

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

УДК 539.1.074:621.382

Кашук Анатолий Петрович

**МИОННЫЙ ДЕТЕКТОР LHCb-СПЕКТРОМЕТРА.
РАЗРАБОТКА, ИССЛЕДОВАНИЕ, ОПТИМИЗАЦИЯ
ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМА РАБОТЫ КАМЕР
С ПЯДОВОЙ СТРУКТУРОЙ РАЗЛИЧНОЙ
ГРАНУЛЯРНОСТИ**

01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Дубна 2016

Работа выполнена в Отделении физики высоких энергий
Петербургского института ядерной физики им. Б. П. Константинова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт».

Официальные оппоненты:

Бару Семен Ефимович

доктор технических наук, профессор,
Институт ядерной физики
им. Г.И.Будкера СО РАН,
г. Новосибирск,
главный научный сотрудник

Болоздыня Александр Иванович

доктор физико-математических наук,
профессор кафедры экспериментальной
ядерной физики и космофизики и
главный научный сотрудник
лаборатории экспериментальной
ядерной физики, Национальный
исследовательский ядерный университет
«МИФИ», г. Москва

Голутвин Игорь Анатольевич

доктор физико-математических наук,
профессор, Объединенный институт
ядерных исследований, г. Дубна,
главный научный сотрудник

Ведущее научно-

исследовательское учреждение:

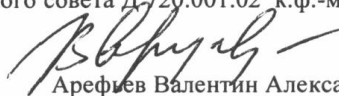
Федеральное государственное
бюджетное учреждение
Государственный научный центр
Российской Федерации - Институт
физики высоких энергий, г. Протвино.

Защита состоится «__» _____ 201_ г. в «__» часов на заседании
диссертационного совета Д 720.001.02 в Лаборатории физики высоких
энергий им. В.И. Векслера и А.М.Балдина в Объединённом институте
ядерных исследований по адресу: 141980, г. Дубна Московской области,
ул. Жолио-Кюри, д.б.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединённого
института ядерных исследований или на сайте
http://www.info.jinr.ru/announce_disser.html.

Автореферат разослан «__» _____ 201_ г.

Учёный секретарь диссертационного совета Д 720.001.02 к.ф.-м.н.


Арефьев Валентин Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Актуальность темы диссертации – эксперимент LHCb, который является одним из четырех главных экспериментов на Большом адронном коллайдере (БАК, англ. LHC – *Large Hadron Collider*) в Европейском центре ядерных исследований (фр. сокращение CERN – *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*, Швейцария).

Научная программа эксперимента LHCb весьма обширная и рассчитана на многие годы. Закончена первая трехлетняя сессия LHC – Run 1 и обнародованы планы работы до 2035 года сессиями по 3 года каждая с остановками по году на модернизацию [1]. Программа включает изучение эффектов нарушения CP -симметрии в различных распадах B -мезонов, содержащих тяжелый b -кварк (*beauty* – прелестный), с целью поиска ответов на фундаментальный вопрос, под воздействием каких механизмов исчезла антиматерия во Вселенной после Большого взрыва. Есть и другая цель – поиск проявлений Новой физики (НФ) или физики за пределами Стандартной модели (СМ) в редких распадах B -мезонов и процессах нарушения различных симметрий. Эксперимент LHCb оптимизирован для выполнения прецизионных измерений в секторе B -мезонов. Именно “прецизионность” лежит в основе так называемого косвенного метода поиска проявлений НФ по результатам сравнения измерений и расчетов, выполненных по СМ. Величина этих отклонений иногда не превышает нескольких процентов, что налагает повышенные требования к характеристикам детекторов. Эксперимент LHCb начал набор данных в 2010 году при рекордных энергиях сталкивающихся протонных пучков 3.5 и 4 ТэВ на пучок при светимости $4 \cdot 10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ (в 2012 году) и к настоящему времени накопил статистику 3 фбн^{-1} (интегральная светимость, $1 \text{ фбн}^{-1} = 10^{39} \text{ см}^2$).

Мюонный детектор является одним из ключевых элементов LHCb-спектрометра, т. к. большинство распадов B -мезонов сопровождается мюонами в конечном состоянии. Практически все модели НФ предсказывают существование новых частиц или явлений, которые могут быть обнаружены в каналах распада с мюонами в конечном состоянии.

Мюонный детектор состоит из пяти мюонных станций, содержащих 1380 камер с падовой структурой различной гранулярности (рис. 1).

Задачами мюонного детектора являются следующие [2]:

1) идентификация мюона как частицы, регистрируемой в конечном состоянии среди продуктов распада, что требуется для определения инвариантных масс частиц, рождающихся в pp -столкновениях;

2) избирательный запуск экспериментальной установки - мюонный триггер при обнаружении события с большим поперечным переданным импульсом одного мюона μ^+ , μ^- или пары $\mu^+\mu^-$ (димюона).

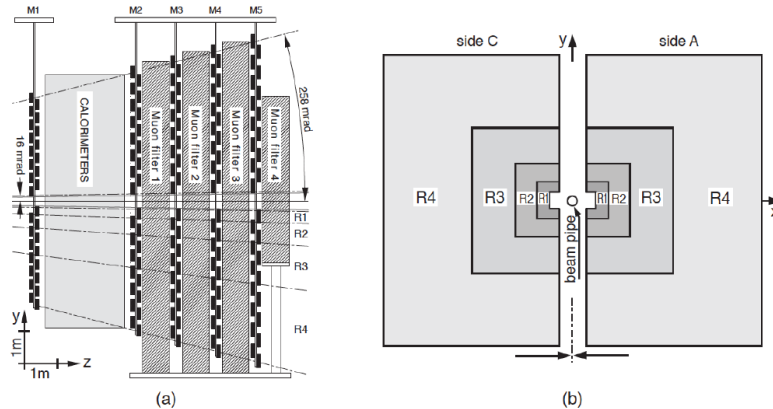


Рис. 1. Мюонный детектор: регионы в вертикальной (a) и фронтальной плоскостях системы координат установки LHCb (b). Показаны две половины мюонного детектора станций M1–M5 в полураскрытом состоянии. В рабочем положении половины мюонного детектора сдвигаются. Каждая мюонная станция имеет четыре региона R1–R4 с увеличивающимися при удалении от оси пучка как 1:2:4:8 размерами.

В названии камеры, принятой в мюонной системе, отмечается номер мюонной станции (M) и регион (R), например M1R1, M5R4 и т.д. В мюонном детекторе: 122112 физических “падов” (англ. *pad*) и соответствующих им каналов электроники. Наименьший пад имеет размеры $1 \times 2.5 \text{ см}^2$ (M1R1), а наибольший – $25 \times 30 \text{ см}^2$ (M5R4), при этом наибольшая нагрузка приходится на наименьший пад и достигает 500 кГц/см^2 при номинальной светимости БАК; с увеличением расстояния от пучка нагрузка уменьшается пропорционально квадрату расстояния.

Цель работы

Целью диссертационной работы является разработка и создание быстродействующих высокоэффективных камер с падовой структурой различной гранулярности для мюонного детектора эксперимента LHCb (таблица 1). В приведенной ниже таблице пунктирной линией очерчены семь типов камер внутренней области мюонного детектора, которые составили основу диссертации, где автором внесен существенный, а в ряде вопросов – определяющий вклад. Эти камеры содержат 30 тысяч каналов электроники из полного числа 122112 каналов и сложнее тех, которые используются во внешних регионах, т. к. наиболее загружены.

Таблица 1. Размеры 20 типов мюонных камер различной гранулярности пяти мюонных станций M1–M5 четырех регионов R1–R4 и количество каналов съема информации.
WPC – Wire Pad Chamber, CPC – Cathode Pad Chamber, CWPC – Cathode-Wire Pad Chamber

	Параметр	M1	M2	M3	M4	M5
R4	Размеры (мм ²)	1028×276	1274×327	1370×347	1466×367	1562×387
	Активная пл. (мм ²)	960×200	1206×251	1302×271	1398×291	1494×311
	Пад Δх×Δу (мм ²)	40×200	50.3×251	54.3×271	58.3×291	62.3×311
	Колич.падов	48	48	48	48	48
	Тип камеры	WPC	WPC	WPC	WPC	WPC
	Колич. камер	192	192	192	192	192
	Колич.каналов	9216	9216	9216	9216	9216
R3	Размеры (мм ²)	1028×276	1274×327	1370×347	1466×367	1562×387
	Активная пл. (мм ²)	960×200	1206×251	1302×271	1398×291	1494×311
	Пад Δх×Δу (мм ²)	40×100	50.3×125	54.3×135	58.3×145	62.3×155
	Колич.падов	192	192	192	96	96
	Тип камеры	CPC-2	CPC-2	CPC-2	CPC-2	CPC-2
	Колич. камер	48	48	48	24	24
	Колич.каналов	9216	9216	9216	4608	4608
R2	Размеры (мм ²)	548×276	671×327	719×347	764×367	815×387
	Актив. площ. (мм ²)	480×200	603×251	651×271	696×291	747×311
	К.пад Δх×Δу (мм ²)	20×25	75.4×31.4	81.4×33.9	88.3×36.3	94.3×38.7
	Провол.стрип (мм ²)		12.5×251	14×271		
	Колич. кат.падов	384	128	128	96	96
	Колич.пров.стрипов		96	96		
	Тип камеры	CPC-8	CWPC-8	CWPC-8	CPC-4	CPC-4
	Колич. камер	24	24	24	24	24
Колич.каналов	9216	5376	5376	2304	2304	
R1	Размеры (мм ²)	308×276	369×327	393×347	416×367	441×387
	Активная пл. (мм ²)	240×200	301×251	325×271	348×291	373×311
	К.пад Δх×Δу (мм ²)	10×25	37.6×31.4	40.7×33.9	43.8×36.3	46.9×38.7
	Провол.стрип (мм ²)		6.3×251	6.8×271		
	Колич. кат.падов	384	128	128	192	192
	Колич.пров.стрипов		96	96		
	Тип камеры	GEM	CWPC-8	CWPC-8	CPC-8	CPC-8
	Колич. камер	12	12	12	12	12
Колич.каналов	4608	2688	2688	2304	2304	

Научная новизна и практическую ценность работы

Областью научных исследований являются разработка концепции и принципов построения быстродействующих высокоэффективных мюонных камер, исследование на пучках прототипов, опытных образцов и камер окончательной конструкции, включая электронику, вопросы оптимизации параметров и режима работы камер мюонного детектора в эксперименте LHCb в период 2010–2012 г.г. (LHC Run I). Положения и выводы диссертации могут быть применены также в других экспериментах.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту

1. Впервые созданы высокоэффективные быстродействующие двух- и четырехслойные проволочные камеры с падовой структурой различной гранулярности: M1R2, M2R1, M2R2, M3R1, M3R2, M4R1, M5R1. Эти камеры испытывают наибольшую загрузку в эксперименте ЛНСб (до 500 кГц/см^2), предназначены для семи внутренних регионов мюонного детектора ЛНСб-спектрометра, содержат ~ 30000 каналов электроники, характеризуются высоким временным разрешением ($\sim 3 \text{ нс}$ – средне-квадратичное значение).

Новизна созданных камер – в уникальной совокупности следующих характеристик:

- Высокое временное разрешение, обеспечивающее близкую к 100% эффективность регистрации мюонов пятью мюонными станциями на временном интервале $\Delta t < 25 \text{ нс}$ (характеристика введена впервые, где 25 нс – период следования банчей протонов ЛНС). Это свойство позволяет надежно фиксировать принадлежность регистрируемых мюонов к данному банчу коллайдера ЛНС и минимизировать ошибку регистрации немюонов;

- При этом одновременно определяются две координаты (X,Y) трека по номерам сработавших падов независимо от числа треков в событии при преимущественном срабатывании одного пада в кластере, что характеризуется специальной нормой – шириной пространственного кластера 1.2. Это свойство важно при регистрации пары мюонов $\mu^+\mu^-$ и необходимо для упрощения алгоритма поиска трека при организации мюонного триггера экспериментальной установки;

- Камеры обладают высоким быстродействием в том смысле, что благодаря гарантированному уходу электронов первичной ионизации из рабочего зазора за время $t < 25 \text{ нс}$ готовы к регистрации события из следующего банча. Показано, что пространственный заряд положительных ионов не оказывает существенного влияния на эффективность камер до загрузок 500 кГц/см^2 .

2. Предложена и впервые реализована концепция построения быстродействующих высокоэффективных камер, основанная на удвоении числа кластеров первичной ионизации в рабочем зазоре, что достигнуто проводным объединением сигналов с двух слоев и привело к существенному улучшению временного разрешения и эффективности, кроме того, позволило уменьшить в 2 раза число каналов электроники с

236000 до 122112 по сравнению со старой концепцией, существенно снизить стоимость¹ мюонного детектора.

- Концепция внедрена в 1104 камерах мюонных станций M2–M5.

3. Для уменьшения падов до размеров меньше 1 см в отклоняющей плоскости ЛНСб-спектрометра с целью улучшения углового разрешения, требуемого для отбора событий с порогом по поперечному импульсу мюона 1 Гэв/с, впервые предложен и реализован принцип, позволивший образовывать “эффективный пад” логической операцией И “стрип–пад” в камерах комбинированного (смешанного) типа с узкими проволочными стрипами (например, 3 проволочки в стрипе – 0.6 см) и широкими катодными падами (например, 3 см). Подчеркнем, что при расстоянии анод–катод 2.5 м без нарушения установленной нормы 1.2 на ширину пространственного кластера минимальные размеры падов – 3 см.

- Внедрение этого принципа в камерах внутренних регионов привело к дополнительному уменьшению числа каналов в мюонной системе ($N+M$ каналов вместо $N\times M$), в частности, позволило уменьшить число логических каналов для триггерных целей с 45 тысяч до 26 тысяч по сравнению с чисто падовой организацией съема информации;

- На этом принципе выполнены камеры четырех внутренних регионов мюонного детектора M2R1, M2R2, M3R1, M3R2, которые содержат 16128 каналов регистрации информации.

4. Выполнен комплекс работ по исследованию на пучках прототипов и опытных образцов двух- и четырехслойных камер различной конструкции с проволочными и печатными падами, с симметричным и асимметричным рабочими зазорами, которые создавались для различных регионов мюонного детектора ЛНСб-спектрометра. Эти работы по измерению эффективности и временного разрешения камер, кросстоков, проверке различных конструктивных решений, поиску оптимальной газовой смеси, исследованию радиационной стойкости, выбору электроники и др. позволили найти технические решения и определить условия, при которых камеры могут быть применены в эксперименте ЛНСб.

- Показано, что асимметричные камеры с катодными падами, которые рассматривались в ранних проектах эксперимента ЛНСб, как базовые для мюонного детектора, не имеют преимуществ перед симметричными камерами по временному разрешению и эффективности регистрации частиц, уступают симметричным камерам по времени

¹ Стоимость мюонного детектора ЛНСб-спектрометра 11 млн швейцарских франков.

собираения электронов из зазора и теряют преимущество в ширине пространственного кластера уже при уровне емкостных кросстоков 6%;

- В индукционных камерах с катодными падами автором обнаружены паразитные резонансы, найдены и устранены причины их возникновения.

5. На основе проведенных исследований с использованием сильноионизирующих альфа-частиц, специально введенных в газовую смесь, впервые предложен для экспериментов в области физики высоких энергий новый тип детектора – *Triple-GEM*; впервые показано, что в микроструктурном детекторе *Double-GEM* пробои в отверстиях – активном элементе детектора происходят при газовом усилении 1000 в то время, как в *Triple-GEM* нет пробоев при усилении $4 \cdot 10^4$. С приоритетом в 3 года по сравнению с работами других авторов показано, что *Triple-GEM* может, а *Double-GEM* не может применяться в спектрометрах высоких энергий.

- Детектор *Triple-GEM* успешно применен в камерах M1R1 мюонного детектора ЛНСб-спектрометра, т. к. благодаря меньшему индукционному зазору 1 мм получена меньшая по сравнению с проволочными камерами ширина пространственного кластера при размерах падов в отклоняющей плоскости спектрометра 1 см.

6. Впервые предложен и реализован метод ускоренного вывода новых (непосредственно после производства) камер в область рабочих и максимальных напряжений, основанный на использовании коронного разряда с отрицательным напряжением на проволочках, при одновременном облучении камеры интенсивным потоком гамма-квантов (40 кГц/см^2) с энергией 660 кэВ от источника ^{137}Cs , что ускорило процедуру тренировки с 48.5 ч до 5 ч (важно при производстве большого количества камер, как в мюонном детекторе – 1380 шт.) и существенно улучшило качество поверхности проволочек.

7. Впервые предложен и реализован новый метод контроля качества поверхности катодов в проволочных камерах, основанный на использовании облучения камер интенсивным потоком гамма-квантов (40 кГц/см^2) с энергией 660 кэВ от источника ^{137}Cs ; впервые показана важность такого контроля.

- Метод позволил обнаружить в ряде камер эмиссию с катода, которая характеризуется токами в тысячу и более раз превышающими

темновой ток, которая осталась бы не обнаруженной в лабораторных тестах;

- Установлена причина эмиссии – попадание эпоксидной смолы на поверхность металла из-за несовершенства технологии производства камер;
- Эмиссия подавлена разрушением эмиттеров без ущерба для характеристик камер; камеры успешно работают в эксперименте LHCb.

8. Впервые создана радиационно-стойкая детекторная электроника высокой степени интеграции, допускающая минимальный шум при коротком пиковом времени $T_p=8-10$ нс и подключении пиков с большой емкостью до $C_{дет}=250$ пФ, обеспечивающая достаточно малое мертвое время канала регистрации.

9. Разработан новый метод реконструкции шумовых распределений в ядерной электронике, впервые внедренный в мюонной системе эксперимента LHCb.

- По результатам сканирования порогом дискриминатора шумовой дорожки на выходе усилителя определяются параметры двух важных шумовых распределений: на входе предусилителя и на выходе дискриминатора, которые используются для выбора и установки рабочих порогов в каналах мюонного детектора (122112 каналов) и позволяют по характеру распределений выполнять мониторинг электромагнитных условий в окрестности мюонных камер в шахте;

10. Метод оптимизации режима работы камер мюонного детектора, основанный на минимизации газового усиления, что можно сделать, выполнив следующие условия:

- Минимальный шумовой порог электроники;
- Максимальный порог регистрации в первичных электронах, при котором выполняется норма эффективности регистрации мюонов высоких энергий на временном интервале $\Delta t < 25$ нс.
- Минимизация газового усиления в свою очередь гарантирует:
 - Минимальные кросстоки (все виды кросстоков);
 - Минимальную ширину пространственного кластера;
 - Минимальный пространственный заряд;
 - Минимальное накопление заряда камерой в течение эксперимента.
- Метод имеет предсказательную силу: при рассогласовании расчетного и установленного режима видно, где и насколько порог

регистрации в первичных электронах отклоняется от расчетного значения, где и какая требуется подстройка.

11. Предложен новый метод диагностики мюонной системы, основанный на мониторинге эквивалентного шумового заряда в каждом канале установки в течение времени жизни детектора, впервые внедренный в мюонной системе эксперимента LHCb с целью обнаружения на ранней стадии развития таких нежелательных явлений и эффектов, как радиационное старение и механическая усталость конструкции камер.

12. Результаты измерений основных характеристик камер мюонного детектора, впервые полученные в условиях эксперимента LHCb на сталкивающихся протонных пучках с энергией 3.5 и 4 ТэВ на пучок при светимости $4 \cdot 10^{32} \text{ c}^{-1} \text{ см}^{-2}$, превышающей проектную в 2 раза и при светимости, превышающей проектную в 5 раз.

- В сеансах эксперимента LHCb 2010–2012 г.г. (*LHC Run 1*) благодаря высокой эффективности работы всех подсистем LHCb-спектрометра впервые получены важные научные результаты, которые вывели эксперимент LHCb на уровень мирового лидера в области физики *B*- и *D*-мезонов; за 3 года работы накоплен большой объем уникальных данных, обработка которых продолжается. С 2010 на конец 2013 года по физике опубликовано более 220 работ и сделано столько же докладов на международных конференциях с новыми результатами эксперимента LHCb.

Личный вклад диссертанта

Определяющий вклад – п.п. 2, 3, 5, 6, 7, 9, 10, 11, активное участие – п.п. 1, 4, 8, 12.

Апробация работы и публикации

Диссертация основана на результатах НИОКР и результатах работ, опубликованных с конца 90-х годов по 2013 год включительно. По теме диссертации опубликовано 53 печатные работы в журналах, в сборниках трудов международных конференций и в виде сообщений ПИЯФ и CERN. Многие вопросы, изложенные в диссертации, докладывались автором и обсуждались на собраниях международной коллаборации LHCb и на семинарах. Две работы по теме диссертации премированы на конкурсах лучших работ ПИЯФ в 2006 г. и в 2011 г. По теме диссертации защищено два патента на полезную модель.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. Объем диссертации 372 страницы (без приложений – 323 стр.), 257 рисунков и 32 таблицы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводится мотивация, раскрываются актуальность и задачи эксперимента ЛНСб на Большом адронном коллайдере, кратко описывается ЛНСб-спектрометр, который построен с учетом особенности рождения пар b -кварков (кварк–антикварк) в узком конусе углов по отношению к направлению сталкивающихся протонов и составляет по телесному углу 4% от 4π -геометрии. Мюонный детектор регистрирует слабозаимодействующие частицы – мюоны, рождающиеся в распадах, и покрывает внешнюю площадь ЛНСб-спектрометра, составляющую 435 м^2 .

В главе 1 сформулирована новая концепция построения камер для мюонного детектора ЛНСб-спектрометра. Особенность нового коллайдера в том, что столкновение пучков производится с частотой 40 МГц (период 25 нс). Для достижения высокого быстродействия камер необходимо, чтобы рабочий зазор камер был “узким” – таким, чтобы электроны первичной ионизации, возникшие в зазоре при прохождении заряженной частицы, удалялись из рабочего зазора камеры за время, не превышающее 25 нс . С другой стороны, зазор должен быть достаточно “широким”, чтобы эффективность регистрации мюонов была высокой. Новая концепция, разработанная в ПИЯФ автором с коллегами, привела к отказу от первоначальной концепции, изложенной в проекте 1998 года [3]. В газовой смеси $\text{Ar}(40\%)\text{CO}_2(50\%)\text{CF}_4(10\%)$ мюоны образуют на длине трека 5 мм в минимуме ионизации $n=13$ первичных кластеров ($n.\text{кл.}$), а на плато – 18 н.кл. (в среднем 15.5 н.кл.). Будем считать, что вероятность образования k кластеров на длине трека x при среднем n подчиняется статистике Пуассона $p_k^n = \frac{(nx)^k}{k!} e^{-nx}$, где x пронормировано к ширине рабочего зазора камеры h , $0 < x < 1$. Можно упорядочить каждый кластер с номером j ($1 < j < k$) в направлении x перпендикулярном электродам:

$$A_j^n(x) = \frac{x^{j-1}}{(j-1)!} n^j e^{-nx} \quad (1)$$

Упорядоченное в пространстве распределение (1) преобразуется во временное распределение, как функция t , введением скорости дрейфа электронов в зазоре $w = dx/dt$. Построением временных распределений таких, как показано на рис. 2 для различных порогов j , можно найти компромисс, разрешив указанные выше противоречия, связанные с выбором ширины зазора. Для удобства проведения качественного анализа

будем считать, что число первичных электронов ($n_{эл.}$) равно числу первичных кластеров ($n_{кл.}$), т. е. в кластере один электрон. К тому есть основания – в газовую смесь добавлен CF_4 , что повышает скорость дрейфа электронов в полях вдали от проволочек, но это – электроотрицательный газ, уменьшающий число первичных электронов, особенно в слабых полях вдали от проволочек.

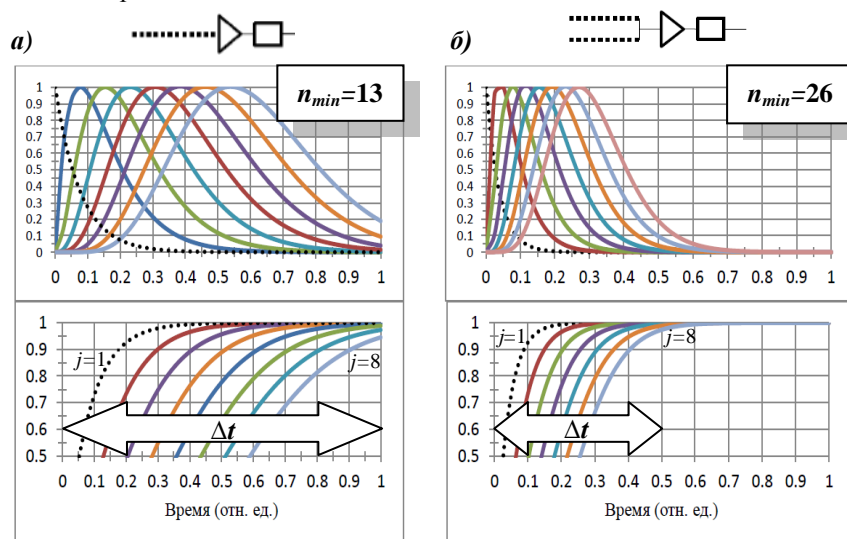


Рис. 2. Временные распределения, полученные по формуле (1) при различных порогах регистрации $j=1,2,\dots,8$ при постоянной скорости дрейфа электронов w для различных вариантов организации камер с одинаковым расстоянием анод-катод h : однослойная симметричная проволочная камера с зазором $2h=5$ мм (а); двухслойная камера с проводным объединением двух слоев с зазором $4h=10$ мм (б). Внизу интегрированием по x при тех же условиях получены зависимости эффективности на временном интервале Δt от порога j (площадь под кривой распределений, показанных сверху). Пунктирной линией показан предельный порог $j=1$. Время собирания электронов из рабочего зазора одинаковое, т. к. определяется h . Над графиками показаны условные схемы двух сравниваемых технических решений: сигнальный электрод – точки, усилитель – треугольник, дискриминатор – прямоугольник.

Распределения, приведенные на рис. 2, построены для различных порогов j в предположении постоянной скорости $w=100$ мкм/нс дрейфа электронов в полузазоре анод-катод $h=2.5$ мм для двух случаев: 1) $n=13$ – однослойная симметричная проволочная камера и 2) $n=26$ – двухслойная камера с проводным объединением слоев (при сложении двух распределений Пуассона средние значения суммируются). Ширина распределений при одном и том же пороге, как видно, отличается почти в

2 раза. Можно показать, что при логическом объединении двух слоев ширина распределений отличается в $\sqrt{2}$ раз (см. рис.3). Полученный “запас” по Δt позволяет существенно увеличить предел на емкость детектора, т. е. строить большие пады во внешних регионах мюонного детектора, с большим шумом электроники. Впервые высокое временное разрешение $\sigma_t=3.2$ нс и эффективность $\varepsilon=98\%$ на временном интервале $\Delta t=25$ нс было получено автором при простейшем проводном объединении всех проволочек двухслойной камеры 100×100 мм² в камере с суммарным зазором двух слоев 5 мм [4]. Таким объединением был образован относительно большой пад с площадью 100 см², с емкостью 200 пФ (эквивалентный шумовой заряд 10000 эл.).

На рис. 4 показаны проволочные камеры мюонного детектора ЛНСб-спектрометра трех принципиальных схем с падовой структурой различной гранулярности.

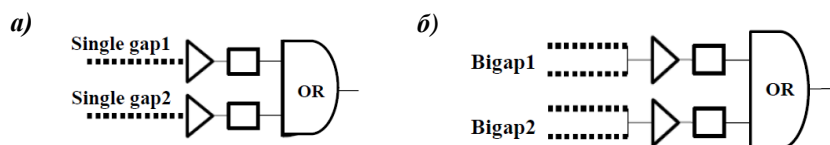


Рис. 3. Схема логического объединения слоев в двухслойных камерах мюонной станции M1 (а) и проводного – в четырехслойных камерах мюонных станций M2-M5 (б).

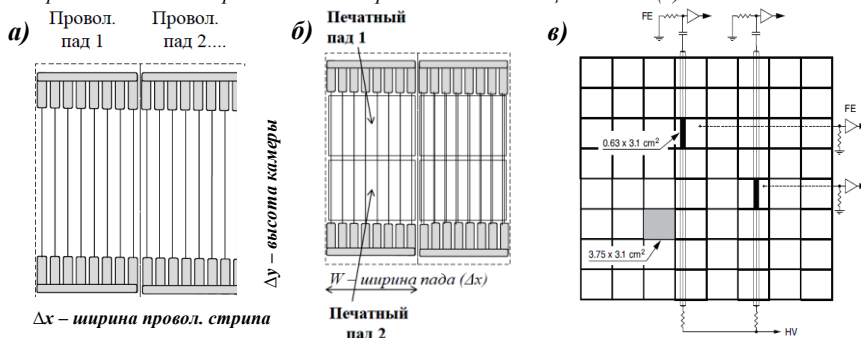


Рис. 4. Падовые камеры WPC – Wire Pad Chamber (а); CPC – Cathode Pad Chamber, ширина проволочного стрипа равняется ширине печатного пада (б); принцип построения камер с падовой структурой комбинированного (смешанного) типа (CWPC – Cathode-Wire Pad Chamber) с проволочными стрипами и катодными падами, в которых ширина проволочного стрипа меньше ширины печатного пада, а “эффективный пад” образуется логической операцией И “стрип-пад” (в).

Концепция удвоения числа кластеров первичной ионизации в суммарном рабочем зазоре проводным объединением слоев легла в основу создания целого спектра четырехслойных камер для мюонного детектора

ЛНСб [5–9]. Важно отметить, что с применением проводного объединения двух слоев число каналов электроники в четырехслойных камерах уменьшается в 2 раза (рис. 3).

Обобщая концепцию, можно объединить три слоя с соответствующим уменьшением h каждого слоя. Такое объединение может быть востребовано для работы с повышенной светимостью ЛНС на этапе модернизации мюонного детектора для дополнительного уменьшения мертвого времени и просчетов (но необходим разумный компромисс, т. к. чем меньше зазор, тем более жесткие требования к конструкции и труднее сделать проволочную камеру).

В главе 2 приведены результаты исследования на пучках прототипов и опытных образцов камер с падовой структурой всех перечисленных типов и гранулярности, предназначенных для 20 регионов мюонного детектора. Впервые двухслойная камера с проволочными падами типа WPC с удвоением числа первичных кластеров в зазоре была разработана в ПИЯФ [5]. При исследовании на пучке пи-мезонов с энергией 3 Гэв прототипа такой камеры, наполненной газовой смесью $Ar(40\%)CO_2(50\%)CF_4(10\%)$, с диаметром проволочек 30 мкм, с шагом 1.5 мм и зазором $h=2.5$ мм, с проводным объединением слоев, с площадью пада $8 \times 16 = 128$ см² и емкостью $C_{дет} = 200$ пФ получено временное разрешение $\sigma_t = 2.2$ нс и близкая к 100% эффективность регистрации на временном интервале $\Delta t = 20$ нс. Экспериментально показано, что камеры WPC удовлетворяет требованиям эксперимента ЛНСб по быстроедействию и по такому параметру, как ширина пространственного кластера, а также имеет относительно низкий уровень кросстоков.

Двухслойные индукционные падовые камеры CPC-типа с диаметром проволочек, шагом, зазором, газовой смесью как WPC, также выполненные с удвоением числа первичных кластеров в зазоре, имеют между печатными падами более высокие емкостные кросстоки, т.к. выше диэлектрическая проницаемость среды. На рис. 5 приведены зависимости временного разрешения и эффективности камеры-прототипа на трех временных интервалах $\Delta t = 15, 20, 25$ нс от напряжения, полученные на пучке пи-мезонов с энергией 3 ГэВ. Получено временное разрешение $\sigma_t = 2.1–2.5$ нс и близкая к 100% эффективность регистрации частиц на временном интервале $\Delta t = 20$ нс при порогах регистрации 3–5 н.эл. Как и ожидалось, главным фактором, определяющими временное разрешение CPC- и WPC-камер, является одинаковое число первичных электронов, образующихся в рабочем зазоре $4h$. Из рис. 5 видно по “выполаживанию” зависимости временного разрешения от напряжения, что предельный порог $Th = 1$ н.эл. находится при напряжении $HV = 3.4$ кВ. Из амплитудных

измерений известно, что газовое усиление удваивается при изменении напряжения на 100 В. Это позволяет определить пороги в п.э.л. при других напряжениях. По первому электрону фиксируем первый конец зазора h . При 3.25 кВ порог составит 2 п.э.л., при 3.15 кВ – 4 п.э.л., 3.05 кВ – 8 п.э.л., 2.95 кВ – 16 п.э.л. Видно, что эффективность начинает “загибаться” приблизительно при напряжении 3 кВ, что объясняется тем, что порог приблизился к среднему числу образования кластеров на длине трека 5 мм. По указанному порогу фиксируем второй конец зазора h . Если зависимость временного разрешения от напряжения аппроксимировать двумя прямыми (жирные пунктирные линии), то можно найти, что наклоны прямых отличаются в 2.5 раза. Будем считать, что для одной из прямых скорость дрейфа известна и составляет 90 мкм/нс – у катода (см. рис. 6), значит для другой прямой скорость дрейфа больше в 2.5 раза и составляет 225 мкм/нс – вблизи анода. Такое описание полученной зависимости позволяет оценить полное время собирания электронов из зазора анод–катод h как 16.6–19.4 нс (для разных аппроксимаций, точность которых невысокая, но позволяет сделать важную оценку).

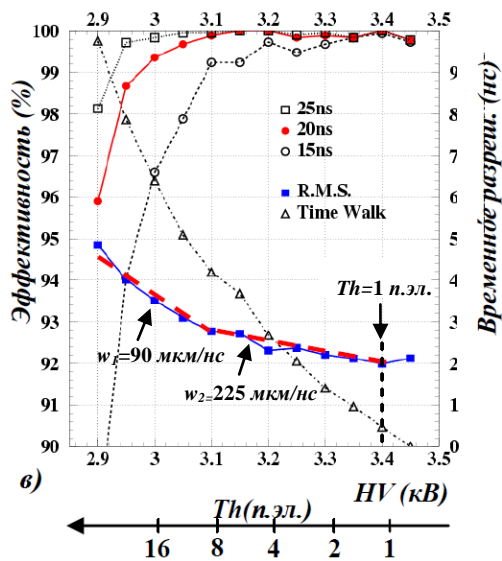


Рис. 5. Зависимости временного разрешения и эффективности камеры на трех временных интервалах $\Delta t=15, 20, 25$ нс от напряжения, полученные для двухслойной СРС-камеры с проводным объединением слоев. Показана также зависимость от напряжения среднего значения временного спектра (Time Walk). Размеры печатного катодного пада $4 \times 8=32$ см², диаметр проволочек 30 мкм, шаг 1.5 мм, газ Ar(40%)CO₂(50%)CF₄(10%).

На рис. 7 приведены зависимости временного разрешения и эффективности двухслойной камеры-прототипа СРС на интервалах 20 и 25 нс от интенсивности пучка, характеризующие быстродействие камеры и мертвое время канала регистрации, измеренные совместно с детекторной электроникой ASDQ++ [6–8].

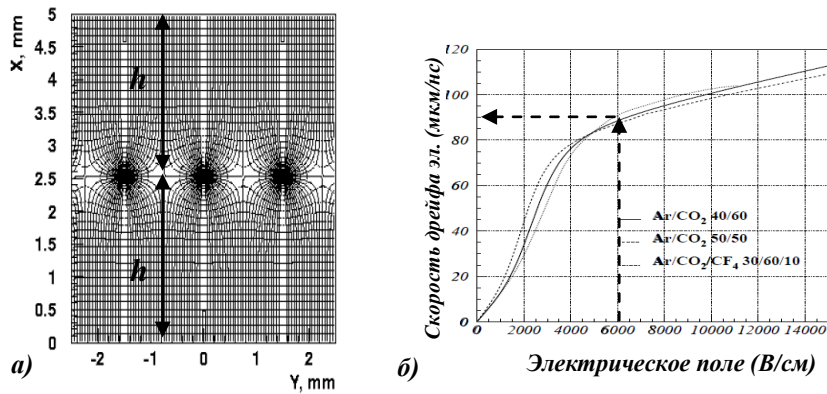


Рис. 6. Электрическое поле в зазоре $2h$ симметричной проволочной камеры (а), зависимость скорости дрейфа электронов от значения электрического поля (б). Стрелки указывают на величину скорости дрейфа электронов вблизи катода – 90 мкм/нс.

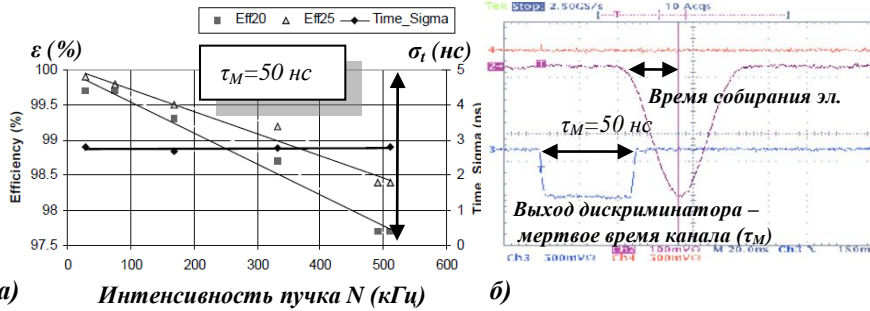


Рис. 7. Зависимости временного разрешения и эффективности CPC-камеры во временном окне 20 и 25 нс от интенсивности пучка, измеренные с детекторной электроникой ASDQ++ с пиковым временем 8 нс (а). По падению эффективности на 2.5% из-за просчетов при интенсивности пучка 500 кГц получаем такую же ширину импульса 50 нс, какая показана на выходе дискриминатора; время собирания электронов из зазора камеры отражает фронт импульса на выходе усилителя (б).

Как видно, временное разрешение остается постоянным в широком интервале интенсивностей, вплоть до $N=500$ кГц/канал, но эффективность ε уменьшается из-за просчетов, т. е. из-за мертвого времени камеры и электроники. По относительному уменьшению эффективности $\Delta\varepsilon/\varepsilon_0$ можно оценить, что ширина импульсов на выходе дискриминатора составляет $\tau_M = \frac{1-\Delta\varepsilon/\varepsilon_0}{N} = \frac{1-0.975}{500} \times 10^6 = 50$ нс, что согласуется с удвоенным временем собирания электронов из зазора вместе с пиковым временем усилителя, см. фронт сигнала и ширину импульса по основанию на выходе усилителя на рис.7б.

После собирания электронов импульс на выходе усилителя-формирователя ASDQ++ примерно столько же времени спадает, сколько нарастал – полугауссиан [6].

На рис. 8 приведены результаты измерений на пучке пи-мезонов с энергией 3 ГэВ характеристик четырехслойной CPC-камеры с 8-ю рядами падов, размеры которых $2.8 \times 3.5 \text{ см}^2$ [9]. Камера имеет 384 канала съема информации – по 192 канала с каждой двухслойной камеры (*Bigap AB* и *Bigap CD*) и электронику ASDQ++. Видно, как и на рис. 6, что плато эффективности регистрации частиц в окне 20 нс – 500 В. Однако, как дополнительно показано на рисунке, плато уменьшилось до 300 В, если принять за норму ширину пространственного кластера $CS=1.2$. Ширина пространственного кластера вызвана индукцией заряда, локализованного на проволочке, и определяется величиной зазора и порогом регистрации в первичных электронах (*п.эл.*), см. эмпирическую формулу (2):

$$(CS)_{Th=1 \text{ п.эл.}} = 1 + \frac{0.836}{W}; (CS)_{Th=3 \text{ п.эл.}} = 1 + \frac{0.6}{W}; (CS)_{Th=6 \text{ п.эл.}} = 1 + \frac{0.442}{W}, \quad (2)$$

где W – физическая ширина катодного пада в см, $h=2.5 \text{ мм}$ – зазор анод-катод при шаге проволочек 1.5 мм. Норме $CS=1.2$ удовлетворяет ширина катодного пада 3 см (2 см) при пороге $Th=3 \text{ п.эл.}$ (6 п.эл.). При меньших размерах пада будут срабатывать два пада одновременно. К значению CS добавляются электрические кросстоки через емкостные связи, вклад которых в CPC-камерах на порядок больше, чем в WPC, и которые следует минимизировать соответствующей конструкцией [10].

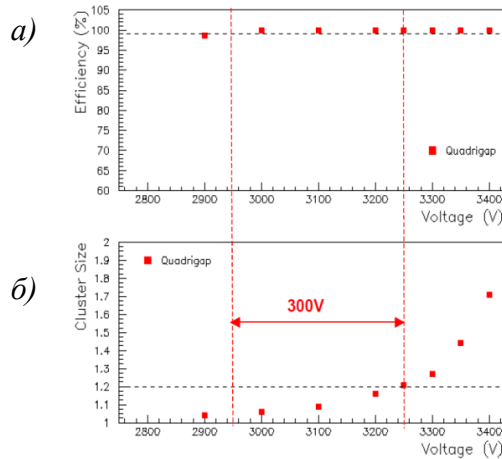


Рис. 8. Плато эффективности четырехслойной CPC-камеры составляет 500 В (а), которое ограничивается сверху принятой нормой $CS=1.2$ для ширины пространственного кластера и уменьшается до 300 В (б).

Исследования камер-прототипов на пучках с целью поиска оптимальной конструкции с минимальными кросстоками заняли значительное время; дополнительные результаты измерений можно найти в работах [11–14]. Автором диссертации были обнаружены паразитные резонансы в СПС-камерах и найдены способы их подавления [10]. В главе 2 приведены также результаты сравнительного исследования на пучке двухслойных СПС-камер: с асимметричным зазором и одним сегментированным катодом (ближайшем к проволочкам), а также симметричной камеры с двумя сегментированными катодами (“суперсимметричной” камеры). Суммарные зазоры составляющих структуру камер равны: $h1+h2=5$ мм в асимметричной и $2h=5$ мм – в симметричной. Амплитуды сигналов в таких камерах почти одинаковые [13, 14]. Камеры были собраны в одном корпусе и газовом объеме с тем, чтобы обеспечить одинаковые условия измерений, т. к. ожидаемый эффект незначительный ~20%. У асимметричной камеры ширина пространственного кластера оказалась меньше чем у симметричной, однако преимущество исчезает с увеличением электрических кросстоков до 6%, поэтому асимметричные камеры не нашли применения в ЛHCб.

Индукционный зазор 1 мм легко достигается в микроструктурном детекторе, выполненном на газовом электронном умножителе GEM (*Gas Electron Multiplier*) [15]. Норма $CS=1.2$ выполняется в том числе при пороге 1 н.э. Это свойство оказалось решающим в пользу GEM-детектора при создании камер M1R1 с шириной пада в горизонтальной (отклоняющей) плоскости ЛHCб-спектрометра $\Delta x=1$ см и $\Delta y=2.5$ см – в вертикальной. В работах автора с коллегами [16–18] на 3 года раньше других работ (приоритет) было впервые показано, что под воздействием сильноионизирующих α -частиц, специально введенных в газовую смесь, в трехкаскадном детекторе *Triple-GEM* разряды в отверстиях – активном элементе наблюдаются при усилении, превышающем 4×10^4 , что позволяет успешно применять такие детекторы в экспериментах физики высоких энергий (там же показано, что в детекторе *Double-GEM* пробои наблюдаются при усилении 1000, что недопустимо, такой детектор быстро выйдет из строя). В работе [19] обсуждаются другие особенности детектора *Triple-GEM*, где автором решена серьезная проблема минимизация кросстоков введением блокирующих конденсаторов.

Значительные усилия предприняты коллаборацией ЛHCб в исследовании опытных образцов мюонных камер в радиационных полях при больших накопленных дозах – 1 Кл/см длины проволочки, что соответствует 10 годам работы камер в эксперименте ЛHCб [20]. Эти исследования привели к следующим важным выводам:

1) Катоды и катодные пады с целью предотвращения образования на них оксидных изоляционных пленок следует выполнять золочеными: без золочения катодов закись меди могла бы вызвать со временем эмиссию с катода – эффект Мальтера;

2) Добавка CF_4 уменьшена до 5%, т. к. при 10% заметно травление стеклопластика;

3) Установлено прямым наблюдением, что добавка CF_4 полезна, т. к. “чистит” проволочки, противодействуя осаждению радикалов на проволочках, что может приводить к возникновению в камере нежелательных разрядов;

4) Для снижения рабочего напряжения увеличен шаг проволочек с 1.5 мм до 2 мм;

5) Сформулированы окончательные параметры проволочных камер для мюонного детектора: симметричный зазор $h=2.5$ мм; диаметр проволочек 30 мкм, шаг намотки – 2 мм; рабочий газ – $Ar(40\%)CO_2(55\%)CF_4(5\%)$. С увеличением шага с 1.5 мм до 2 мм рабочее напряжение снижено на 500 В; временной спектр уширился, но в допустимых пределах.

Измерения, выполненные на камерах окончательной конструкции, показали, что зависимость временного разрешения от напряжения “выползает” при напряжении 2800 В, что соответствует порогу регистрации $Th=1$ н.э.л. (см. рис. 9).

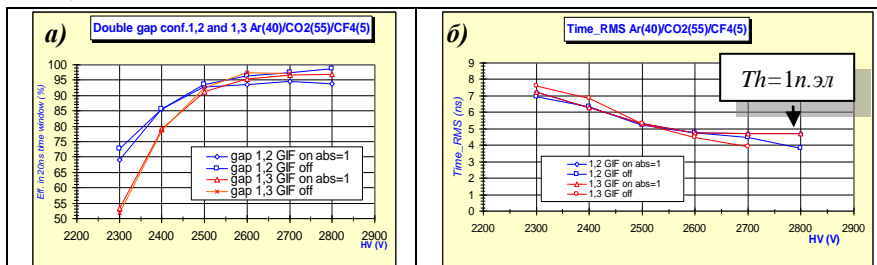


Рис. 9. Зависимости эффективности регистрации мюонов высоких энергий (а) и временного разрешения (б) от напряжения, приведенные для каждой пары зазоров четырехслойной камеры МЗР1 при включенном и выключенном фоне гамма-излучения 40 кГц/см². МЗР1 - камера комбинированного (смешанного) типа с сегментацией обоих катодов с “эффективными” падами 6.8×40.7 мм².

С уменьшением напряжения на камере на 100 В газовое усиление уменьшается в 2 раза. При напряжении 2600 В порог становится равным 4 н.э.л. Последний принято в коллаборации считать “оптимальным” (см.

главу 5). Рабочее напряжение может устанавливаться в пределах от 2550 В до 2800 В (имеется платó 250 В, которое ограничивается принятой нормой для ширины пространственного кластера $CS=1.2$). В камерах нет пробоев до $HV=2900$ В. Приведенные на рис. 9 характеристики получены на специальном пучке мюонов с энергией 100 ГэВ (X5-SPS, CERN) в присутствии интенсивного гамма-излучения 40 кГц/см^2 (GIF – *Gamma Irradiation Facility*); последний частично имитировал ожидаемый фон в эксперименте LHCb. Из рисунка видно, что фон, образуемый включением GIF, не приводит к заметному изменению основных характеристик камеры – временного разрешения и эффективности.

В главе 3 обсуждаются вопросы технологии массового производства мюонных камер окончательной конструкции, которые представлены в таблице 1, и контроля качества производства. Основное внимание в диссертации уделяется не столько производству, сколько проблемам тренировки и тестирования камер внутренней области мюонных станций M1–M5. Для мюонного детектора изготовлено 1380 камер из них 1368 – проволочных камер, имеющих свыше 5 млн. точек фиксации сигнальных проволочек (12 камер *Triple-GEM*). Фиксация концов проволочек выполнена пайкой и приклеиванием их эпоксидной смолой. Термин “массовое производство”, вынесенный в название главы, применен в связи с изготовлением большого числа камер; такое количество камер для одного детектора в спектрометрах физики высоких энергий производилось впервые. Следует подчеркнуть, что на производство отводилось не более трех лет, поэтому необходимо было производить камеру в день. Такой темп относился также к тренировке и испытанию камер. Одним из важных этапов проверки качества изготовления проволочных камер является проверка натяжения сигнальных проволочек после их фиксации. В этой главе описаны два прибора для измерения натяжения проволочек, разработанные при активном участии автора [21, 22]. Этими приборами, встроенными в технологическое оборудование для производства камер, были оснащены шесть центров производства мюонных камер: два в ПИЯФ, три в Италии и один в ЦЕРНе.

В этой главе впервые поставлена и решена задача ускоренного вывода новых (после изготовления) камер область рабочих и максимальных напряжений. Автором предложен и внедрен новый метод, заключающийся в одновременном воздействии на проволочки отрицательной короны и облучения активной области камеры гамма-квантами с энергией 660 кэВ от интенсивного источника ^{137}Cs установки GIF (интенсивность 40 кГц/см^2) [23]. Без такого облучения время тренировки составляло в среднем 48 ч, а с облучением 5 ч – почти на порядок меньше. После

“обработки” поверхности проволочек бомбардировкой положительными ионами повышенной концентрации, подача положительного напряжения – рабочего и даже максимального $HV=2900\text{ В}$ при выключенном гамма-источнике проходила за секунды без проблем.

Впервые для контроля поверхности катодов автором диссертации применено интенсивное облучение новых камер, что позволило обнаружить уникальное явление – эмиссию с катода в некоторых новых камерах, возникающую при рабочем напряжении. В лабораторных условиях такое явление не возникало и осталось бы незамеченным. Эмиссия была обнаружена по скачку тока при нормальном режиме работы, т. е. при положительном напряжении на проволочках, при облучении интенсивным гамма-источником GIF [24]. Возникавший ток превышал темновой ток в 1000 и более раз и при выключении гамма-источника не исчезал, продолжал протекать, много часов (и даже суток), что характеризует явление как автоэлектронную эмиссию. Как выяснилось при вскрытии некоторых камер, эмиссия с катода была обусловлена загрязнением поверхности металла эпоксидной смолой из-за несовершенства технологии дозирования эпоксидной смолы (смола выдавливалась из-под спэйсеров и попадала на металл катода, где растекалась очень тонким слоем). На подавление паразитной эмиссии потребовалось довольно много часов работы камеры при непрерывном интенсивном облучении. Сегодня можно утверждать, что предложенный автором диссертации метод подавления эмиссии разрушением эмиттеров оказался полезным [24]; камеры с подавленной эмиссией успешно функционируют в эксперименте ЛНЦб уже три года в сеансах 2010-12 г.г. Изготовление новых камер привело бы к значительным расходам. В работе [25] описана дополнительная методика контроля однородности газового усиления камер по площади.

Глава 4 посвящена электронике мюонных камер. Здесь рассмотрен широкий спектр вопросов. Для минимизации эквивалентного шумового заряда (*ENC – Equivalent Noise Charge*) и функции временного разрешения в диапазоне емкостей детектора 50–250 нФ прежде всего выбрано оптимальное пиковое время. На этапе исследования камер-прототипов, предназначенных для мюонной системы, применялась разработанная автором диссертации 16-канальная электроника ASDQ++ [26], выполненная на базе 8-канальной интегральной микросхемы ASDQ – лучшей микросхемы, имеющейся на тот период в промышленности. Введение автором на входе микросхемы ASDQ в каждом канале транзисторного каскада позволило при сохранении пикового времени и чувствительности схемы ASDQ в 10 раз уменьшить входное

сопротивление схемы (с 260 Ом до 25 Ом) и существенно увеличить допустимую емкость детектора (с 30 пФ до 250 пФ), при этом уменьшить шумы усилителя в 2 раза. Уменьшение входного сопротивления позволило существенно уменьшить емкостные кросстоки в индукционных камерах СРС-типа с печатными падами. Электроника ASDQ++ полностью удовлетворяла требованиям мюонного детектора, и параметры ASDQ++ были сформулированы в качестве технического задания для “своей” микросхемы CARIOCA – окончательная электроника [27]. Разработка микросхемы CARIOCA производилась по радиационно-стойкой субмикронной технологии CMOS фирмы IBM с проектными нормами 0.25 мкм. Микросхема CARIOCA имеет входное сопротивление 50 Ом (ASDQ++ 25 Ом) и пиковое время усилителя–формирователя – 10 нс (ASDQ++ 8 нс). Указанные значения пикового времени соответствуют довольно пологому минимуму эквивалентного шумового заряда:

$$(ENC)_{min} \approx 166 \frac{e_n}{\sqrt{T_p}} C_{det}. \quad (3)$$

Здесь эквивалентный шумовой заряд представлен в электронах, а размерности других величин: $e_n = \sqrt{4kT(R_s)} [нВ/\sqrt{Гц}]$, пиковое время $T_p [нс]$, емкость $C [пФ]$.

Дополнительно коллаборацией была разработана 16-канальная микросхема DIALOG, выполненная по той же технологии, что и CARIOCA, с рядом исключительно важных функций: программируемое задание длительности и задержки импульса в каждом канале, маскирование канала, установка индивидуальных порогов в каждом канале (в ASDQ++ порог – общий), логическое объединение каналов по И и ИЛИ, другие функции. Так, по предложению автора диссертации в каждый канал микросхемы был введен счетчик импульсов (“пересчетка” 24 дв.р., 100 МГц) – важное “нововведение”, применение описано в главах 5 и 6). Окончательная плата детекторной электроники конструктивно повторяет 16-канальную плату ASDQ++; новая 16-канальная плата получила название CARDIAC (CARIoca + DIALog Card).

Для измерения шумовых характеристик автором разработан новый метод реконструкции шумовых распределений [28–34]. Метод основан на теории математического анализа шумов Райса, известной в отечественной литературе, как “теория выбросов случайных процессов”. Разработанный метод предполагает существование особой характеристики усилителя-фильтра с подключенным детектором – *частоты Райса* (термин вводится впервые) [28, 31, 32]. Метод позволяет реконструировать одновременно два важных распределения: определить эквивалентный шумовой заряд на

входе предусилителя, а также определить дисперсию и положение нулевого порога распределения шумового счета на выходе дискриминатора; и выполнить это сканированием шумовой дорожки порогом дискриминатора. На рис. 10 показаны зависимости шумового счета на выходе дискриминатора от порога для различных значений емкости детектора, приведенные к центрированной и линеаризованной форме [33].

Эквивалентный шумовой заряд ENC определяется по наклону прямых, показанных на рисунке, по формуле:

$$y = \lg(f_{n0}) - \frac{\lg(e)}{2 \cdot (ENC)^2} x \Rightarrow (ENC) = 0.466 / \sqrt{\text{tg угла наклона}}. \quad (4)$$

Точка–вершина, в которой сходятся прямые, обозначенная как $f_n(0)$, в диссертации называется частотой Райса по имени автора формулы для среднего числа пересечений нулевого уровня случайным процессом в секунду. В частотной области значение функция $f_n(0)$ может быть найдено как

$$f_n(0) = \sqrt{\frac{\int_0^\infty f^2 S(f) df}{\int_0^\infty S(f) df}}, \quad (5)$$

где $S(f)$ - спектральная плотность шума на входе дискриминатора.

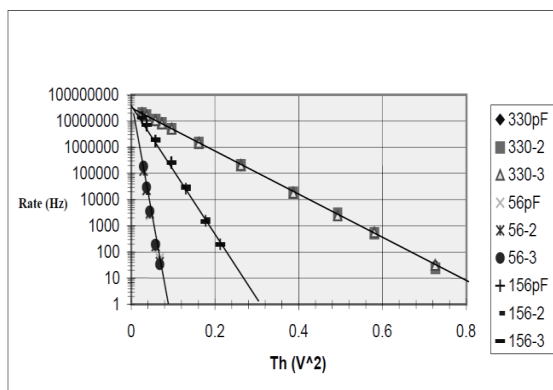


Рис. 10. Распределения шумового счета на выходе дискриминатора в зависимости от квадрата порога дискриминатора для различных значений емкости детектора $C_{det}=56-330$ нФ. По наклону прямых определяется ENC , в итоге – порог электроники, например, $Th=5 \cdot ENC$. Калибровка шкалы порогов может быть выполнена априори в единицах заряда (электронах) с необходимой точностью.

Определим частоту Райса $f_n(0)$ по формуле (5) для случая, когда доминирует последовательный шум e_n :

$$f_n(0) = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{\int_0^\infty (i_n^2 + e_n^2 \omega^2 C^2) |H(j\omega)|^2 \omega^2 d\omega}{\int_0^\infty (i_n^2 + e_n^2 \omega^2 C^2) |H(j\omega)|^2 d\omega} \right]^{\frac{1}{2}} \approx \frac{1}{2\pi} \left[\frac{\int_0^\infty |H(j\omega)|^2 \omega^4 d\omega}{\int_0^\infty |H(j\omega)|^2 \omega^2 d\omega} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$f_n(0) = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{\int_0^\infty \omega^4 \frac{1}{1+\omega^2(R_{in}C_{det})^2} \frac{\omega^2\tau^2}{1+\omega^2\tau^2} \frac{1}{1+\omega^2\tau^2} d\omega}{\int_0^\infty \omega^2 \frac{1}{1+\omega^2(R_{in}C_{det})^2} \frac{\omega^2\tau^2}{1+\omega^2\tau^2} \frac{1}{1+\omega^2\tau^2} d\omega} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (6)$$

Как видно, в этом случае i_n , e_n – спектральные плотности флуктуаций тока и напряжения на входе предусилителя исчезли, $\omega = 2\pi f$ – круговая частота, $|H(j\omega)|$ – модуль передачи усилителя-фильтра по напряжению. Получим, что при типовых величинах $e_n=1$ нВ/√Гц и $i_n=0.5$ нА/√Гц и $e_n^2\omega^2C^2 \gg i_n^2$ частота Райса существует и, как видно из формулы (6), становится детерминированной характеристикой усилителя-фильтра. В этом случае частота Райса не сильно меняется в диапазоне интересующих нас емкостей детектора 50–250 пФ, а в логарифмическом масштабе это изменение совсем незначительное, что объясняет наличие на рис. 10 общей вершины. Не трудно видеть, что точность определения ENC этим методом зависит в основном от точности калибровки шкалы порогов, см. формулу (4).

После установки камер в шахте этим методом определялся шум во всех каналах мюонного детектора (122112 каналов). Особенность мюонного детектора LHCb в том, что 24 типа камер с различной гранулярностью имели свои характерные емкости, что позволило автору построить “классическую” зависимость ENC от C_{det} и установить согласие ее с расчетом и, таким образом, подтвердить вывод о тепловой природе наблюдаемого шума [35]. Результаты этого исследования показали, кроме того, что на глубине 100 метров под землей шум меньше, чем в лаборатории приблизительно на 1000 эл. Шум вносит входной каскад электроники, носит характер теплового шума, а не иного. Этому результату способствовало качественное экранирование и заземление элементов мюонного детектора [36].

Глава 5 посвящена предустановочным тестам [37, 38] и оптимизации режима работы камер мюонного детектора в шахте [39]. Оптимизация заключается в минимизации газового усиления. Газовое усиление камер типа WPC и CPC-DCRO определяется по формуле:

$$G = \frac{N(\text{эл.})}{N(\text{п.эл.})} = \frac{1}{2} \cdot \frac{Th(\text{эл.})}{\delta \cdot Th(\text{п.эл.})} = \frac{1}{2} \cdot \frac{5 \cdot (ENC)}{\delta \cdot Th(\text{п.эл.})} \quad (7-1)$$

а камер CPC-SCRO – по формуле:

$$G = \frac{N(\text{эл.})}{N(\text{п.эл.})} = \frac{Th(\text{эл.})}{\delta \cdot Th(\text{п.эл.})} = \frac{5 \cdot (ENC)}{\delta \cdot Th(\text{п.эл.})} \quad (7-2)$$

Газовое усиление одного слоя в камере с проводным объединением двух слоев типа WPC и CPC-DCRO (*Double Cathode Readout*) составляет половину, отсюда $\frac{1}{2}$ в формуле (7-1) в отличие от CPC-SCRO (*Single Cathode Readout*). В числителе в формулах (7-1,7-2) – минимальный порог

электроники, определяемый по измеренному эквивалентному шумовому заряду (ENC), усредненному по всем каналам, в знаменателе – максимальный порог регистрации в первичных электронах, т. е. наибольший порог, при котором выполняется норма $\varepsilon=0.95$ – эффективность регистрации частицы на временном интервале $\Delta t < 25$ нс по первичной ионизации в зазоре с толщиной слоя $2h=5$ мм (рис. 3). Параметр $\delta=0.106$ в формуле (7) – баллистический дефицит усилителя CARIOCA. Этот параметр был измерен автором диссертации в работах [40–42] с применением тонкостенных дрейфовых трубок по данным измерений газового усиления и счетной характеристики от источника гамма-квантов ^{55}Fe при использовании усилителя CARIOCA. Измеренное значение $\delta=0.085$ применялось в расчетах газового усиления по формулам (7-1 и 7-2), см. таблицу 2.

Минимизация газового усиления минимизирует в свою очередь ширину пространственного кластера, которая монотонно увеличивается с увеличением газового усиления, а также все виды кросстоков, позволяет продлить время жизни мюонных камер, т. к. уменьшается накапливаемый заряд. “Оптимальным” порогом регистрации, принятым коллаборацией, считается $Th_{pe} = 4$ н.эл.

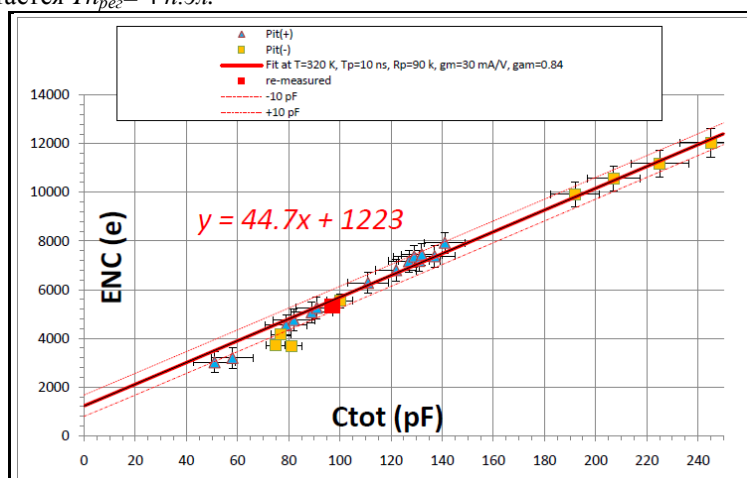


Рис. 11. Зависимость ENC от емкости детектора и параметры фитирования прямой линией. Пунктирными линиями показаны пределы разброса значений емкости детектора ± 10 пФ, известные из измерений, выполненных в лаборатории для каждого канала камер. Результат фитирования следует понимать как: $ENC = 1223 + 44.7$ эл./пФ. Полученный наклон прямой согласуется с измерениями, выполненными в лаборатории для детекторной электроники CARDIAC (микросхема CARIOCA с цепочками диодной защиты на входах), но значение в “нуле” в шахте меньше приблизительно на 1000 эл.

По найденному газовому усилению G устанавливалось напряжение V на каждом слое многослойной камеры, которое определялось по формуле, полученной фитированием результатов прецизионного измерения газового усиления от напряжения²:

$$V = (\ln G + 6.21) / 0.0067. \quad (8)$$

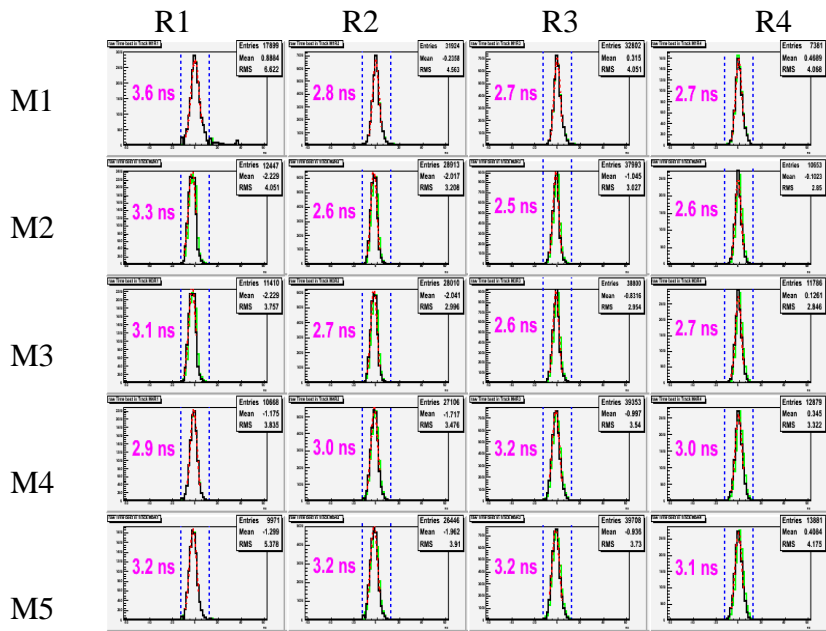


Рис. 12. Временные распределения 20 типов камер мюонного детектора, полученные на частицах в сеансах 2010 года на встречных протонных пучках с энергией 3.5 ТэВ на пучок.

Показано, что режим, установленный для сеансов 2010–2012 г.г. (*LHC Run 1*), обеспечивает достаточно высокую эффективность камер мюонного детектора, см. рис.12 и рис.13. Расчеты, выполненные автором с использованием табулированных величин C_{dem} и значений ENC из рис. 11 хорошо согласуются с экспериментом, где пороги электроники найдены измерением шумов. Предложенный метод имеет предсказательную силу, при рассогласовании расчетного и установленного напряжения (газового усиления) видно, где и насколько порог в первичных электронах отклоняется от расчетного значения, и какая требуется подстройка.

² Dané E, Penso G., Pinci D., Sarti A. Detailed study of the gain of the MWPCs for the LHCb muon system Nucl. Instr. and Meth. A 572 (2007). p. 682–688.

Уменьшение напряжений и газового усиления в 2012 году привело к увеличению порогов регистрации в среднем с 4.2 до 5.4 *п.эл.* (таблица 2).

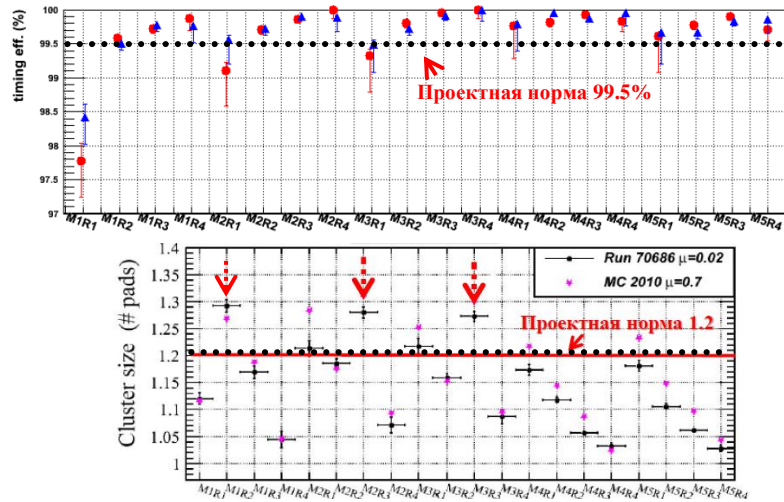


Рис. 13. Основные характеристики мюонного детектора: эффективность мюонных камер на временном интервале 20 нс (а) и ширина пространственного кластера (б) для 20 типов камер мюонного детектора, полученные в сеансах 2010 года на встречных протонных пучках с энергией 3.5 ТэВ на пучок. Пунктирными линиями показаны проектные нормы по эффективности 99.5 % ($\sigma_t=3.5$ нс), по ширине пространственного кластера 1.2.

В будущем сеансе *LHC run 2*, который начнется в апреле 2015 года, вероятно, будет проведена более тонкая настройка режима работы камер мюонного детектора. Опыт 2012 года показывает, что “оптимальный” порог регистрации можно увеличить до 8 *п.эл.*, что позволит, уменьшить мертвое время в камерах M1R2 и M1R3, которое оказалось 80 и 65 нс соответственно (вместо 50 нс), скорее всего из-за повышенных кросстоков, вызванных в том числе перегрузками фоном с большей ионизацией (если сравнивать с мюонами высоких энергий).

В 2011 году эксперимент LHCb вышел на проектную светимость $2 \times 10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Из приведенных в главе 6 измерений видно, что характеристики камер соответствуют нормам и требованиям эксперимента LHCb. Полученная эффективность мюонного детектора, выше 99%, привела к эффективности идентификации мюонов 98%, а не-мюонов 2%, т. е. лучше проектных 95%, а не-мюонов 5%, соответственно. В сеансах эксперимента LHCb 2010-2012 г.г. впервые получены важные научные результаты, которые вывели эксперимент LHCb на уровень мирового лидера в области изучения *B*- и *D*-мезонов. Всего за этот период опубликовано 220 работ и сделано столько же докладов на

международных конференциях. Часть результатов эксперимента приведена в работах с участием автора диссертации [45–50]. Среди важнейших достижений эксперимента LHCb следует отметить наблюдение редких распадов систем $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$, $B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$, причем впервые на статистике 3 фбн^{-1} показано, что полученные вероятности распадов хорошо согласуются с предсказаниями Стандартной модели [50]. Для окончательных выводов и поиска отклонений от СМ требуется существенно увеличить статистику, что планируется сделать в следующих сеансах, эксперимент LHCb продолжается.

Таблица 2. Режимы камер мюонного детектора – расчетные и рабочие (Run1), а также предлагаемые (Run2, см. *)). Расчет выполнен по формулам (7 и 8) с использованием табулированных значений $C_{\text{дет}}$ и рис.11.

Тип камеры	$C_{\text{дет}} (n\Phi)$	Th (эл.)	G	$\ln(G)$	$V_{\text{расчет}} (B)$	$V_{\text{LHC-Run1}} (B)$	$Th_{\text{Run1}} (n.эл.)$	$V_{\text{Run2}}^* (B)$
M1R1	30+10	18000	6000	–	1280	1280	1	1280
M1R2	58+10	21313	55720	10.93	2558	2550	5	2550
M1R3	82+10	26677	62769	11.05	2576	2570	5	2570
M1R4	122+10	35617	63488	11.06	2577	2580	4	2580
M2R1	131+10	37629	49188	10.80	2539	2530	5	<u>2500[*]</u>
M2R2	112+10	33382	78546	11.27	2609	2610	5	<u>2540[*]</u>
M2R3	130+10	37405	55007	10.92	2556	2550	8	2550
M2R4	165+10	45228	59121	10.99	2567	2560	5	<u>2500[*]</u>
M3R1	137+10	38970	45846	10.73	2529	2530	5	<u>2500[*]</u>
M3R2	115+10	34053	89026	11.40	2628	2620	5	<u>2550[*]</u>
M3R3	120+10	35170	51721	10.85	2547	2550	8	2550
M3R4	185+10	49698	58468	10.98	2565	2570	5	<u>2520[*]</u>
M4R1	79+10	26007	61192	11.02	2572	2570	5	<u>2520[*]</u>
M4R2	140+10	39640	58294	11.10	2584	2580	7	<u>2560[*]</u>
M4R3	145+10	40758	68500	11.13	2589	2590	7	<u>2570[*]</u>
M4R4	205+10	54168	63726	11.06	2578	2580	5	<u>2530[*]</u>
M5R1	82+10	26677	62769	11.05	2576	2580	5	<u>2530[*]</u>
M5R2	139+10	39417	57965	10.97	2564	2550	8	2550
M5R3	150+10	41875	82108	11.32	2616	2600	6	<u>2570[*]</u>
M5R4	225+10	58638	68985	11.14	2590	2600	5	<u>2540[*]</u>

В Главе 6 приведены характеристики камер мюонного детектора, полученные в шахте сначала на космических лучах (2009 год) [43], а затем – результаты, впервые полученные в условиях реального эксперимента LHCb при энергиях сталкивающихся протонных пучков 3.5 и 4 ТэВ на пучок, и при светимости $4 \cdot 10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ – в 2 раза выше проектной. Дополнительно получены данные для светимости $10^{33} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, которая в 5 раз превышает проектную, и показано, что камеры мюонного детектора справляются с нагрузками при такой светимости [44].

С 14 февраля 2013 г. по апрель 2015 г. ускоритель не работает (*Long Shutdown 1*). Это - первая запланированная остановка Большого адронного коллайдера, в течение которой будет проведена его модернизация с целью повышения энергии пучков до 6,5 ТэВ на протон (13 ТэВ полная энергия столкновения), повышения светимости коллайдера пока не будет. В сеансах *LHC Run2* планируется достичь суммарной статистики 10 фбн^{-1} при прежней светимости. Только в 2018 году эксперимент LHCb выйдет на повышенную светимость $2 \cdot 10^{33} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ (*LHC Run3*), при которой в 10 раз повысится нагрузка мюонных камер. Следует отметить, что мюонный детектор в меньшей степени будет подвержен модификации в сравнении с другими суб-детекторами LHCb-спектрометра: демонтируется мюонная станция M1, а в камерах M2R1 и M3R1, ближайших к пучку, потребуются повысить гранулярность [51]. Один из проектов такой модернизации с заменой проволочных камер на газовые умножители предложен автором диссертации [52, 53].

В конце каждой главы диссертации и в **заключении** приводятся положения работы, которые выдвигаются на защиту и которые в настоящем автореферате сведены вместе и сформулированы на стр.6–10.

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах

1. *LHCb Collaboration* (... , *Kashchuk A., et al.*). The LHCb Detector at the LHC // J. of Instr. 2008. v. 3. S08005.
2. *LHCb Collaboration* (... , *Kashchuk A., et al.*). LHCb Muon System. Technical Design Report // CERN LHCC 2001-010. CERN. Geneva. 2001.
3. *LHCb collaboration* (... , *Kashchuk A., et al.*). A Large Hadron Collider Beauty Experiment for Precision Measurements for CP Violation and Rare Decays. LHCb Technical Proposal // CERN LHCC 98-4. CERN. Geneva. 1998.
4. *Kashchuk A., Bochin B., Guets S., Ivochkin V., Lindner R., Poliakov V., Tsaregorodtsev A.* Beam test of micro-cathode strip chamber prototypes for the LHCb inner tracker // LHCb-98-008. CERN. Geneva. 1998.
5. *Bochin B., Kashchuk A., Lazarev V., Sagidova N., Spiridenkov E., Velichko G., Vorobiev A., Vorobyov A.* Wire Pad Chamber for LHCb Muon System // LHCb-2000-003. CERN. Geneva. 2000.

6. Kashchuk A., De Paula L., Riegler W., Schmidt B., Schneider T. Performance study of a MWPC prototype for the LHCb muon system with the ASDQ chip // LHCb-2000-062. CERN. Geneva. 2000.
7. Maréchal B., De Oliveira G., De Paula L.,..., Kashchuk A., et al. Construction and test of the prototype chamber for region 1 of the LHCb muon station 2 // LHCb-2001-150. CERN. Geneva. 2001.
8. Hutchcroft D., Kachtchouk A., Riegler W., Schmidt B., Schneider T., Suvorov V., Maréchal B., Gandelman M. Results obtained with the first four gap MWPC prototype chamber // LHCb-2001-024. CERN. Geneva. 2001.
9. Baldini W., Evangelisti F., Germani S., Landi L., Kashchuk A., Savrié M. Quadri gap Cathode Pad Chamber (CPC) prototype for the innermost region R1 of station M4 of the LHCb muon system // LHCb-2003-167. CERN. Geneva. 2004.
10. Kashchuk A. Methods of cross-talk reduction in the cathode pad chambers (CPC) of the LHCb muon system // LHCb-2003-138. CERN. Geneva. 2003.
11. Botchine B., Lazarev V., Saguidova N., Vorobyov A., Kachtchouk A., Riegler W., Schmidt B., Schneider T., Gandelman M., Maréchal B., Moraes D., De Paula L., Polycarpo E. Wire Pad Chambers and Cathode Pad Chambers for the LHCb Muon System // LHCb-2000-14. CERN. Geneva. 2000.
12. Kachtchouk A., Kristic R., Riegler W., Schmidt B., Schneider T., et al. Design and construction of the wire chambers for the LHCb muon system // LHCb-2001-026. CERN. Geneva. 2001.
13. Kashchuk A., Lippmann C., Riegler W., Schmidt B., Schneider T., Suvorov V. Asymmetric Single Cathode Read Out and Symmetric Double Cathode Read Out MWPCs for the LHCb muon system. LHCb-2003-001. CERN. Geneva. 2003.
14. Kachtchouk A., Lippmann C., Riegler W., Schmidt B., Schneider T., Suvorov V. Asymmetric and double-cathode-pad wire chambers for the LHCb muon system // Nucl. Instr. and Meth. A 555 (2005). p. 48-54.
15. Barbosa Marinho P.R.,..., Kashchuk A., et al. (LHCb Collaboration). LHCb Second Addendum to the Muon System Technical Design Report // CERN-LHCC-2005-012. CERN. Geneva. 2005.
16. Кацук А.П., Бочин Б.В., Поляков В.В. Результаты тестирования с помощью X-лучей двухкаскадных и трехкаскадных детекторов на основе газовых электронных умножителей для внутреннего трекера эксперимента LHCb // Препринт ПИЯФ 2283. ПИЯФ. Гатчина. 1998.
17. Kashchuk A., Bochin B., Poliakov V., Vorobyov A. X-ray tests of double and tripple GEM detectors for the LHCb inner tracker // LHCb-98-068. CERN. Geneva. 1998.
18. Kashchuk A., Botchine B., Gromov V., Poliakov V. Signal observation from minimum ionizing particles and time resolution estimation in the Triple GEM detector // LHCb-99-009. CERN. Geneva. 1999.
19. Kashchuk A. Performance analysis and remarks on Triple-GEM detector of the LHCb muon system // LHCb-2008-078. CERN. Geneva. 2008.
20. Kashchuk A., Suvorov V., Schmidt B., Schneider T., et al. First results of an aging test of a full scale MWPC prototype for the LHCb muon system // Nucl. Instr. and Meth. A515 (2003). p. 220-225.

21. *Ciambrone P., Dané E., Dumps R., Dwuznik M., Felici G., Forti C., Frenkel A., Graulich J.-S., Kachtchouk A., et al.* Automated wire tension measurement system for LHCb muon chambers // Nucl. Instr. and Meth. A 545 (2005). p. 156-163.
22. *Baldini W., Chiozzi S., Evangelisti F., Germani S., Kashchuk A., et al.* A Laser Based Instrument for MWPC Wire Tension Measurement // LHCb-2007-120. CERN. Geneva. 2007.
23. *Kashchuk A.* MWPC conditioning technique // LHCb-2005-096. CERN. Geneva. 2005.
24. *Graulich J.-S., Hilke H.-J., Kachtchouk A., Mair K., Schmidt B., Schneider T.* Conditioning of MWPCs for the LHCb Muon System // Proceedings of 2005 IEEE Nuclear Science symposium and Medical Imaging Conference. 23-29 October 2005. CERN-LHCb-2005-036. CERN. Geneva. 2005.
25. *Barbosa A.F., Dump R., Graulich J.-S., ..., Kachtchouk A., et al.* Production and quality control of MWPC for the LHCb muon system at CERN // IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-53 (2006). p. 336.
26. *Chiodi G., Corradi G., Felici G., Gatta M., Kashchuk A., Schmidt B.* ASDQ++ front-end board for the MWPC readout of the LHCb muon system // LHCb-2002-014. CERN. Geneva. 2002.
27. *Kashchuk A.* One universal LHCb muon amplifier chip versus two // LHCb-2002-040. CERN. Geneva. 2002.
28. *Kashchuk A.* Method for test and diagnostics of the on-detector front-end electronics for the LHCb muon system // LHCb-2002-013. CERN. Geneva. 2002.
29. *Kashchuk A., Sarti A., Nobrega R.* Procedure for determination and setting of thresholds implemented in the LHCb Muon system // LHCb-2008-052. CERN. Geneva, 2008.
30. *Kashchuk A., Nobrega R., Bocci V., Massafferri A., Schmidt B.* Diagnostics of the Muon System Front-end Electronics during the LHCb Experiment // Proc. of 11-th Workshop on Electronics for LHC and Future Experiments. 2005. p. 426-429.
31. *Кацук А.И.* Частота Райса – характеристика усилительного тракта и ее применение для реконструкции шумовых распределений // Препринт ПИЯФ 2860. Гатчина. 2011.
32. *Кацук А.И.* Применение теории Райса для реконструкции шумовых распределений в ядерной электронике // ПТЭ. 2012. т. 4. с. 26-34.
33. *Kashchuk A.* Threshold calibration and threshold finding procedure in various LHCb muon MWPC // LHCb-2007-068. CERN. Geneva. 2007.
34. *Anderlini L., Nobrega R., Gruber L., Kashchuk A., et al.* A new method based on noise counting to monitor the frontend electronics of the LHCb muon detector // J. of Instr. 2013. v. 8. P06001.
35. *Kashchuk A., Levitskaya O.* Equivalent Noise Charge (ENC) in the LHCb muon system measured at 100 meters under ground // LHCb-2010-023. CERN. Geneva. 2010.
36. *Kashchuk A.* On LHCb muon MWPC grounding // LHCb-2006-067. CERN. Geneva. 2006.
37. *Kashchuk A., Levitskaya O., Mair K., Nobrega R., Shatalov P., Schmidt B., Schneider T.* Pre-installation Tests of the LHCb muon chambers // Proc. of 2008

- IEEE Nuclear Science Symposium: Medical Imaging Conference and 16-th Room Temperature Semiconductor Detector Workshop. Dresden. 2008. p. 2812-2815.
38. Kashchuk A., Levitskaya O., Mair K., Nobrega R., Shatalov P., Schmidt B., Schneider T. Pre-installation tests of the inner-most LHCb muon WPC's // LHCb-2009-010. CERN. Geneva. 2009.
 39. Kashchuk A., Levitskaya O. From noise to signal – a new approach to LHCb muon optimization // LHCb-2009-018. CERN. Geneva. 2009.
 40. Kashchuk A.P., Kuchinskii N.A., Levitskaya O.V., Movchan S.A. Equivalent Noise Charge for Different Impedance Matching Schemes of the Drift Straw–Tube and the Amplifier // Письма в журнал Физика ЭЧАЯ. 2011. с. 68-77; Physics of Particles and Nuclei Letters. 2011. v. 8. p. 40-45.
 41. Kashchuk A., Gianotti P., Levitskaya O., Savrie M., et al. Measurement of the absolute gas gain and gain variations study in straw-tube detectors // J. of Instr. 2013. v. 8. T08001.
 42. Kashchuk A.P., Levitskaya O.V. Tests of thin–wall drift tubes developed for PANDA trackers // Main Scientific Activity 2007-2012. PNPI. Gatchina. 2013. p.371.
 43. Anelli M., Nobrega R.,Auremma G.,..., Kashchuk A., et al. Performance of the LHCb muon system with cosmic rays // J. of Instr. 2010. v.5. P10003.
 44. Alves A., Anderlini L.,Anelli M.,..., Kashchuk A., et al. Performance of the LHCb muon system // J. of Instr. 2013. v.8. P02022.
 45. Воробьев А.А., Бондарь Н.Ф., Бочин Б.В.,..., Кацурук А.П. и др. Эксперимент LHCb. Участие в подготовке и проведении экспериментов на LHC // Сообщение ПИЯФ РАН. Гатчина. 2009.
 46. Vorobyev A.A., Alkhasov G.D., Bochin B.V., ..., Kashchuk A.P., et al. Experiment LHCb at the LHC. // Main Scientific Activity 2007-2012. PNPI. Gatchina. 2013.
 47. Aaij R.,..., Kashchuk A., et al. (LHCb Collaboration). Implications of LHCb measurements and future prospects // arXiv:1208.3355; Eur. Phys. J. C 73 (2013). p. 2373.
 48. Aaij R.,..., Kashchuk A., et al. (LHCb Collaboration). Prompt K_S^0 production in pp collisions at $\sqrt{s} = 0.9 \text{ TeV}$. // Phys. Lett. B. v. 693 (2010). p. 69-80.
 49. Aaij R.,..., Kashchuk A., et al. (LHCb Collaboration). Measurement of $\sigma(pp \rightarrow b\bar{b}X)$ at $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ in the forward region // Phys. Lett. B. v. 694 (2010). p. 209-216.
 50. Aaij R.,..., Kashchuk A., et al. (LHCb Collaboration). First observation of $\bar{B}_s^0 \rightarrow D_s^{*+} X \mu^- \bar{\nu}$ decays // Phys. Lett. B. v. 698 (2011). p. 14-20.
 51. Bediaga I.,..., Kashchuk A., et al. (LHCb collaboration). Framework TDR for the LHCb Upgrade. Technical Design Report // CERN-LHCC–2012–007. LHCb-TDR-12. CERN. Geneva. 2012.
 52. Кацурук А.П., Козлов С.М., Левицкая О.В., Соловей В.А. Газовый электронный умножитель // Патент на полезную модель № 135425. Роспатент. Москва. 2013.
 53. Кацурук А.П., Козлов С.М., Левицкая О.В., Соловей В.А. Детектор заряженных частиц // Патент на полезную модель. № 135424. Роспатент. Москва. 2013.