

На правах рукописи

ЗАДЕБА ЕГОР АЛЕКСАНДРОВИЧ

**КООРДИНАТНО-ТРЕКОВАЯ УСТАНОВКА НА
ДРЕЙФОВЫХ КАМЕРАХ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ**

01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

**Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук**

Автор:



Москва - 2017

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ).

Научный руководитель: Петрухин Анатолий Афанасьевич,
доктор физико-математических наук,
профессор, главный научный сотрудник
НОЦ НЕВОД НИЯУ МИФИ

Официальные оппоненты: Хренов Борис Аркадьевич, доктор
физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник НИИЯФ
МГУ

Боголюбский Михаил Юрьевич,
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник НИЦ
«Курчатовский институт» - ИФВЭ

Ведущая организация: Физический институт им. П.Н. Лебедева
Российской академии наук

Защита состоится 6 декабря 2017 г. в 17 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.130.07 на базе НИЯУ МИФИ по адресу: 115409, Москва, Каширское шоссе, дом 31, телефон (499) 324-84-98.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ и на сайте <http://ods.mephi.ru/dissertations>

Автореферат разослан «__» _____ 2017 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в двух экземплярах, заверенный печатью организации.

Ученый секретарь диссертационного совета,
д.ф.-м.н., профессор



С.Е. Улин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

В ряде экспериментов по регистрации космических лучей наблюдается избыток групп мюонов ШАЛ при энергиях первичных космических лучей (ПКЛ) выше 10^{17} эВ по сравнению с расчетными оценками, даже в предположении тяжелого состава ПКЛ. Появление такого избытка мюонов может быть вызвано как космофизическими (изменение спектра и состава КЛ), так и ядерно-физическими (изменение характера адронного взаимодействия) причинами. Предпринятые до настоящего времени попытки решения этой проблемы на существующих установках пока результатов не дали. В экспериментах, проведенных в ЦЕРН на ускорительных детекторах ALEPH и DELPHI, наблюдался избыток групп мюонов космических лучей с множественностью свыше 100 частиц, количество которых превосходило ожидаемое даже при допущении чисто железного состава первичных космических лучей. В этих экспериментах не было возможности измерять зависимость множественности групп от энергии первичных космических лучей. Эта задача была решена на экспериментальном комплексе НЕВОД-ДЕКОР.

Первые результаты исследования, проведенного на экспериментальном комплексе, продемонстрировали рост энерговыделения (в расчете на один мюон) при увеличении зенитного угла и, соответственно, энергии первичных частиц. Однако существующий координатно-трековый детектор ДЕКОР не перекрывает всю апертуру черенковского водного детектора и не исключает возможность прохождения части мюонов через промежутки между отдельными модулями детектора. Для компенсации этого недостатка на существующей установке потребуется длительный набор статистики, чтобы нивелировать влияние этих промежутков.

Другая проблема возникает при регистрации узких групп мюонов, когда расстояние между частицами меньше размеров детектирующих ячеек. В этом случае двойная, тройная и т. д. ионизация в ЧВД может возникнуть не за счет дополнительного энерговыделения, а по причине простого увеличения количества мюонов, прошедших через детектор. В существующей установке треки мюонов могут быть разделены, если расстояние между ними 3 см и более. Влияние этого недостатка будет расти при увеличении числа мюонов, ограничивая тем самым область исследуемых энергий.

Для устранения этих недостатков необходимо создание установки, имеющей непрерывную эффективную площадь, возможность разрешения соседних треков при меньших на порядок расстояниях, и при этом относительно небольшое число измерительных каналов. Одним из типов

детекторов, удовлетворяющих всем поставленным требованиям, являются многопроволочные дрейфовые камеры большой площади.

Научная новизна:

1. Создана первая в мире координатно-трековая установка на дрейфовых камерах (КТУДК) для исследования космических лучей под большими зенитными углами.

2. Новая установка на порядок превосходит существующий детектор ДЕКОР по координатной точности (1 и 10 мм соответственно) и возможности разделения соседних треков (3 и 30 мм) при близкой угловой (1.5° и 1°) точности реконструкции треков.

3. Достигнуто рекордное соотношение регистрируемой плотности мюонов космических лучей (10 частиц на м^2) к числу измерительных каналов на квадратный метр эффективной площади установки (2 канала на м^2) при высокой координатной (1 мм) и угловой (1.5°) точности реконструкции треков в многопроволочных дрейфовых камерах.

4. Впервые решена проблема триггирования установки на дрейфовых камерах с большим дрейфовым промежутком (время сбора электронов до 6 мкс) от быстродействующих (время выполнения триггерного условия 200 нс) крупномасштабных наземных детекторов космических лучей: черенковского водного калориметра и координатно-трекового детектора на стримерных трубках.

Достоверность:

1. Точность пространственных и угловых измерений треков частиц, регистрируемых дрейфовыми камерами, подтверждена калибровкой на мюонном годоскопе УРАГАН, прошедшем метрологические испытания и имеющем высокую угловую (1°) точность измерений.

2. Координатное разрешение установки КТУДК подтверждено совпадением треков одиночных мюонов, реконструированных по данным дрейфовых камер, с треками, реконструированными по данным координатно-трекового детектора ДЕКОР, измерительные модули которого имеют высокую угловую (1°) точность измерений.

3. Измеренные характеристики дрейфовых камер и установки в целом совпадают с эксплуатационными характеристиками, полученными во время работы камер в составе нейтринного детектора ускорителя У-70.

Практическая значимость

1. Созданная установка расширяет возможности экспериментального комплекса НЕВОД-ДЕКОР в исследовании избытка групп мюонов под большими зенитными углами.

2. Результаты работы, в первую очередь регистрирующая система, устройство несущих конструкций, методы тестирования дрейфовых камер и накамерной электроники, а также методы калибровки установки в целом будут использованы при создании существенно большей координатно-трековой установки на дрейфовых камерах площадью 250 м².

3. Разработанные и реализованные методы реконструкции треков частиц могут быть применены для любых многопроволочных дрейфовых камер, а также установок, созданных на их основе.

Личный вклад

Все работы по диссертации были выполнены лично автором, либо при его определяющем участии. Непосредственно автором были проведены исследования дрейфовых камер и накамерной электроники, разработаны алгоритмы совместной работы с триггерной системой НЕВОД, методы калибровки ДК на стендах и в КТУДК, разработана конструкторская и технологическая части проекта, большинство стендов и методов для тестирования элементов установки, разработана регистрирующая система, программное обеспечение для обработки экспериментальных данных. Автором были спланированы и проведены экспериментальные исследования характеристик КТУДК, получены и проанализированы методические и физические результаты, подготовлены основные публикации.

Автор защищает

1. Координатно-трековую установку на многопроволочных дрейфовых камерах (КТУДК) площадью 30 м², предназначенную для регистрации одиночных и групп мюонов под большими зенитными углами совместно с черенковским водным калориметром и координатно-трековым детектором на стримерных трубках.

2. Стенды и методы для тестирования дрейфовых камер и накамерной электроники.

3. Методы калибровки координатно-трековой установки на дрейфовых камерах по данным совместной работы с ЧВК и ДЕКОР.

4. Результаты сопоставления данных КТУДК, ДЕКОР и ЧВК при регистрации одиночных и групп мюонов под большими зенитными углами.

Апробация

Результаты работы были доложены на российских и международных конференциях: Международной конференции по космическим лучам (ICRC 2015), Всероссийских конференциях по космическим лучам (ВККЛ 2014, 2016), Европейском симпозиуме по космическим лучам (ECRS 2014), 19-м Международном симпозиуме по взаимодействиям космических лучей сверхвысоких энергий (ISVNECRI-2016), научных сессиях НИЯУ МИФИ (2014, 2015), Международных конференциях по физике частиц и астрофизике (ICPPA 2015, 2016), Международных сессиях-конференциях Секции ядерной физики ОФН РАН (2013, 2016), Международных конференциях «Ломоносов» (2015, 2016) и опубликованы в их трудах, а также в статьях в журналах: «Известия РАН. Серия физическая», «The European Physical Journal. Web of Conferences», «Journal of Instrumentation», «Physics Procedia», «Journal of Physics: Conference Series».

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации: 147 страниц, 110 рисунков, 17 таблиц, 54 наименования источников литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении приведено описание существующей проблемы избытка групп мюонов и экспериментов, в которых он наблюдался. Дано краткое описание экспериментального комплекса НЕВОД-ДЕКОР и полученных на нем результатов исследования групп мюонов. Отражена цель работы, научная новизна и актуальность создания новой координатно-трековой установки на дрейфовых камерах.

В главе 1 описаны дрейфовая камера ИФВЭ и ее основные характеристики, дано устройство стендов для тестирования и калибровки ДК, а также накамерной электроники, приведены результаты исследования зонных характеристик дрейфовых камер.

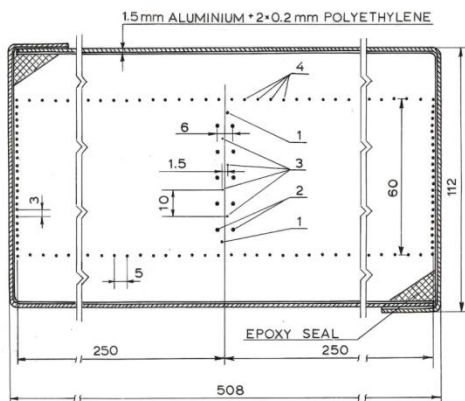


Рис. 1 Схема дрейфовой камеры, поперечное сечение: 1 – охранные, 2 – катодные, 3 – сигнальные, 4 – полеформирующие проволоки

направлении дрейфа (горизонтальное направление на рис. 1) на ± 0.75 мм относительно центра камеры. В перпендикулярном направлении расстояние между сигнальными проволоками равно 10 мм. Для устранения краевых эффектов введены две охранные проволоки. Однородное электрическое поле создается полеформирующими проволоками с шагом 5 мм, потенциал на этих проволоках меняется линейно от 0 до максимального значения -12 кВ.

После длительного перерыва в работе и процесса демонтажа из экспериментальной установки ИФВЭ дрейфовые камеры требовали проверки на предмет их целостности и сохранения своих характеристик. Проверку на целостность нитей успешно прошли все ДК, на них подавалось рабочее сигнальное и дрейфовое напряжение, снималось значение потребляемого при этом тока. Негерметичные камеры были проклеены.

Для исследования основных характеристик дрейфовых камер в МИФИ был разработан стенд, который представляет собой многоярусную раму: три яруса предназначены для дрейфовых камер, два для сцинтилляционных счетчиков (рис. 2).

На стенде дрейфовые камеры тестировались в режиме триггирования от сцинтилляционных счетчиков, подключенных к схеме совпадений. Исследовались эффективность, координатное и угловое разрешение, разрешение лево-правой неоднозначности. Из 32

Габаритные размеры камеры $4000 \times 508 \times 112$ мм³. Активная поверхность 3.7×0.5 м² составляет 91% общей поверхности, масса камеры 25 кг, газовый объем около 210 л, в камере используется газовая смесь 94% Ar и 6% CO₂.

Камера (рис. 1) содержит 4 сигнальных проволоки, попеременно смещенных в

доставленных в МИФИ дрейфовых камер были отобраны 16 для установки в координатно-трековой установке.

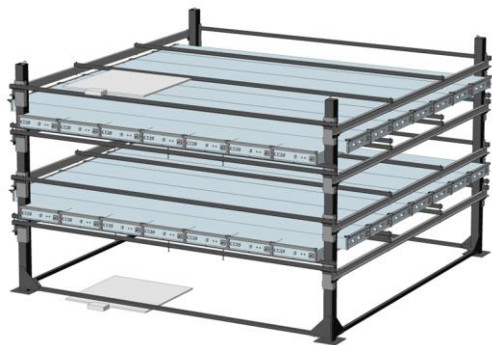


Рис. 2 Стенд с дрейфовыми камерами, установленными в две координатные плоскости, и двумя плоскостями сцинтилляционных счетчиков

Регистрирующая система стенда выполнена в двух вариантах – тестирование с осциллографом и время-цифровым преобразователем. Также разработано программное обеспечение для управления высоковольтным источником по шине I2C. Благодаря этому удалось исследовать шумовые характеристики дрейфовых камер.

Дальнейшее исследование дрейфовых камер в потоке космических лучей проводилось на супермодуле (СМ) мюонного годоскопа УРАГАН. Метод тестирования основан на совместной регистрации одиночных мюонов исследуемым детектором и мюонным годоскопом, обеспечивающим высокую пространственную точность регистрируемого трека мюона.

Для исследования зонных характеристик площадь дрейфовой камеры условно делится на ячейки размерами 5×20 мм (ячейки ориентированы вдоль ДК). Считается количество треков, прошедших через каждую ячейку, при этом выделяются только треки с зенитными углами $< 15^\circ$. Затем для ячейки определяется процент событий, давших отклик на всех четырех проволоках в дрейфовой камере. По ячейкам строится матрица, фактически представляющая собой распределение эффективности регистрации треков в дрейфовой камере по ее активной поверхности.

По полученным матрицам строится изображение, именуемое «мюонограмма». На рис. 3 представлена мюонограмма для одной из дрейфовых камер, сверху и справа даны усредненные соответственно по столбцам и рядам значения матрицы. Эффективность дрейфовой камеры по всей площади составила 99.3% (для наглядности усреднение по рядам на рисунке включает 4 см область вне ДК).

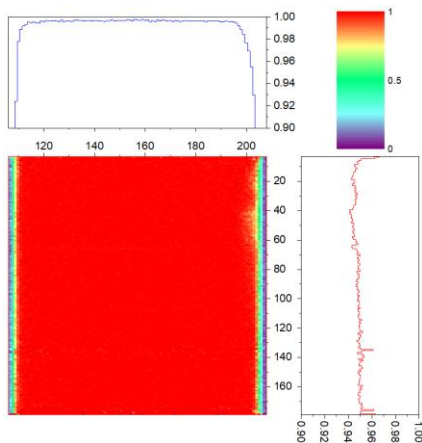


Рис. 3 Зонная эффективность (мюнограмма) дрейфовой камеры, измеренная с помощью СМ детектора УРАГАН

разрешения имеет среднеквадратичное отклонение 5.38 мм, что, с учетом погрешности УРАГАН ~ 7 мм говорит о существенно лучшей точности ДК по сравнению с этой установкой.

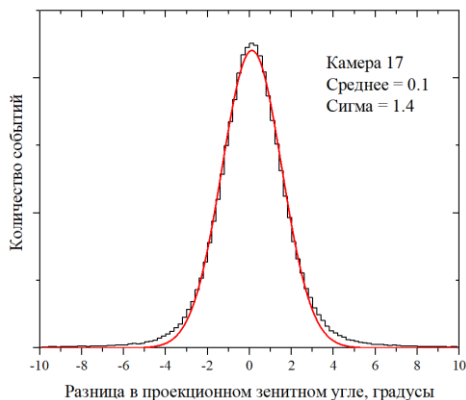


Рис. 4 Распределение событий по разнице в значении угла треков, реконструированных по данным УРАГАН и дрейфовой камеры

При обработке реконструированный по данным СМ УРАГАН трек проецируется на плоскость, в которой осуществляется реконструкция трека по данным дрейфовой камеры (плоскость, перпендикулярная сигнальным проволокам), затем результаты реконструкции сравниваются. На рис. 4 показано распределение событий по разнице в оценке углов треков, реконструированных по данным двух установок. С учетом точности УРАГАН $\sim 0.7^\circ$, погрешность ДК оказалась близка к 1.3° . Аналогичное распределение для координатного

Для тестирования накамерной электроники создан автоматизированный стенд, включающий генератор, осциллограф и ПК, для которого подготовлено программное обеспечение, осуществляющее управление измерительными приборами, обрабатывающее осциллограммы и формирующее паспорт усилителя-формирователя. Проведено тестирование старого и нового типов усилителей, проведен их сравнительный анализ.

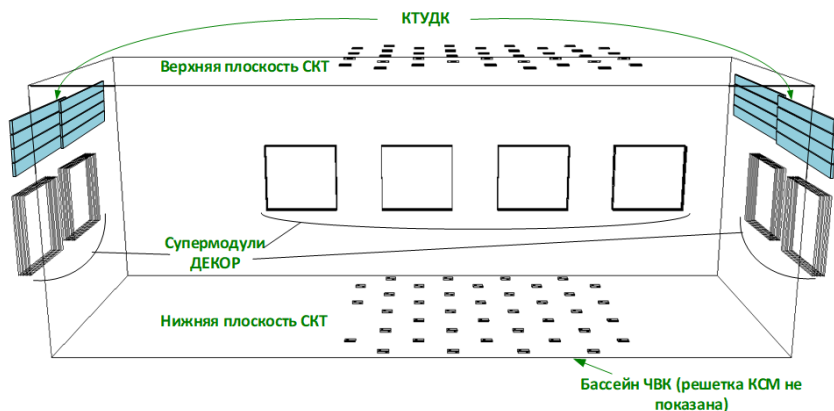


Рис. 5 Расположение плоскостей КТУДК относительно бассейна ЧВК

В главе 2 приведено устройство координатно-трековой установки на дрейфовых камерах, систем газоподготовки, высоковольтного и низковольтного питания, регистрирующей системы. Описан принцип совместной работы системы сбора и обработки данных с триггерной системой НЕВОД, программное обеспечение для центральной вычислительной машины установки, а также программа-клиент для мониторинга работы дрейфовых камер.



Рис. 6 Левая и правая плоскости КТУДК

В центре галереи размещена 19” стойка, в которой скомпонованы регистрирующая электроника, источники питания и часть коммутационных блоков. От нее по вентиляционному коробу и по профилированным лоткам разведены высоковольтные, низковольтные и сигнальные кабели.

При проектировании несущей фермы для КТУДК закладывалась возможность юстировки положения дрейфовых камер во всех координатах.

Координатно-трековая установка на дрейфовых камерах (КТУДК) состоит из 16 дрейфовых камер, формирующих две плоскости вокруг бассейна черенковского водного калориметра (ЧВК, рис. 5). Плоскости располагаются в галереях третьего этажа корпуса 47Б, с разных сторон от бассейна ЧВК (рис.6).

В центре галереи размещена

натных плоскостях, а также регулируемая величина перекрытия соседних рядов камер, необходимая для устранения «мертвой зоны» вдоль плоскости из-за пробок в торцах камер. При этом проектировалось крепление к раме не самих отдельных камер, а направляющих линеек, поскольку они обеспечивают оптимальную точность во взаимном расположении камер.

Регистрирующая электроника установки основана на 128-канальном время-цифровом преобразователе CAEN VME V1190A. ВЦП размещен в крейте CAEN VME8010, управляемом через контроллер CAEN VME 2718, который по оптической связи подключен к приемнику CAEN A2818, установленному на шине PCI в ЦВМ КТУДК.

Дрейфовые камеры предназначены для работы с внешним триггером. При работе с ЧВК и ДЕКОР триггер может быть получен от триггерной системы (ТС) НЕВОД, при этом регистрирующая система КТУДК не может быть непосредственно включена в ТС, поскольку характерное время сбора триггерной информации с установок, входящих в нее, составляет 500 нс, а максимальное время дрейфа в ДК около 6 мкс. Это не только исключает триггирование от КТУДК, но и включение данных этой установки в данные НЕВОД в режиме реального времени.

За основу алгоритма совместной работы ТС НЕВОД и КТУДК взят режим работы дрейфовых камер с супермодулем УРАГАН. На рис. 7 приведена схема обмена данными между установками.

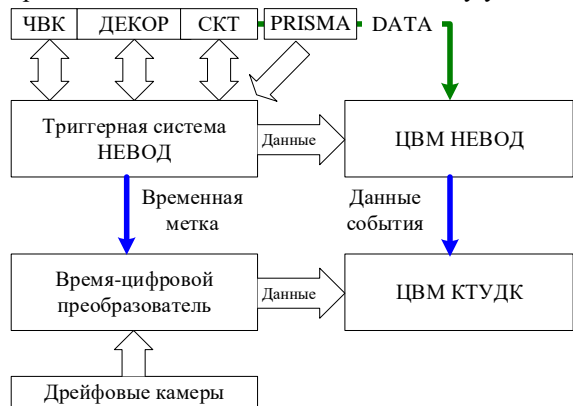
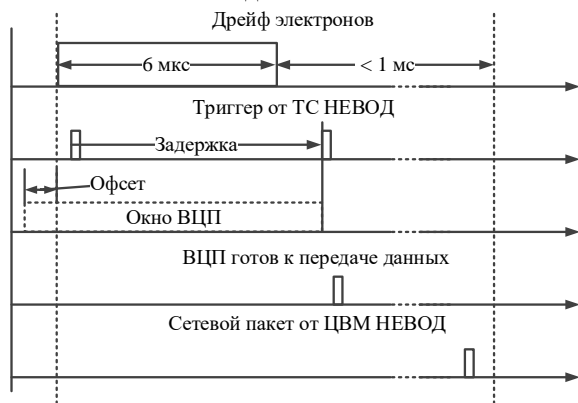


Рис. 7 Схема обмена данными между ТС НЕВОД и КТУДК

В основном режиме работы триггер для ВЦП CAEN должен поступать после регистрируемых сигналов, поэтому сигнал от ТС НЕВОД поступает на линию задержки, реализованную на микросхемах K155AG3 и MC10124, которые обеспечивают задержку сигнала на 10 мкс (рис. 8) и его преобразование в уровни NIM.

Для дальнейшей сшивки событий между КТУДК и ТС НЕВОД ЦВМ НЕВОД периодически рассылает по сети Ethernet сетевой пакет с данными о последнем событии, наиважнейшей информацией в пакете является

номер события. После поступления сетевого пакета ПО КТУДК осуществляет считывание событий из ВЦП и записывает сформированные события на жесткий диск.



Программное обеспечение установки делится на серверную программу и программу-клиент. Первая постоянно запущена на ЦВМ КТУДК. Клиент может быть запущен на нескольких компьютерах в общей с сервером сети, с него может осуществляться управление режимами работы установки и высоковольтным источником,

Рис. 8 Временная диаграмма совместной работы КТУДК и ТС НЕВОД

который также используется как программа для дистанционного мониторинга работы установки дежурными сотрудниками. Связь между программами осуществляется по протоколу UDP TCP/IP в синхронном режиме.

Каждые 20 минут в регистрирующей системе НЕВОД осуществляется 30-секундный мониторинг ЧВК, ДЕКОР и СКТ; ЦВМ КТУДК получает по сети пакет о его начале и запускает на 30 сек измерение шумов ДК. Результаты хранятся на сервере, что позволяет отслеживать работоспособность ДК и делать коррекцию для определенной части данных.

В главе 3 приведены методы обработки данных установки, принцип и программное обеспечение для сшивки данных установки с данными экспериментального комплекса НЕВОД-ДЕКОР, их совместной обработки. Описаны три основных метода реконструкции событий в КТУДК, методы их отладки и подбора оптимальных характеристик варьируемых параметров. Даны результаты моделирования работы дрейфовых камер в средах Garfield и Geant4.

Программное обеспечение для обработки экспериментальных данных установки делится на три части: программа сшивки данных КТУДК-НЕВОД, программа паспортизации и статистического анализа экспериментальных наборов, программа визуализации и реконструкции событий. Сшивку данных КТУДК и НЕВОД осуществляется по номерам

событий в консольной программе, написанной на языке Go. Для каждого набора формируется паспорт, содержащий основную статистику и информацию о состоянии дрейфовых камер.

Реконструкция треков в установке производится тремя основными методами: перебора, поиска прямолинейного участка и гистограммирования.

Первый метод заключается в переборе всех возможных положений точек трека относительно сигнальных проволок (лево-правая неопределенность) с вычетом пьедестала. Истинным считается трек, для которого сумма квадратов отклонений минимальна. В случае многочастичных событий первым определяется трек с наименьшей суммой квадратов отклонений, остальные по возрастанию суммы с исключением уже задействованных в реконструкции сигналов. Метод прекрасно работает в случае реконструкции одиночных треков по трем и четырем точкам, однако при большом количестве треков время расчета становится слишком большим, а точность падает.

Более эффективным методом реконструкции многочастичных событий является метод поиска прямолинейного участка, используемый в установке СцМГ и адаптированный к особенностям работы дрейфовых камер. Его суть представлена на рис. 9. Изначально положение точки относительно сигнальных проволок неизвестно, все приведенные в диссертации методы работают с удвоенным количеством экспериментальных точек, по мере задействования точек при реконструкции треков их отраженные точки исключаются из рассмотрения. В общем случае между первой измеренной точкой первого канала и первой точкой второго канала проводится отрезок, который затем экстраполируется до третьего и четвертого каналов.

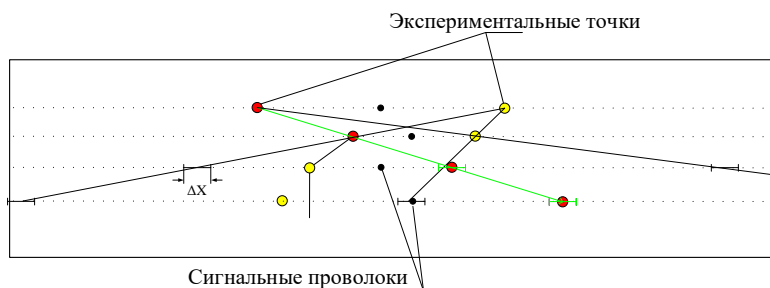


Рис. 9 Принцип реконструкции события методом поиска прямолинейного участка

В случае попадания хотя бы трёх точек в область ΔX вокруг этой прямой, по этим точкам проводится реконструкция трека методом

наименьших квадратов. Если три точки в коридор не попали, отрезок строится между первой точкой первой проволоки и отражением первой точки второй проволоки и т.д. (всего 4 комбинации). Затем метод переходит к следующей паре экспериментальных точек. Метод может быть применен, в том числе, к реконструкции одиночных мюонов, для него не требуется вводить критерий для исключения одной из точек при реконструкции.

Метод гистограммирования предназначен для реконструкции событий с большими множественностями. Особенность метода заключается в том, что он находит в событии максимальное количество параллельных треков, отбрасывая треки значительной части вторичных частиц и частиц сопровождения. Это особенно важно, так как мюоны в группах зарождаются на достаточно большом расстоянии от детектора и их треки можно считать квазипараллельными. Со сработавших точек одного из сигнальных каналов проводится полоса на другие каналы под углом α и шириной допустимой области ΔX (рис. 10). Проводится подсчет треков, для которых в пределах полосы попали точки на всех каналах (в дальнейшем планируется доработать метод с учетом треков с тремя сработавшими проволоками) в зависимости от угла α . Определяется угол, для которого число найденных треков наибольшее.

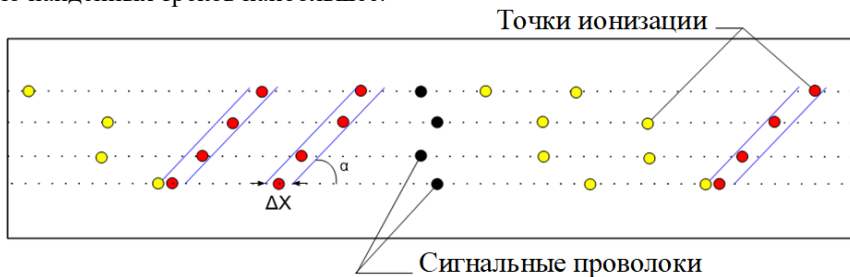


Рис. 10 Принцип реконструкции события методом гистограммирования

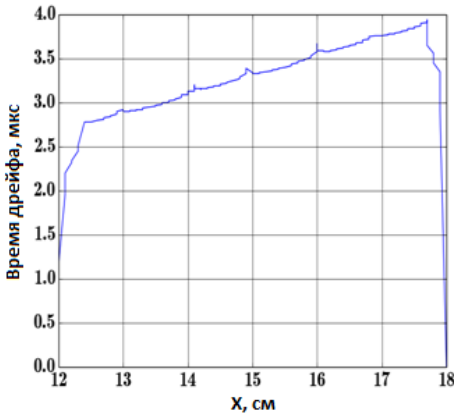


Рис. 11. Зависимость времени дрейфа электронов от координат точки ионизации

поля сигнальных проволок при реконструкции треков.

Для отработки методов реконструкции одиночных и множественных событий в дрейфовых камерах разработана программа для численного моделирования отклика дрейфовых камер. Получены оптимальные значения ширины допустимой области для методов гистограммирования и поиска прямолинейного участка (рис. 12), а также их эффективность.

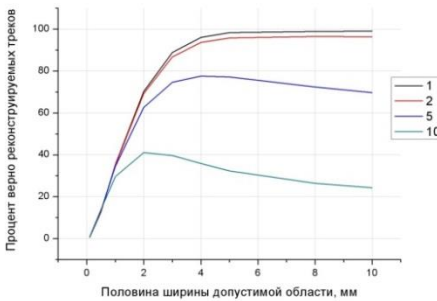


Рис. 12 Зависимость процента верно реконструированных треков методом поиска прямолинейного участка от ширины допустимой области при различных множественностях

Для отладки и проверки методов реконструкции одиночных и множественных событий в установке проведено моделирование работы дрейфовых камер. В среде Garfield исследовались электростатическое поле внутри ДК, особенности дрейфа электронов к сигнальным проволокам (рис. 11), а также форма электронного роя для треков в зависимости от конфигурации трека внутри дрейфовой камеры. Рассчитаны поправочные коэффициенты для учета несимметричности электростатического

В среде Geant4 проведено моделирование взаимодействия групп высокоэнергичных мюонов со стенами здания ЧВК НЕВОД. Определено среднее количество вторичных частиц, рождающихся в этих процессах и их угловое распределение в зависимости от энергии мюонов, а также количество треков вторичных частиц, имитирующих треки мюонов в таких событиях. С учетом мертвого времени измерительного канала и наличия вторичных частиц оценена эффективность дрейфовой

камеры в событиях с большой множественностью.

В главе 4 приведены результаты совместной работы установки КТУДК и детекторов экспериментального комплекса НЕВОД-ДЕКОР. Описаны методы калибровки установки по совместным событиям с детектором ДЕКОР, а также результаты регистрации множественных и одиночных событий, высокоэнергичных мюонов.

В течение 2015-2016 г. на установке проводились отладочные измерительные серии длительностью до 700 часов. С января 2017 года установка введена в штатный режим экспозиции, запущена экспериментальная серия. По данным отладочных наборов и экспериментальной серии проведена калибровка установки, в том числе кросс-калибровка с ДЕКОР и ЧВК.

На рис. 13 показано распределение сигнальных проволок дрейфовых камер по эффективности. Средняя эффективность составила 97.3%. Эффективность дрейфовых камер при эксплуатации в КТУДК выше, чем при их использовании на нейтринном канале ускорителя У-70 (93%).

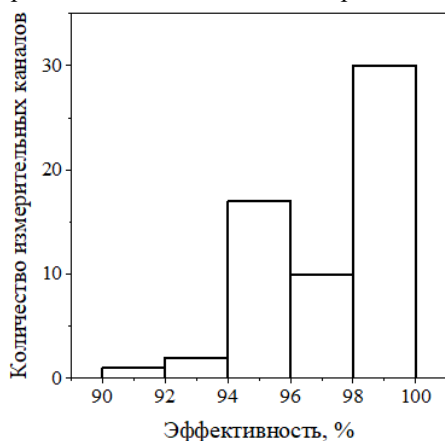


Рис. 13 . Распределение сигнальных проволок по эффективности.

В событиях, регистрируемых дрейфовыми камерами установки КТУДК, наблюдается довольно большое количество послепулсов – коротких сигналов, появляющихся после основного сигнала на выходе усилителя-формирователя. Послеимпульсы наблюдаются в половине одиночных событий, они слабо влияют на реконструкцию, во-первых, потому что их легко отсеять, а во-вторых, так как в большинстве случаев при реконструкции таких событий истинная комбинация используемых хитов существенно отличается от остальных. В случае большого числа треков послепулсы отсеять сложно и они приводят к неверной реконструкции события.

В событиях, регистрируемых дрейфовыми камерами установки КТУДК, наблюдается довольно большое количество послепулсов – коротких сигналов, появляющихся после основного сигнала на выходе усилителя-формирователя. Послеимпульсы наблюдаются в половине одиночных событий, они слабо влияют на реконструкцию, во-первых, потому что их легко отсеять, а во-вторых, так как в большинстве случаев при рекон-

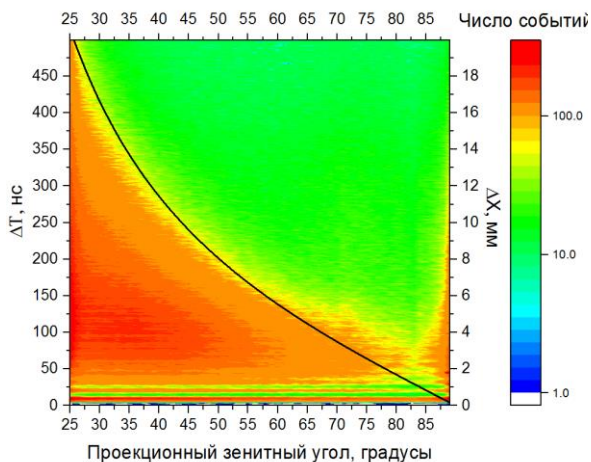


Рис. 14 Время поступления послепулса на отдельном канале в зависимости от угла трека, зависимость ширины роя от угла

Проекционный зенитный угол, градусы

Число событий

$\Delta T, \text{нс}$

18
16
14
12
10
8
6
4
2
0

100.0
10.0
1.0

25 30 35 40 45 50 55 60 65 70 75 80 85

450
400
350
300
250
200
150
100
50
0

25 30 35 40 45 50 55 60 65 70 75 80 85

На рис. 14 представлена зависимость времени поступления послепулсов относительно первого сигнала от проекционного зенитного угла в одиночных событиях. Цветом показано значение числа событий с данным углом и разностью по времени. При малой разнице времен (нижняя часть графика) распределение имеет дискретный вид (чередующиеся горизонтальные полосы) для всех проекционных углов, что объясняется дребезгом на хвосте LVDS сигнала.

Калибровка установки включает в себя определение основных временных характеристик измерительного тракта – офсетов, скоростей дрейфа электронов в камерах, эффективности измерительных каналов, а также определение точных координат положения дрейфовых камер в пространстве, которые невозможно получить без дополнительных геодезических изысканий. Если координатное положение дрейфовых камер необходимо определить единственный раз, а офсеты измерительных каналов изменяются при переукладке коммуникаций и не меняются в пределах измерительной серии, то скорость дрейфа и эффективность измерительных каналов существенно изменяются с деградацией газовой смеси. Эти характеристики определяются примерно каждые два дня (за один соответствующий экспериментальный набор в ТС НЕВОД, который в среднем набирается около 30 часов) и заносятся в паспорт набора, данные из которого затем используются при обработке большой статистики.

После подбора оптимальных временных характеристик для одиночных событий в отдельной камере получены распределения по проекционному зенитному углу θ . На рис. 15 представлено угловое распределение одиночных событий в одной из камер. Асимметрия распределения связана с одной стороны с тем, что установка регистрирует события по внешнему триггеру, то есть события отбираются по отклику ДЕКОР и

ЧВК, а с другой – с влиянием бассейна, который экранирует дрейфовые камеры с одного направления.

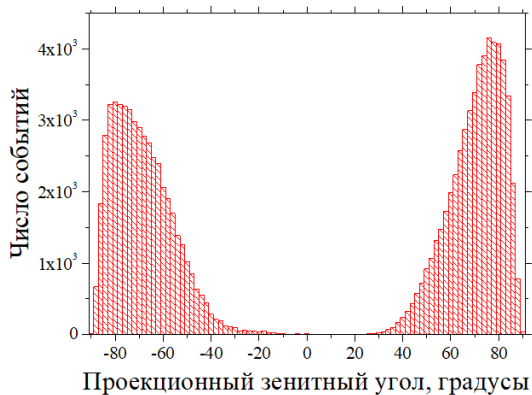


Рис. 15 Угловое распределение одиночных событий в одной из камер.

Исследование одиночных событий, зарегистрированных в дрейфовых камерах и супермодулях установки ДЕКОР, позволило провести кросс-калибровку обеих плоскостей КТУДК. В экспериментальных данных отбирались события, которых трек по данным ДЕКОР попал в плоскость КТУДК, и при этом в одной из камер установки наблюдался одиночный трек. Трек,

реконструированный по данным ДЕКОР, проецировался на плоскость, перпендикулярную ДК, после чего проводилось его сравнение с треком, реконструированным по данным дрейфовой камеры.

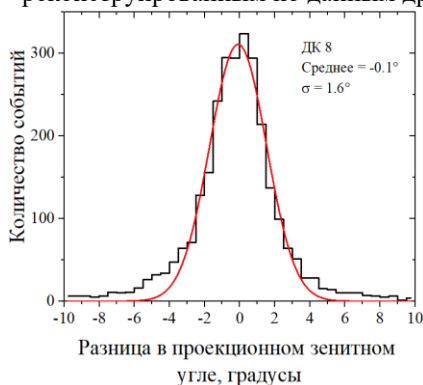


Рис. 16 Распределение событий по разнице углов трека в ДК и ДЕКОР

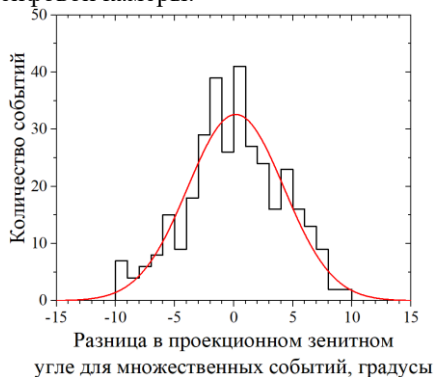


Рис. 17 Распределение событий по разнице углов трека в ДК и ДЕКОР во множественных событиях

На рис. 16 представлено распределение событий по разнице углов трека в ДК и ДЕКОР. Среднеквадратичный разброс распределения 1.6° , что с учетом погрешности ДЕКОР дает погрешность дрейфовой камеры в 1.4° .

Анализ множественных событий в КТУДК и ДЕКОР существенно зависит от критериев, по которым проходит отбор событий. Большую роль играет экранирование плоскостей КТУДК и СМ ДЕКОР бассейном.

На рис. 18 приведён пример регистрации группы мюонов одновременно в КТУДК и ДЕКОР. Проекционный зенитный угол группы по данным дрейфовых камер составил 65° при множественности в 32 частицы. По данным супермодулей ДЕКОР множественность составила 45 треков, двигающихся для той же плоскости под углом 63.5° . С учетом того, что относительно угла прихода группы эффективные площади установок соотносятся как $4/3$, множественность, определенная по данным дрейфовых камер, близка к данным ДЕКОР.

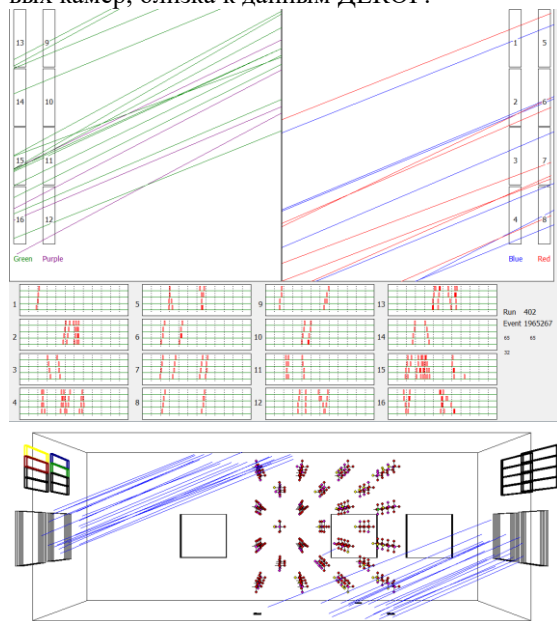


Рис. 18 Реконструкция одного события в КТУДК и ДЕКОР.

Как показано на рис. 19 слева, события с большой множественностью достаточно редко регистрируются в установке, однако в отдельных дрейфовых камерах плотность треков мюонов достигает 14 частиц на квадратный метр (рис. 19 справа). В анализе участвовали только треки, отобранные методом гистограммирования, то есть велся поиск треков под близкими проекционными углами.

По данным экспериментальной серии проведен сравнительный анализ КТУДК-ДЕКОР по множественным событиям. Проведено сравнение угла, под которым группы мюонов приходят в КТУДК, со значением, полученным по данным ДЕКОР в этих событиях (рис. 17). Распределение по разности в проекционных зенитных углах, под которыми группа зарегистрирована в КТУДК и ДЕКОР, имеет нормальный вид ($\sigma = 4^\circ$) и показывает хорошее соответствие между двумя установками.

Оценка плотности потока мюонов проводилась по формуле:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^{16} E_i \cdot m_i - \beta}{\sum_{i=1}^{16} S_{effi}(\vartheta, \varphi, \varphi_i)'} ,$$

где E_i эффективность дрейфовой камеры, m_i число зарегистрированных в ней треков, β – параметр, близкий к показателю интегрального спектра ПКИ, S_{eff} эффективная площадь отдельной ДК, которая зависит от зенитного и азимутального угла группы, а также ориентации камеры.

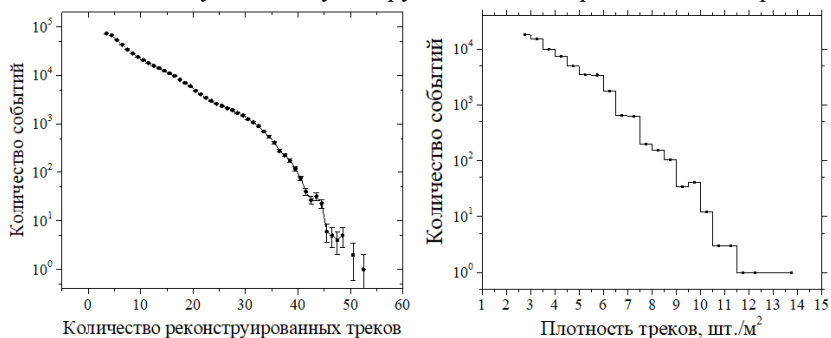


Рис. 19 Распределение всех зарегистрированных в КТУДК событий по количеству реконструированных методом гистограммирования треков (слева) и плотности частиц в (справа).

На рис. 20 показан пример реконструкции множественных событий в отдельных дрейфовых камерах, он демонстрирует чистое с точки зрения вторичных частиц и наложения треков друг на друга событие. Эффективная площадь дрейфовой камеры 1.85 м^2 , таким образом плотность мюонов в данном событии для данной камеры составляет 6 частиц на м^2 . Это является рекордным значением для установки с низкой гранулярностью (количество измерительных каналов на м^2 чуть более 2).

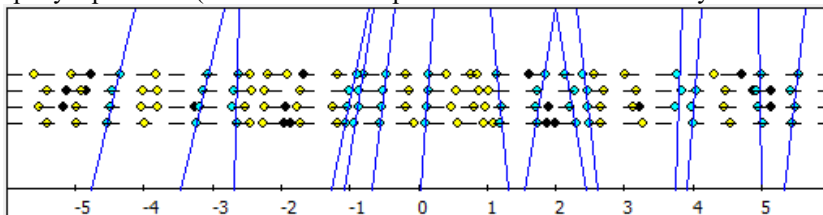


Рис. 20 Реконструкция события с большой множественностью в пределах одной камеры

В заключении сформулированы основные результаты работы:

1). Разработана и создана первая в мире координатно-трековая установка из 16 многопроволочных дрейфовых камер для исследования околоразностного потока одиночных и групп мюонов космических лучей сверхвысоких энергий, в том числе:

- разработаны системы триггирования, регистрации и сбора данных КТУДК, обеспечивающие совместную работу с детекторами ЭК НЕВОД;

- разработан комплекс программного обеспечения для осуществления совместной работы детектора с триггерной системой НЕВОД, а также мониторинга экспозиции и состояния технологических систем установки.

2). Разработана и создана технологическая линия оригинальных стенов для поточного и индивидуального тестирования дрейфовых камер и их усилителей:

- стенд для предварительного тестирования дрейфовых камер в ИФВЭ;

- стенд для группового тестирования дрейфовых камер с помощью сцинтилляционных телескопов;

- стенд для тестирования и паспортизации усилителей-формирователей АМР-4;

- стенд для исследования зонных характеристик и калибровки дрейфовых камер на супермодуле мюонного годоскопа УРАГАН.

3). На базе существующих подходов к реконструкции многочастичных событий разработаны методы, учитывающие эффективности проволоч, послеимпульсов усилителей-формирователей, вторичных частиц и искажений роя дрейфующих электронов, методы реконструкции событий в дрейфовых камерах исследованы и отлажены с помощью численного моделирования работы дрейфовых камер и установки КТУДК.

4). Проведен ряд методических и одна экспериментальная серия, в ходе которых при совместной работе с ЧВК и ДЕКОР:

- проведена калибровка установки по данным совместной регистрации одиночных треков в дрейфовых камерах и супермодулях координатно-трекового детектора ДЕКОР;

- показано, что новая установка на порядок превосходит существующий детектор ДЕКОР по координатному разрешению (1 и 10 мм соответственно) и возможности разделения соседних треков (3 и 30 мм) при близкой угловой (1.5° и 1°) точности реконструкции треков;

- доказано, что установка на дрейфовых камерах способна регистрировать группы мюонов с плотностью свыше 10 частиц на квадратный метр при всего лишь двух измерительных каналах на квадратный метр эффективной площади. Это является рекордным показателем среди существующих в мире установок;
- в установке зарегистрированы события с плотностью от 1 до 14 частиц на квадратный метр и оценено угловое распределение околоразностных групп мюонов в интервале углов от 25° до 90° .

Результаты, полученные на координатно-трековой установке КТУДК, свидетельствуют о возможности создания нового масштабного детектора на основе многопроволочных дрейфовых камер ИФВЭ площадью свыше 250 м^2 , который полностью перекроет боковую апертуру черенковского водного калориметра и позволит измерить полное число частиц, прошедших через его рабочий объем, что принципиально важно для исследования энерговыделения групп мюонов под большими зенитными углами. Эта характеристика чувствительна к используемой модели взаимодействия ПКЛ с ядрами воздуха, и полученные с помощью будущей установки результаты позволят однозначно ответить на вопрос, включаются ли новые физические процессы при взаимодействиях адронов космических лучей с энергией выше 10^{15} эВ.

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

- [1] E.A. Zadeba, N.V. Ampilogov, N.S. Barbashina, A.G. Bogdanov, A.A. Borisov, D.V. Chernov, L.I. Dushkin, R.M. Fakhrutdinov, S.S. Khohlov et al., The coordinate-tracking detector based on the drift chambers for ultrahigh-energy cosmic ray investigations, *J. Instrum.*, 9 (2014) C08018.
- [2] E.A. Zadeba, N.V. Ampilogov, N.S. Barbashina, A.G. Bogdanov, A.A. Borisov, D.V. Chernov, L.I. Dushkin, R.M. Fakhrutdinov, S.S. Khokhlov, et al., Status of a development of the large scale coordinate-tracking setup based on the drift chambers, *J. Phys. Conf. Ser.*, 632 (2015) 12031.
- [3] Е.А. Задеба, Н.В. Ампилогов, Н.С. Барбашина, А. Г. Богданов, А.А. Борисов, Н.С. Волков, В.С. Воробьев, Л.И. Душкин, М.А. Ивашенко, А.С. Кожин, Р.П. Кокоулин, К.Г. Компаниец, В.В. Овчинников, А.А. Петрухин, В.А. Селяков, Р.М. Фахрутдинов, С.С. Хохлов, Д.В. Чернов, В.В. Шутенко, И.И. Яшин, Координатно-трековая установка на дрейфовых камерах для исследования космических лучей сверхвысоких энергий, *Известия РАН. Серия физическая*, 79 (2015) 411–413.
- [4] A.A. Petrukhin, N.V. Ampilogov, N.S. Barbashina, A.G. Bogdanov, A.A. Borisov, D.V. Chernov, L.I. Dushkin, R.M. Fakhrutdinov, R.P. Kokoulin, et al., The coordinate-tracking detector based on the drift chambers, *Proc. Sci., PoS (ICRC 2015)* 670.
- [5] E.A. Zadeba, A.A. Borisov, R.M. Fakhrutdinov, R.P. Kokoulin, K.G. Kompaniets, A.S. Kozhin, A.S. Ovechkin, A.A. Petrukhin, V.V. Shutenko et al., The registration system of the coordinate-tracking setup on the drift chambers, *J. Phys. Conf. Ser.*, 675 (2016) 032039.
- [6] Е.А. Задеба, Н.В. Ампилогов, Н.С. Барбашина, А.Г. Богданов, А.А. Борисов, Н.С. Волков, В.С. Воробьев, Л.И. Душкин, А.С. Кожин, Р.П. Кокоулин, К.Г. Компаниец, А.С. Овечкин, А.А. Петрухин, Р.М. Фахрутдинов, В.В. Шутенко, Регистрация групп мюонов трековой установкой на дрейфовых камерах, *Известия РАН. Серия физическая*, 81 (2017) 517–519.
- [7] E.A. Zadeba, N.V. Ampilogov, N.S. Barbashina, A.G. Bogdanov, A.A. Borisov, D.V. Chernov, L.I. Dushkin, R.M. Fakhrutdinov, R.P. Kokoulin et al., New installation for inclined EAS investigations, *EPJ Web Conf.*, 145 (2017) 07002.
- [8] E. A. Zadeba, N. V. Ampilogov, N. S. Barbashina, A. A. Borisov, R. P. Kokoulin, A. S. Kozhin, K. G. Kompaniets, R. M. Fakhrutdinov, A. S. Ovechkin et al., The detector on the basis of drift chambers for inclined muon bundle investigations, *J. Instrum.*, 12 (2017) C07005.

Подписано в печать __. __. 2017. Объем __ п.л. Тираж 100 экз. Заказ __

Типография НИЯУ МИФИ. 115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31