICE. Часть результатов, представленных в диссертации, докладывалась на семинаре ИТЭФ 13 ноября 2002 г.

Представленная работа была выполнена в лаборатории 211 ИТЭФ в сотрудничестве с другими лабораториями ИТЭФ, на пучке 212 ускорителя У-10 в ИТЭФ, на ускорителях PS и SPS в ЦЕРН. Работа выполнена при финансовой поддержке Росатома. Часть работы выполнена при поддержке гранта РФФИ № 99–02–18377.

2. Краткое содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Основные выводы диссертации и итоги работы приведены в заключении. Объем диссертации составляет 76 страниц, она содержит 47 рисунков, 4 таблицы и 41 наименование цитируемой литературы.

Во введении обобщенно рассматривается феноменология релятивистской физики тяжелых ионов, описан фазовый переход материи из КГП в адронное состояние, проанализированы перспективы воспроизведения и изучения деконфайнмента в лабораторных условиях.

Согласно КХД, фазовый переход *кварки + глюоны* → *адроны* характеризовался энергией $\Lambda_{\text{QCD}} \approx 200$ МэВ и произошел, когда возраст Вселенной составлял ~ 10 мкс. Этот переход сопровождался спонтанным нарушением киральной симметрии – фундаментальным явлением, ответственным за наличие масс у связанных кварков. Расчеты в трехкварковой модели предсказывают, что при нулевой барионной плотности адронизация плазмы происходит в узком интервале температур вблизи $T_c \approx 190$ МэВ, что соответствует плотности энергии $\varepsilon_c \sim 1$ ГэВ/фм³. При столкновениях ионов на ускорителях RHIC и БАК плотности энергии в области взаимодействия могут превосходить порог ε_c на времена порядка $5 - 10$ фм/с ($\sim 10^{-23}$ с). В этом случае становится вероятен фазовый переход, близкий к сценарию ранней Вселенной.

К основным признакам деконфайнмента следует отнести: термодинамические параметры и их флуктуации, наблюдаемые через посылбыйные изменения множественности заряженных частиц dN/du , среднего поперечного им-

пульса $\langle p_T \rangle$ и плотности поперечной энергии $dE_T/dy \big|_{y=0}$; степень термодинамического равновесия и вязкость среды, наблюдаемые через эллиптический поток v_2 ; размер взаимодействующей системы, наблюдаемый через узкие корреляции пионов и каонов; бариохимический потенциал, наблюдаемый через изменение отношения выходов $\pi/K/p$; рождение струй с большим поперечным импульсом и их подавление в плотной ядерной среде; изменение масс и ширины мезонов, рожденных в плотной среде (в частности, изменение ширины распада $\phi \rightarrow K^+K^-$); модификации спектров прямых фотонов из области взаимодействия; подавление рождения тяжелых кваркониумов и др. Установка ALICE разработана для регистрации совокупности этих признаков.

В первой главе дано общее описание физической программы эксперимента ALICE, а также конструкции и предназначения основных детекторных систем установки. Рассмотрен метод идентификации заряженных адронов на основе измерения времени пролета. Перечислены требования, предъявляемые к системе ALICE-TOF.

Эксперимент ALICE – единственный из экспериментов на БАК, специально посвященный изучению столкновений тяжелых ионов высоких энергий.

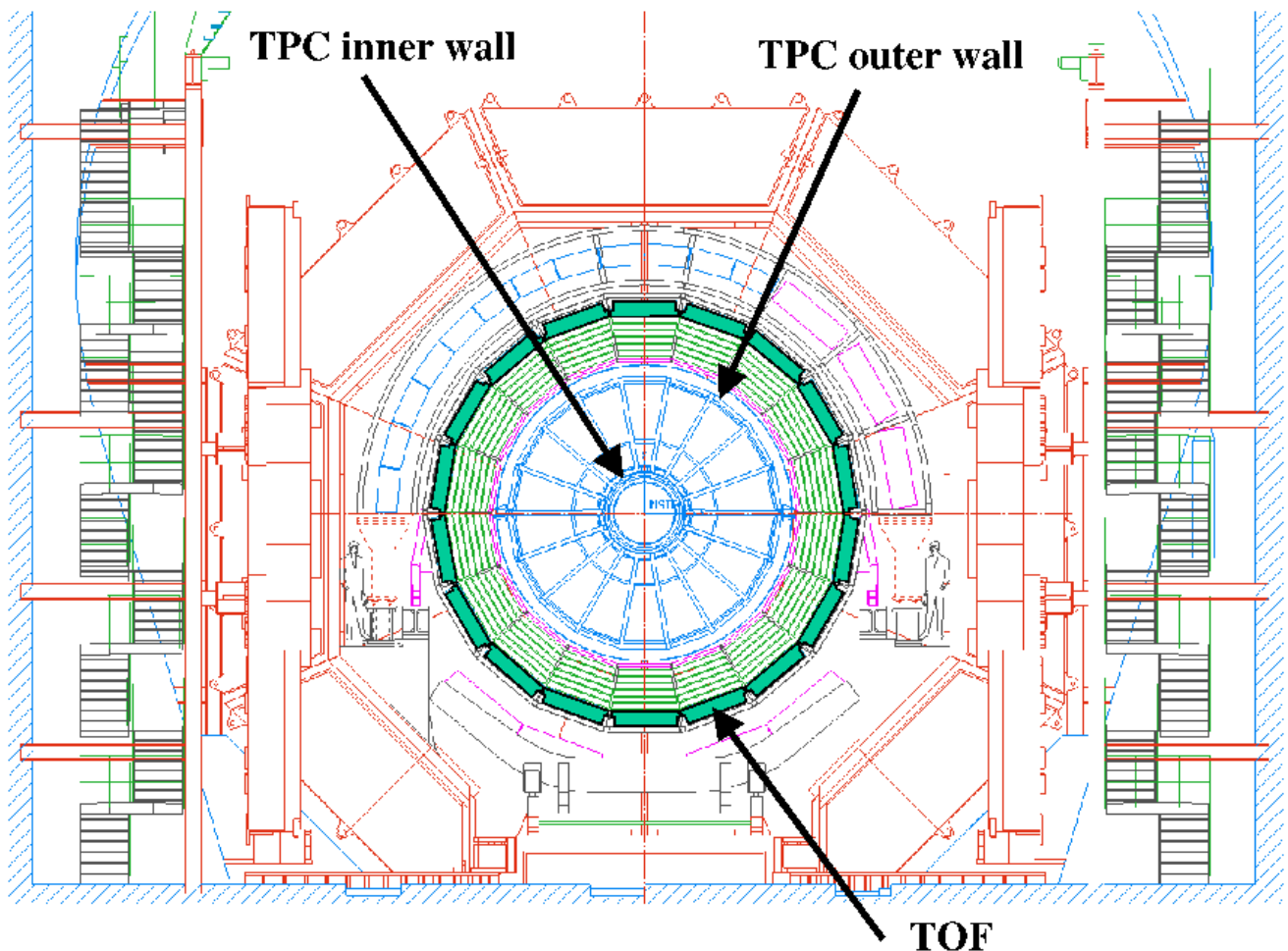


Рис. 1. Поперечный вид детектора ALICE с указанием положения системы TOF.

Он оптимизирован для работы со встречными пучками ионов свинца с энергиями до 5.5 ТэВ на нуклонную пару в с.д.м., что в 30 раз выше энергий, доступных ныне действующему ускорителю RHIC. Большую часть продуктов столкновений в ALICE будут составлять мягкие адроны с поперечной кинетической энергией < 2 ГэВ. В рамках существующих моделей верхняя оценка множественности адронов в центральной области установки составляет $dN/dy|_{\max} \approx 8000$.

Система ALICE-TOF предназначена для пособытийной идентификации адронов в среднем диапазоне импульсов, а именно: пионов и каонов с импульсами до 2.5 ГэВ/с и протонов с импульсами до 4 ГэВ/с. Как показано на рис. 1, система, выполненная в форме барреля, будет покрывать полный азимутальный угол в центральной части ALICE (диапазон псевдобыстрот $|\eta| \leq 0.9$), площадь детектора составит 140 м² с общим числом каналов около 150 000 при размере отдельного канала около 3×3 см. Временное разрешение системы должно находиться в пределах 120 пс при эффективности регистрации MIP, близкой к 100%.

Во второй главе проведено сравнение известных методов измерения времени пролета заряженных частиц: сцинтилляционных счетчиков с ФЭУ, счетчиков с кремниевыми фотодиодами, искровых счетчиков Пестова и плоско-параллельных камер.

Традиционный метод TOF на основе сцинтилляторов и фотоумножителей (Sci + PMT) получил самое широкое распространение в экспериментальной физике и применяется, в частности, почти во всех пучковых установках для формирования триггеров. Временное разрешение сцинтилляционных счетчиков находится на уровне 50 – 80 пс, эффективность регистрации MIP составляет 100%. В ядерных экспериментах используются массивы таких счетчиков с числом каналов до тысячи и выше, однако создание сцинтилляционных систем с сотнями тысяч каналов вряд ли возможно – прежде всего, из-за крайне высокой стоимости. Кроме того, использование фотоумножителей в магнитном поле является технически сложной задачей.

С недавнего времени исследуется возможность использования для время-пролетных измерений сцинтилляционных и черенковских счетчиков, в которых считывание света осуществляется кремниевыми лавинными фотодиодами, работающими в гейгеровском режиме (Sci + SiPM). Первые данные свидетельствуют о том, что сцинтилляционные счетчики с поперечным сечением 3×3 мм способны обеспечить временное разрешение на уровне 30 – 40 пс. Эффективность таких детекторов определяется множеством факторов, систематизированные данные пока не публиковались.

Искровые счетчики Пестова были изобретены в 1970-х годах и активно исследовались в рамках R&D для ALICE-TOF. Принцип их работы основан на возникновении искрового пробоя в перенапряженном газе, находящемся под высоким давлением (10 – 12 атм) в сильном однородном электрическом поле.

Для локализации разряда и подавления послеимпульсов электроды счетчиков Пестова изготавливаются из низко-резистивного стекла; в газовой смеси присутствует высокая концентрация квенчирующих добавок, абсорбирующих ультрафиолет во избежание фотоэффекта на катодах. Повышенное давление и высокое напряжение представляют собой основные технические трудности при эксплуатации больших систем на основе счетчиков Пестова. Временное разрешение счетчиков составляет около 30 пс, однако их временной спектр содержит заметную примесь задержанных сигналов («хвостов»), что крайне критично для условий ALICE.

Ограниченно-лавинный метод TOF был впервые изучен в рамках представленной работы и R&D для ALICE-TOF. Предпосылкой к его изучению стало соображение, что электронная лавина, развивающаяся в газе при напряженности электрического поля, не достаточной для возникновения искры, в принципе может обеспечивать хорошую привязку во времени, поскольку в плоской геометрии сигнал, наведенный на электродах, возникает сразу с началом движения электрического заряда в газе. Небольшая (по сравнению с искрой) величина разряда в этом случае должна приводить к улучшению счетных характеристик детектора, замедлять процесс старения, а также позволять обойти многие технологические проблемы, свойственные искровой методике. С другой стороны, малая амплитуда сигнала требует разработки высокочувствительной и быстродействующей электроники, что невозможно без хорошего представления о форме импульса с камеры, которого к началу исследований не существовало. Работу, таким образом, следовало строить последовательно, сочетая изучение и моделирование лавинного сигнала с оптимизацией конструкции камеры и конструированием электронного канала. Отправной точкой для исследований предложенного метода стал простейший вариант камеры – ППК.

Тип детектора TOF	Эффективность к MIP, %	Характерное временное разрешение, пс	Ориентировочная стоимость массива 1 м ² , k\$ США
Sci + PMT	100	50 – 80	200 (размер канала 5 × 5 см)
Счетчики Пестова	100	30	80
ППК	95	200	30 (размер канала 5 × 5 см)
MRPC	99	50	80 (размер канала 3.5 × 2.5 см)
Sci + SiPM	—	30 – 80	—

Табл. 1. Сравнение основных вариантов времяпролетных детекторов в контексте большой системы TOF. Стоимость включает измерительную электронику.

Сводное сравнение основных параметров систем TOF, основанных на разных вариантах времяпролетных детекторов, приведено в табл. 1.

В третьей главе описана конструкция и принцип работы ППК, произведено моделирование сигнала с камеры на основе элементарной теории электронной лавины, описан первый этап исследований образцов ППК на тестовой пучковой установке в ИТЭФ и его основные результаты, включая введение T - A -коррекции и использование электроотрицательных добавок в газовой смеси.

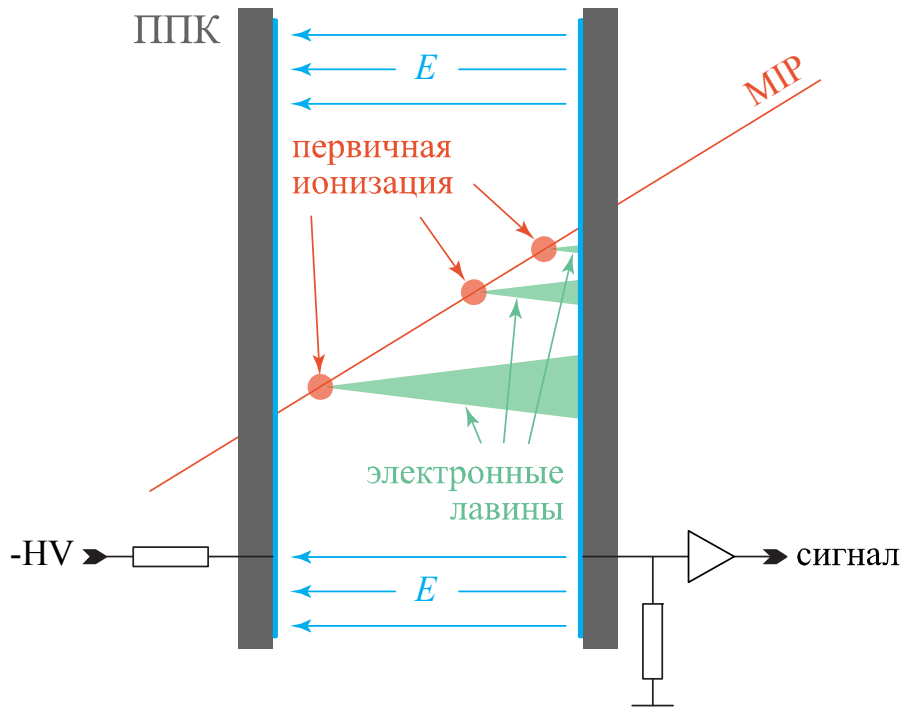


Рис. 2. Схематическая конструкция и принцип работы ППК.

В простейшем варианте ППК представляет собой однозорный газонаполненный детектор, работающий в ограниченно-лавинном режиме газового усиления при атмосферном давлении (см. рис. 2). Он состоит из двух проводящих электродов, удерживаемых на расстоянии 0.5 – 2 мм друг от друга. Плоскостность и параллельность внутренних поверхностей электродов выдерживаются с точностью 5 – 10 мкм – тем аккуратнее, чем уже зазор. Общая толщина камеры зависит от материала и дизайна и, как правило, составляет несколько миллиметров. Высокое электрическое поле (напряженностью 2 – 6 кВ/мм, выбираемое в зависимости от используемой газовой смеси и ширины зазора) способствует немедленному усилению начальной ионизации в любой точке рабочего объема камеры. Движение и рост электронной лавины мгновенно наводит быстрый (с временем роста ~ 1 нс) сигнал на электродах, за которым в течение нескольких микросекунд следует сигнал, вызванный дрейфом положительных ионов. В зависимости от выбранного газа можно достичь величины газового усиления $10^3 - 10^4$, сохраняя при этом низкую вероятность пробоя.

Если отвлечься от объемных зарядов внутри камеры, то развитие электронной лавины в однородном электрическом поле описывается уравнением

$$n(t) = n_0 \exp(\alpha v_{\text{др}} t), \quad 0 \leq t \leq \frac{d - x_0}{v_{\text{др}}}$$

где n_0 – количество электронов в кластере первичной ионизации, α – первый коэффициент Таунсенда, $v_{\text{др}}$ – средняя скорость дрейфа электронов, d – ширина газового зазора, а x_0 – расстояние от катода до места возникновения кластера. Сигнал, наведенный между электродами в процессе развития лавины, определяется выражением

$$I(t) = -\frac{q_e n_0 v_{\text{др}}}{d} \exp(\alpha v_{\text{др}} t),$$

где q_e – элементарный заряд. Компьютерное моделирование работы ППК учитывало флуктуации количества и размера пар первичной ионизации в газе, их расположения в объеме детектора, а также статистические флуктуации ионизирующих столкновений на начальном этапе развития лавины, которые оказывают основное влияние на амплитуду сигнала и, следовательно, на время его регистрации. Время срабатывания ППК определялось, как момент, когда интегральный заряд от тока во внешней цепи превышает порог чувствительности формирователя (составлявший не менее 3 фКл, что обусловлено уровнем шумов на входе усилителя). В качестве рабочего газа предполагался чистый изобутан, напряженность поля равнялась 5 кВ/мм. На рис. 3 представлены характерные результаты моделирования работы камеры. Независимые расчеты со-

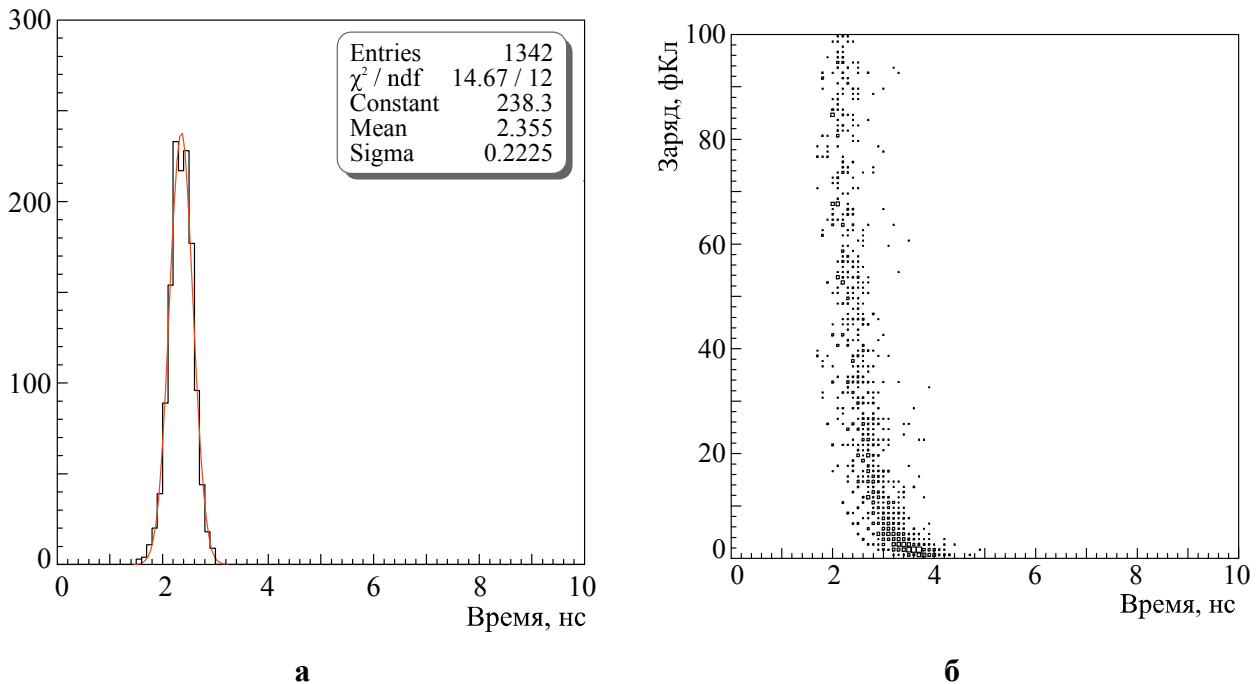


Рис. 3. Результаты моделирования работы ППК: **а** – временное разрешение, **б** – зарядово-временное распределение сигналов.

шлись в том, что собственное временное разрешение ППК должно составлять около 100 – 250 пс. Эти данные вошли в инженерно-технический отчет (TDR) системы ALICE-TOF.

Пилотные образцы ППК имели металлические и металлизированные (Cr, Au, Cu) керамические электроды, кроме того была сконструирована камера с регулируемой извне (от 0.5 до 2 мм) шириной зазора. Размеры камер колебались от 20×20 до 50×50 мм. Многокомпонентные газовые смеси были основаны на CO_2 , $i\text{-C}_4\text{H}_{10}$, Ar, имели различные рабочие диапазоны напряженности электрического поля и различные абсорбции к собственному ультрафиолету. Быстрое усиление сигнала с камеры осуществлялось в две стадии: посредством предусилителя и главного усилителя. Испытания ППК проводились на пучке 212 протонного синхротрона ИТЭФ, в качестве ионизирующих частиц использовались пионы и протоны с импульсами в диапазоне 1.6 – 10 ГэВ/с, интенсивность пучков достигала 10^5 с^{-1} , размер пучка в области камеры составлял несколько квадратных сантиметров.

Анализ двумерного распределения в координатах времени пролета T и заряда A выявил устойчивую нелинейную корреляцию между T и A , которая делает возможной автономную коррекцию результатов измерений. На рис. 4 показано одно из первых надежных наблюдений T – A -зависимости в ППК. При полной ширине распределения TOF порядка 1 нс введение T – A -коррекции улучшило результат примерно до 400 пс. Эта величина включала в себя разрешение измерительной электроники, которая на тот момент составляла 200 – 250 пс. Собственное разрешение камеры, таким образом, оказалось равным 280 – 320 пс, что согласуется с результатами моделирования. Впоследствии, T –

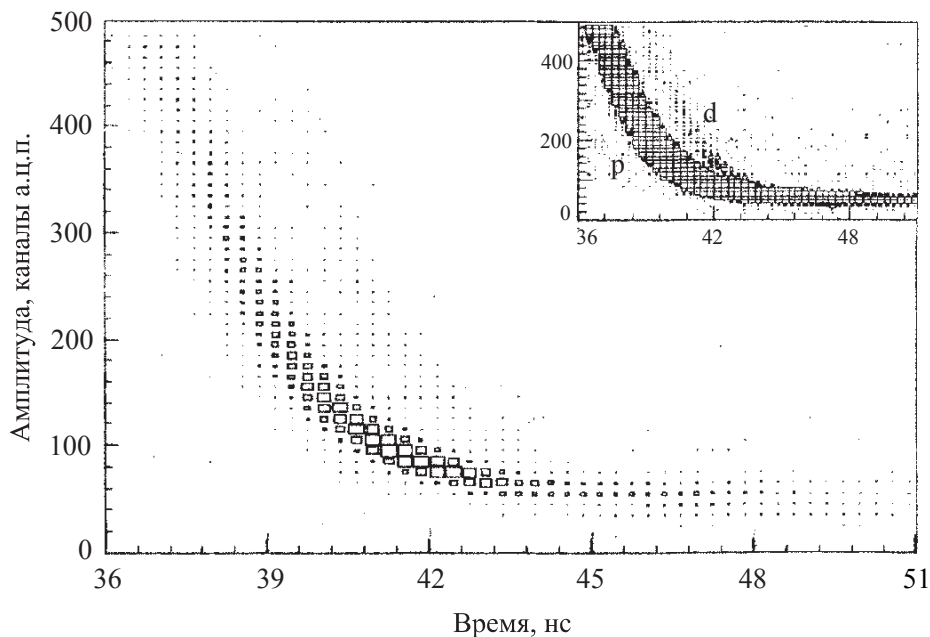


Рис. 4. T – A -распределение сигналов с ППК. Заметна возможность визуального разделения частиц с разной ионизационной способностью.

A-коррекция стала обязательным этапом анализа данных с разнообразных вариантов газонаполненных детекторов, работающих по принципу ППК.

В четвертой главе описаны конструкция и испытания двухзазорной ППК, рассказано о систематическом подборе оптимальных параметров камеры (ширина зазоров, материал электродов, состав газовой смеси, характеристики электронно-измерительного канала, рабочее напряжение и пр.), рассмотрены краевые и поверхностные эффекты, а также происхождение и вероятность сигналов с большой амплитудой.

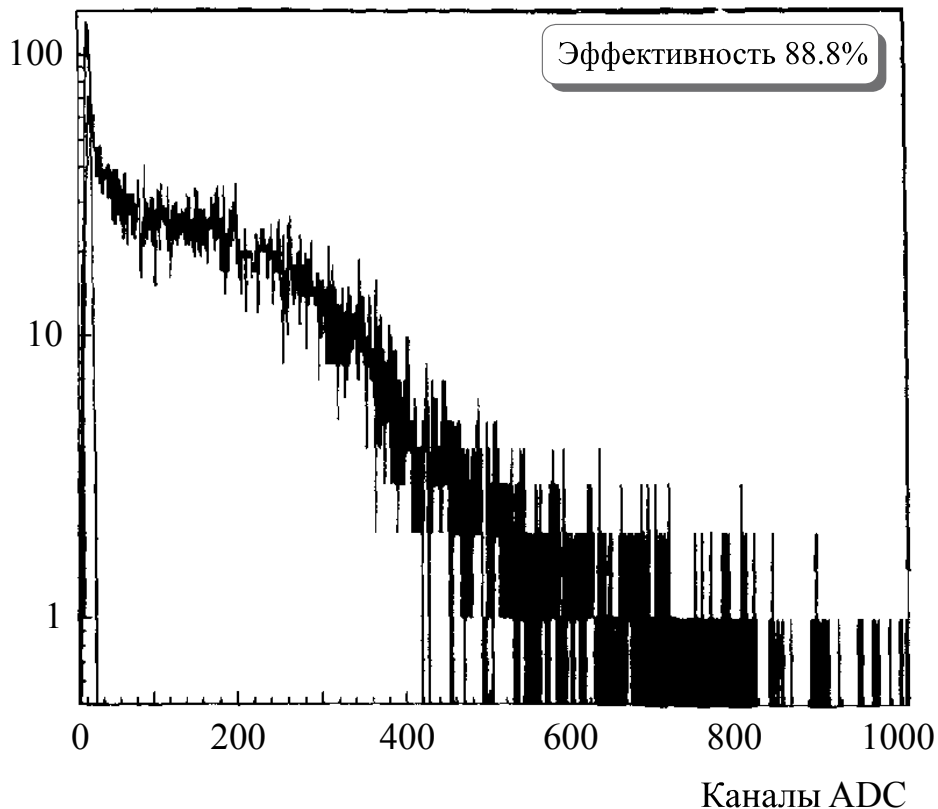


Рис. 5. Амплитудный спектр двухзазорной ППК (канал ADC = 0.25 фКл).

С целью улучшения характеристик ППК группой ИТЭФ была предложена симметричная двухзазорная конструкция камеры со съемом сигнала с центрального электрода. Согласно расчетам, амплитудный спектр двухзазорной ППК должен иметь отстоящий от нуля максимум, и с помощью подбора порога можно, таким образом, отсечь шумы камеры и электроники без значительной потери эффективности. Уже первые измерения подтвердили это заключение: рис. 5 показывает амплитудный спектр ППК, измеренный с использованием смеси аргона и изобутана с небольшой добавкой CF_3Br .

Из принципа работы ППК следует, что чем уже газовый зазор, тем лучше собственное временное разрешение камеры. С другой стороны, уменьшение газового зазора приводит к меньшей величине сигнала и, как следствие, к падению эффективности. Компенсация этого эффекта за счет увеличения напря-

женности поля ограничена условием сохранения низкой вероятности пробоя, которая становится существенной при $ad \approx 20$. В результате специальных испытаний, проведенных в ИТЭФ и ЦЕРН, ширина зазора 0.6 – 0.65 мм была признана лучшей, поскольку обеспечивала эффективность регистрации выше 90% при временном разрешении вблизи 200 пс во всем амплитудном диапазоне сигналов.

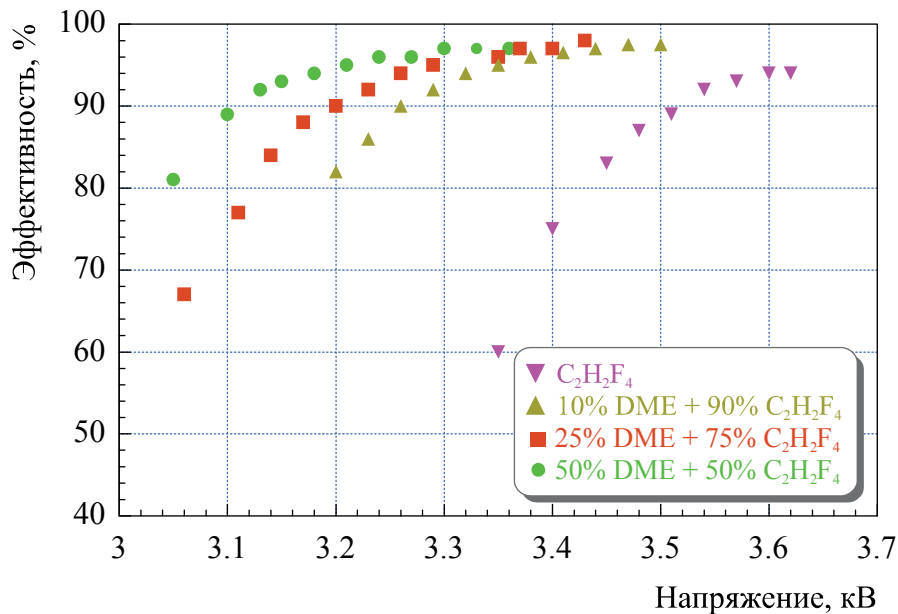


Рис. 6. Значения эффективности двухзазорной ППК с шириной зазора 0.6 мм, полученные на смеси DME и C₂H₂F₄ в различных пропорциях.

Рабочая газовая смесь должна обладать максимальной пробивной напряженностью электрического поля в сочетании с высокой плотностью первичной ионизации. При этом основная компонента смеси должна иметь большое сечение поглощения резонансного ультрафиолета, необходимое для снижения вероятности образования стримеров. Было обнаружено, что использование диметилового эфира DME и негорючего газа C₂H₂F₄ вместо i-C₄H₁₀, а позднее и вместо Ar, значительно увеличивало отношение сигнал-шум и эффективность регистрации МПР, которая достигла 95 – 98% в пределах высоковольтного плато шириной более 200 В (см. рис. 6). Кроме того, важным свойством газовой смеси является наличие и концентрация электроотрицательной компоненты, от которой зависят эффективность и работоспособность камеры. Первоначально в качестве такой добавки использовался фреон CF₃Br, однако в соответствии с европейскими экологическими стандартами он был заменен на SF₆. В дальнейшем пришлось отказаться и от использования DME, оказывавшего вредное влияние на материалы камеры и газовой системы. Окончательный выбор был остановлен на смеси 85% C₂H₂F₄ + 5% i-C₄H₁₀ + 10% SF₆ (процентное соотношение может незначительно изменяться), которая в дальнейшем тексте упоминается, как «стандартная».

Специально для работы с ППК был разработан электронный канал с передним фронтом на выходе усилителя около 2 нс и с общим усилением 12 В/пКл. Уровень шумов, приведенный ко входу усилителя, составил менее 5000 электронов и слабо (на уровне 80 электронов/пФ) зависил от емкости детектора. Полный вклад электроники во временное разрешение камеры был доведен примерно до 120 пс. Амплитуда заряда, собираемого с ППК при использовании «стандартной» газовой смеси, при этом составила в среднем 100 фКл, что привело к примерно двукратному выигрышу в отношении сигнал-шум.

При выборе материала для изготовления пластин ППК исследовались керамика, стекло, пластик и металл. Все типы электродов, за исключением пластиковых, дистанцировались друг от друга упорами из кварцевых волокон, упоры же пластиковых электродов были заложены в их конструкцию. Результаты измерений показали, что камеры с электродами из всех указанных мате-

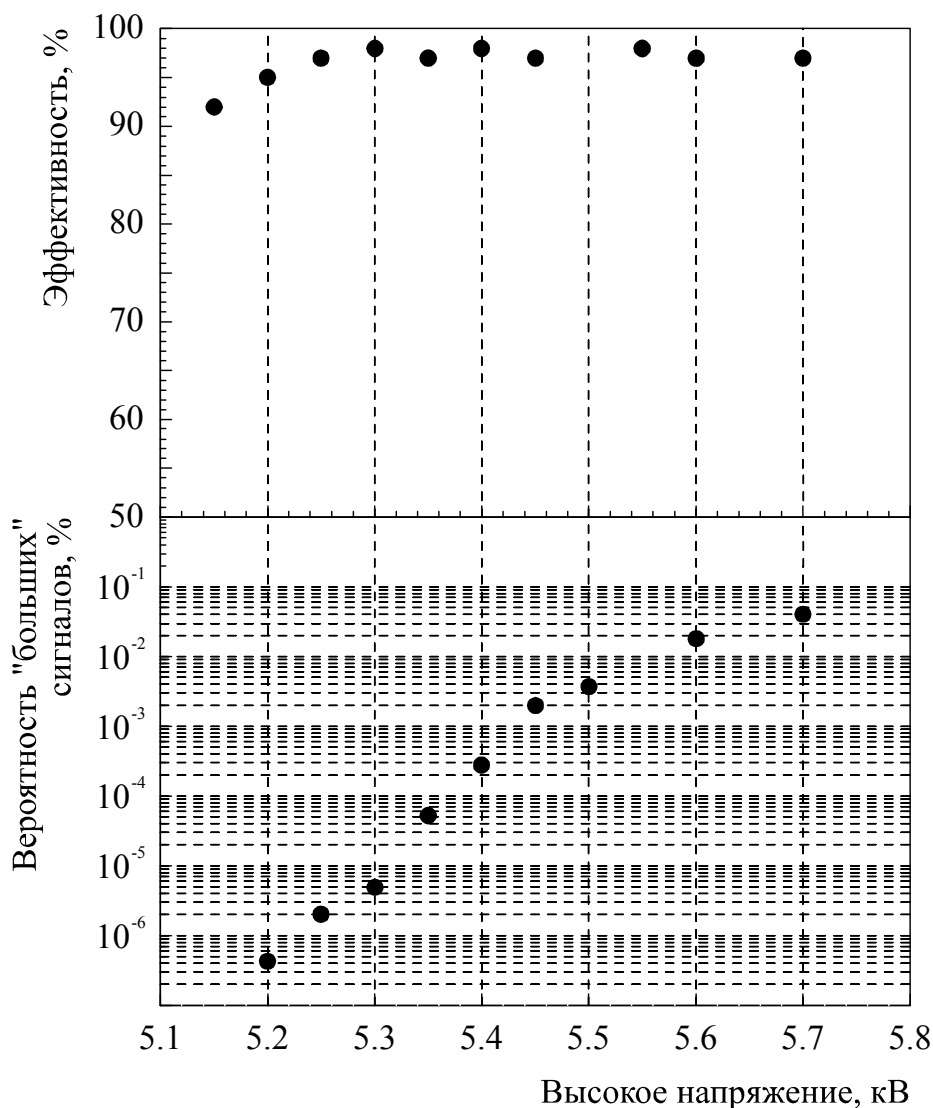


Рис. 7. Эффективность ППК и вероятность «больших» сигналов в зависимости от высокого напряжения для смеси 68% Ar + 30% i-C₄H₁₀ + 2% freon.

риалов обладают примерно одинаковыми характеристиками.

Основным недостатком ППК является возникновение редких событий с большими амплитудами, которые могут приводить к повреждению поверхности электродов и к выходу из строя измерительной электроники. Энерговыведе-

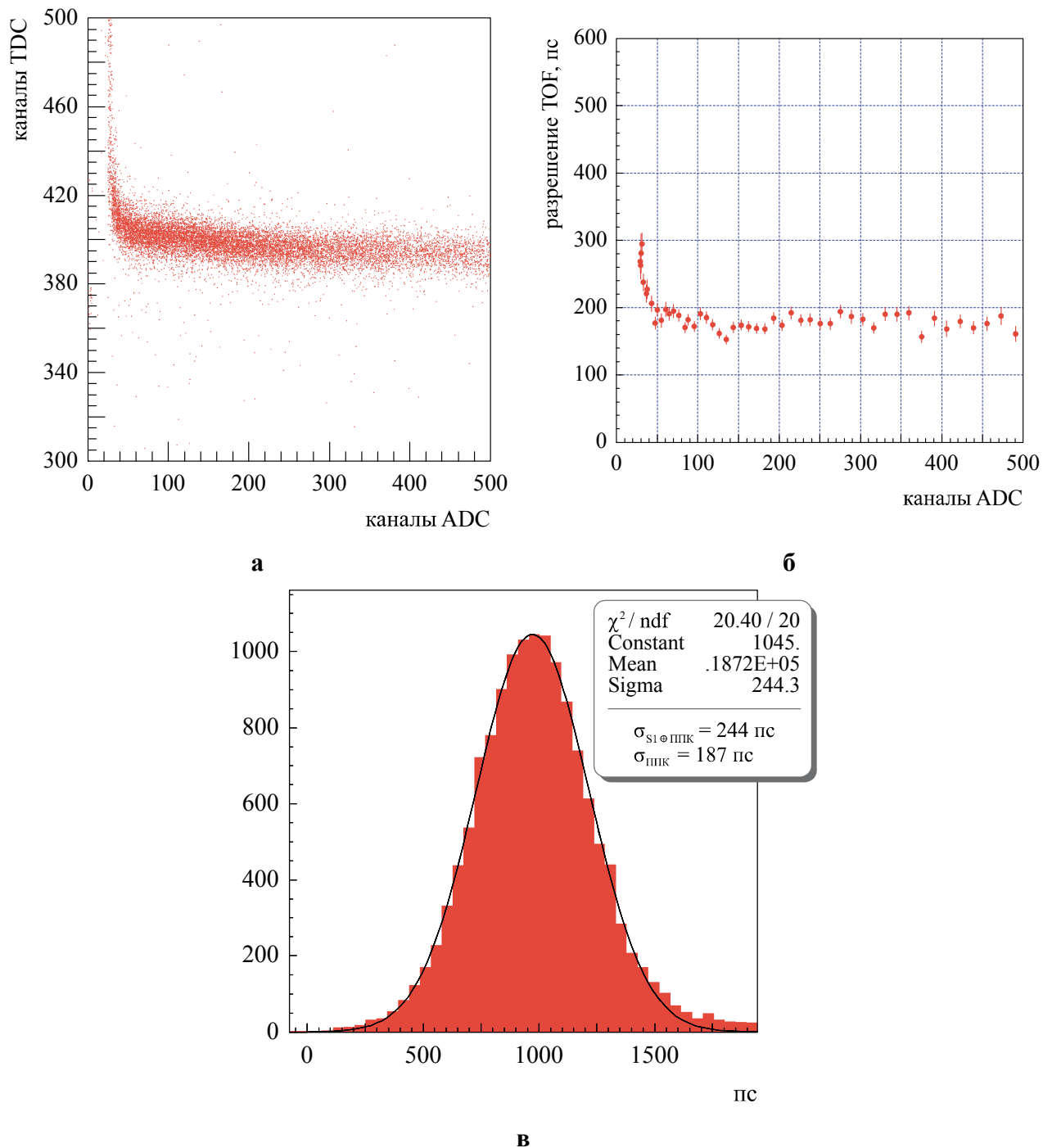


Рис. 8. Результаты пучковых испытаний двухззорной ППК: **а** – распределение событий в плоскости T - A (канал ADC = 0.25 фКл, канал TDC = 50 пс); **б** – временное разрешение ППК в зависимости от A (после вычитания временного разрешения стартовой системы); **в** – общее временное разрешение.

ление во всех случаях «больших» сигналов примерно одинаково и равняется энергии плоского конденсатора (каковым является ППК), заряженного до 100 нКл. Естественно предположить, что «большие» сигналы являются результатом искр, полностью разряжающих камеру. Основным виновником возникновения «больших» сигналов являются проводящие электроды, не обеспечивающие эффективного механизма гашения сильных разрядов. Результаты исследований «больших» сигналов для двухзазорной камеры с шириной каждого зазора в 1.5 мм приведены на рис. 7. Видно, что даже в области высокой эффективности вероятность «больших» сигналов составляет лишь около 10^{-4} , что, тем не менее, представляет собой серьезную проблему в контексте многоканальной системы.

В результате R&D были подобраны оптимальные параметры камеры, обеспечивающие наилучшие эффективность и временное разрешение, а также работоспособность, адаптируемость под массовое производство и стоимость. Окончательный размер ячейки составил 50×50 мм, ширина зазора – 0.6 мм. Типичные результаты пучковых испытаний двухзазорной ППК приведены на рис. 8. Путем квадратичного вычитания джиттера электронного канала из полного разрешения детектора было получено, что неопределенность, связанная с собственным джиттером лавины, достигла уровня 100 – 150 пс. Эти данные согласуются с результатами компьютерной симуляции газового разряда в ППК. Таким образом, разработан простой и надежный детектор TOF с временным разрешением на уровне 200 пс и с более чем 90%-ной стабильной эффективностью регистрации MIP. Совокупность параметров и характеристик ППК позволила в 1998 году менеджменту эксперимента отдать предпочтение именно этим детекторам в сравнении с искровыми счетчиками Пестова и назначить их основной опцией для реализации проекта ALICE-TOF.

В пятой главе рассмотрены конструкция и результаты испытаний прототипов многоканальных модулей TOF на основе ППК. Наиболее подробно изучен 32-канальный модуль, для которого сканировались эффективность и временное разрешение, а также измерялись перекрестные наводки. Представлены результаты испытаний 512-канального модуля. Сформулированы сложности интеграции ППК в большие системы.

В основу разработки первых прототипов многоканальных модулей была положена идея мозаичной структуры, собранной из независимых двухзазорных ППК. Для улучшения эффективности и временного разрешения TOF-системы, а также для уменьшения площади «мертвых зон» предполагалось впоследствии строить систему из нескольких (до четырех) слоев модулей, сдвинутых друг относительно друга по принципу шахматной доски.

Основой пилотных модулей стали 16-канальные 8-слойные электронные печатные платы, служившие также механической опорой конструкции. Платы обеспечивали подачу и распределение высокого и низкого напряжений, а также быструю передачу сигналов от сработавших ячеек к разъемам на краю пла-

ты. С одной из сторон платы в два ряда крепились 16 ячеек ППК, а с обратной стороны располагались 16 предусилителей, подсоединенных к соответствующим камерам. Быстрые передаточные линии, направленные вдоль платы, не вносили заметных искажений в амплитуду и форму импульсов.

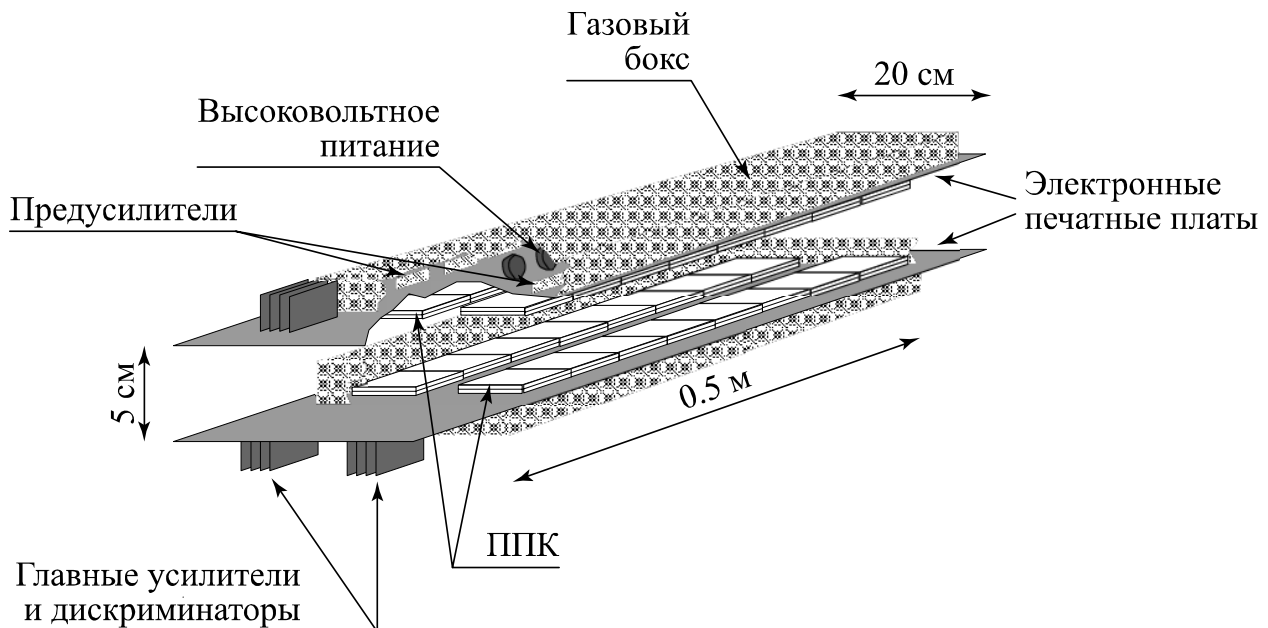


Рис. 9. Конструкция 32-канального прототипа модуля TOF на основе ППК.

Первый прототип модуля TOF содержал 32 ППК и был собран из двух 16-канальных плат с камерами, помещенными в общий газовый объем на расстоянии 5 см друг от друга (см. рис. 9). В модуле были установлены двухзазорные ППК размером 50×50 мм с хромированными керамическими электродами, ширина газовых зазоров составляла 0.63 мм. Временное разрешение модуля оказалось однородным и составило в среднем около 250 пс, что включало в себя внутренний джиттер ППК, вклад измерительной электроники, разброс времен распространения сигналов по сигнальным линиям и пр. С увеличением высокого напряжения у большинства ячеек модуля наблюдался выход на плато по эффективности $> 90\%$, ширина плато составила около 100 В (см. рис. 10). Это обстоятельство сделало возможной подачу единого высокого напряжения на весь модуль TOF без ущерба для эффективностей отдельных ячеек.

Применимость модуля в составе большой системы TOF ограничивается уровнем перекрестных наводок (кросс-токов) между соседними ячейками, обусловленных, прежде всего, общим заземлением ячеек и (или) сигнальных линий. Как видно из рис. 11, в случае обычных сигналов порог в 20 мВ обеспечивал уровень кросс-токов (ложных срабатываний) в ближайших ячейках на уровне 1.5%, а в остальных ячейках – на уровне 0.5%. В случае же «больших» сигналов кросс-токи в ППК, расположенных в одной плоскости с той камерой, где возник пробой, находились в пределах от 70% в ближайших ячейках до 20% в самых удаленных, а уровень кросс-токов в другой плоскости заметно не

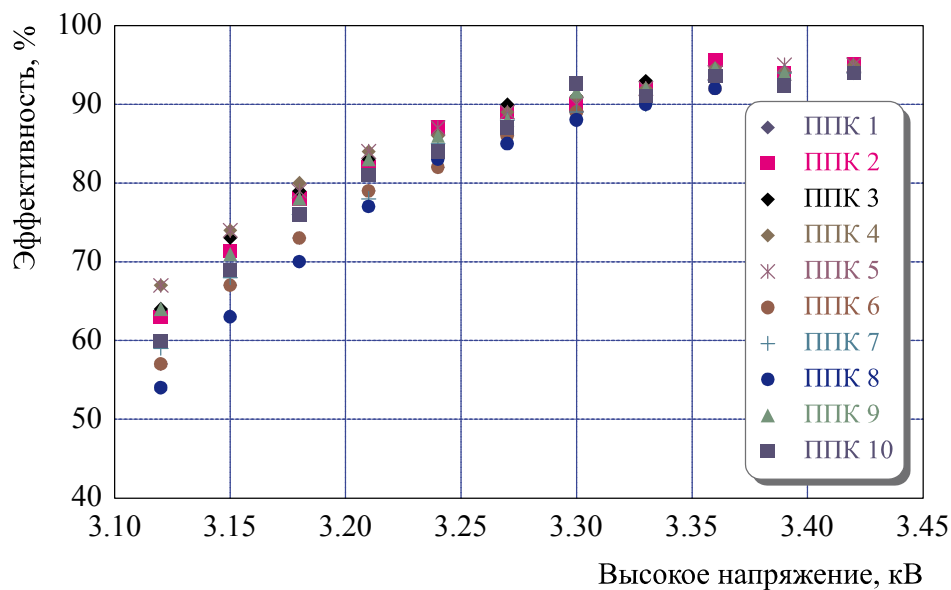


Рис. 10. Результаты сканирования эффективностей десяти ячеек ППК в 32-канальном модуле TOF.

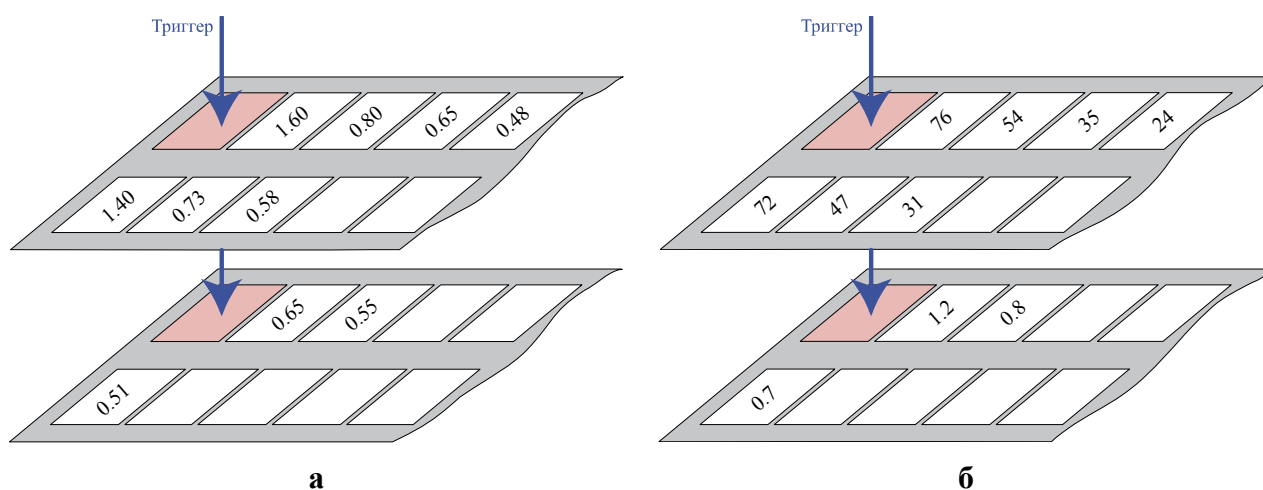


Рис. 11. Уровень кросс-токов (в процентах) внутри 32-канального модуля TOF: **а** – при нормальных событиях; **б** – в случае «больших» сигналов.

отличался от нормальных событий. Таким образом, в случае появления «большого» сигнала в одной из плоскостей модуля информация о времени могла быть получена из другой плоскости.

В прототипе полномасштабного модуля TOF общей площадью около 1 м^2 была сохранена идея расположения камер на печатных платах. Пятьсот двенадцать ячеек ППК, имевших для сравнения и керамические, и металлические электроды, были размещены в четыре слоя с мозаичным сдвигом, причем каждый слой включал в себя две печатные платы, каждая из которых имела размер $0.5 \times 0.5 \text{ м}$ и обслуживала 64 ячейки. Нечувствительные элементы плат имели минимально возможные размеры для увеличения рабочей площади модуля. Расстояние между соседними слоями камер составляло 0.5 см. Принципиаль-

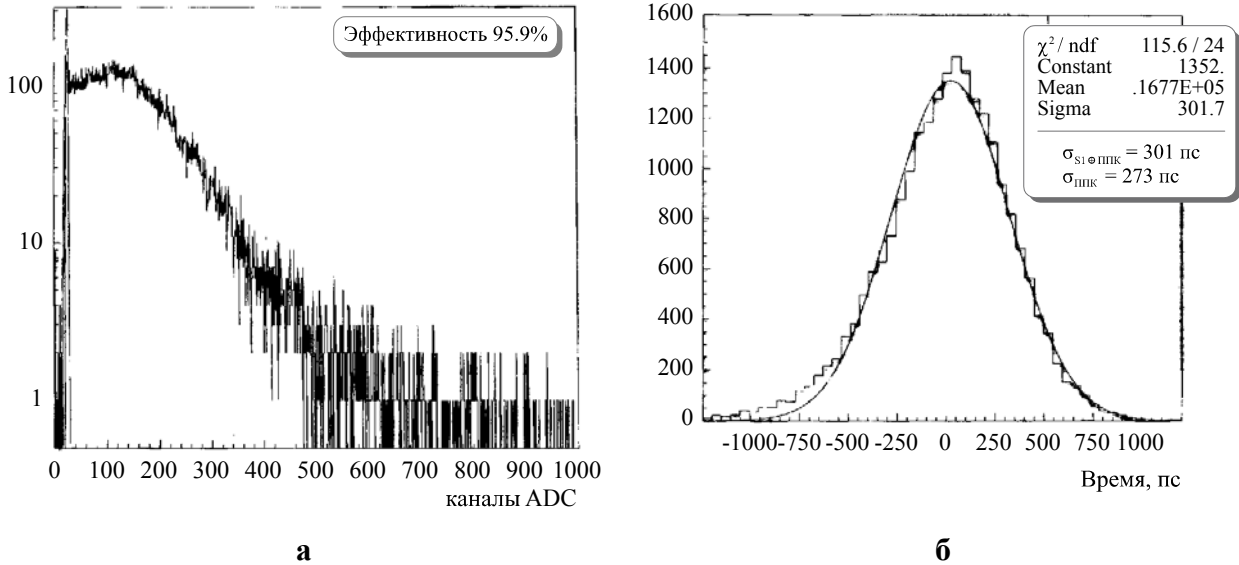


Рис. 12. Типичные характеристики одной ячейки ППК большого прототипа модуля TOF: **а** – амплитудный спектр, **б** – разрешение времени пролета.

ные параметры электроники были сохранены такими же, как в случае 32-канального модуля. Механической опорой модуля служила алюминиевая рама размером 1×1 м, обеспечивавшая замкнутый газовый объем (на ней же располагались все разъемы для подключения газовых, электрических и сигнальных линий). Пучковые испытания большого модуля стали последним и одним из самых трудоемких этапов исследований возможности использования ППК как основного элемента времяпролетной системы эксперимента ALICE. В большом модуле наблюдалось плато эффективности, однако порог дискриминатора в 40 мВ гарантировал лишь 90%-ную эффективность модуля, а дальнейшее уменьшение порога приводило к резкому возрастанию шумов (вдвое при 35 мВ). Типичные результаты измерений характеристик ППК, установленных в большом модуле, оказались хуже тех, что были измерены в 32-канальном прототипе (см. рис. 12): временное разрешение увеличилось до примерно 280 пс. Поскольку в большом модуле использовались те же ячейки ППК, что и в 32-канальном модуле, то этот эффект следует связывать с конструкцией большого модуля и со свойствами считывающей электроники (эта техническая проблема была решена в дальнейшем при разработке модулей из диэлектрически-резистивных плоско-параллельных камер).

В заключении подводятся главные итоги многолетней работы по развитию времяпролетной методики с использованием ППК, перечислены основные результаты исследований, достоинства и недостатки ППК; намечены пути решения обнаруженных проблем. В общих чертах описано современное состояние системы TOF эксперимента ALICE, построенной на основе многозачерных резистивных плоско-параллельных камер.

Характеристики ППК, как одиночного детектора и элемента небольших многоканальных систем, превзошли самые оптимистичные прогнозы, существовавшие в начале исследований. Этот результат стал несомненным открытием в методике, положившим начало многочисленным дальнейшим работам. В настоящее время новый метод используется и планируется к использованию в десятках разномасштабных экспериментов и практических приложений. Следует также отметить, что благодаря проводящим электродам ППК способна работать без ухудшения характеристик при нагрузках до 25 кГц/см^2 , и ее быстрое действие ограничено только условием относительной малости объемного заряда ионов в рабочем газовом объеме.

Тем не менее, несмотря на хорошие результаты, полученные при испытаниях отдельных камер и прототипов модулей, возможность построения полномасштабной системы TOF на основе ППК пока не исследована в полной мере. Главным недостатком ППК остаются «большие» сигналы, возникающие с малой, но заметной, вероятностью $\sim 10^{-4}$. Такие сигналы опасны для материалов камеры и измерительной электроники, а также приводят к высоким (до 70%) перекрестным наводкам внутри многоканальных модулей. Решение этой проблемы требует создания эффективного способа гашения или подавления «больших» сигналов.

Одним из таких способов является качественное изменение самого детектора, а именно – введение различных типов резистивности (объемной и поверхностной) в электроды камеры. В случае «больших» сигналов резистивные электроды позволяют локализовать область разряда, уменьшая напряженность поля в месте пробоя и тем самым гася разряд. Как следствие, резистивные камеры могут работать при более высоких напряжениях, обладают лучшим временным разрешением и эффективностью, однако имеют ограничения по нагрузочной способности. В рамках дальнейших работ испытывались многочисленные варианты резистивных плоско-параллельных камер (DRPC, GRPC и пр.) В окончательном варианте системы ALICE-TOF нашла воплощение многозоровая концепция (MRPC), в которой сигнал с камеры является суммой сигналов с нескольких узких зазоров, позволившая довести эффективность детектора до 100% при временном разрешении на уровне 50 пс.

Сравнение систем TOF, использующих различные варианты времяпролетных детекторов, приведено в табл. 1.

В заключении перечислены основные результаты диссертации.

1. На опыте подтверждена принципиальная возможность высокоточного и эффективного измерения времени пролета ионизирующих частиц с помощью камер плоско-параллельной геометрии, эксплуатирующих ограниченно-лавинный режим газового усиления. Положено начало новому поколению времяпролетных детекторов.

2. Впервые тщательно измерен амплитудный спектр ППК. Распределения с двухзоровой камеры имеют отстоящий от нуля и превосходящий порог чув-

ствительности электроники максимум. В результате эффективность ППК к МIP удалось поднять до 95% и выше.

3. Разработан метод измерения времени пролета с помощью плоскопараллельных газовых детекторов, который включает в себя T - A -коррекцию при обработке сигналов с камеры. Наилучшее значение временного разрешения двухззорной ППК составило около 200 пс.

4. Подобраны оптимальные параметры двухззорных ППК для использования в составе крупномасштабных систем TOF. Оптимальная ширина газового зазора составила 0.6 – 0.65 мм. Состав «стандартной» газовой смеси: 85% $C_2H_2F_4$ + 5% $i-C_4H_{10}$ + 10% SF_6 .

5. Измерена вероятность «больших» сигналов (искр), представляющих опасность для электроники и электродов камеры. Она составила около 10^{-4} , что является существенной величиной в рамках большой системы.

6. Впервые собраны и испытаны прототипы многоканальных модулей TOF на основе ППК, продемонстрирована их работоспособность, изучена вероятность и последствия наводок между каналами, подтверждена принципиальная возможность интеграции ППК в многоканальные системы. Характеристики 32-канального модуля мало отличались от свойств одиночных двухззорных ППК. В большом 512-канальном модуле наблюдалось ухудшение характеристик, связанное со сложностью конструкции и электроники.

7. Изучены уровни наводок между соседними каналами модулей в случае нормальных и «больших» сигналов. Соответствующие значения составили 0.5 – 1.5% и 20 – 70%.

Публикации автора по теме диссертации

- [1] В. А. Акимов, А. В. Акиндинов, С. В. Бояринов, К. Г. Волошин и др., *Плоскопараллельная камера как детектор для времяпролетных измерений*, Приборы и техника эксперимента, №4 (2002) с. 63.
- [2] В. А. Акимов, А. В. Акиндинов, С. В. Бояринов, К. Г. Волошин и др., *Изучение характеристик и оптимизация параметров плоскопараллельной камеры как детектора для времяпролетных измерений*, Приборы и техника эксперимента, №5 (2004) с. 24.
- [3] ALICE Collaboration, Time of Flight System, Technical Design Report, CERN/LHCC 2000-12, ALICE TDR 8, 16 February 2000.