

ИНЖЕНЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

УДК 539.1.07

СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОПРОВОЛОЧНЫХ ДРЕЙФОВЫХ КАМЕР

© 2025 г. Е. А. Задеба^а *, В. С. Воробьев^а, Д. В. Газизова^а, К. Г. Компаниец^а,
Е. А. Мирошниченко^а, Р. В. Николаенко^а, И. Ю. Трошин^а,
Е. П. Хомчук^а, И. А. Шульженко^а, В. В. Шутенко^а

^аНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия

*E-mail: EAZadeba@mephi.ru

Поступила в редакцию 24.04.2024 г.

После доработки 15.05.2024 г.

Принята к публикации 22.05.2024 г.

В НИЯУ МИФИ создается крупнейший в мире координатный детектор ТРЕК на дрейфовых камерах для исследования мюонов космических лучей. Основой установки являются многопроволочные дрейфовые камеры (ДК), ранее применявшиеся в нейтринном детекторе ИФВЭ (Протвино) на ускорителе У-70. Для исследования характеристик ДК перед установкой в ТРЕК и проектируемый детектор МДМ создан стенд, позволяющий определять их эффективность, координатную и угловую точность, зонные характеристики. В статье приводится устройство стенда и результаты тестирования 394 ДК для установок ТРЕК и МДМ.

Ключевые слова: космические лучи, дрейфовые камеры, газонаполненные детекторы, калибровка, тестирование детекторов

DOI: 10.56304/S2079562924060484

ВВЕДЕНИЕ

Одной из актуальных проблем физики космических лучей является мюонная загадка [1] – расходящийся с энергией избыток числа мюонов в широких атмосферных ливнях в сравнении с модельными расчетами. В 2018 г. была сформирована рабочая группа WHISP [2], которая обобщила результаты измерения мюонов космических лучей в разных экспериментах. Среди этих экспериментов выделяется НЕВОД-ДЕКОР [3], который обладая малой чувствительной площадью (70 м²), позволяет исследовать космические лучи в широком диапазоне энергий 10¹⁵–10¹⁸ эВ и единственный, способный оценивать энерговыделение групп мюонов.

Энергия мюонов может указать на происхождение их избытка [1]. Но для этого нужно точнее определять число мюонов, чем позволяет координатно-трековый детектор ДЕКОР. Поэтому в экспериментальном комплексе разработан новый крупномасштабный детектор ТРЕК [4] на основе многопроволочных дрейфовых камер (ДК) [5]. Детектор состоит из 264 ДК, формирующих две вертикальные координатные плоскости, перекрывающие боковую поверхность черенковского водного детектора НЕВОД. Площадь каждой плоскости 250 м².

Многопроволочные дрейфовые камеры детектора ранее применялись в нейтринном детекторе [6] на ускорителе У-70, который был демонтирован в 2013 г. Около 400 камер по окончании работ были складированы на территории ИФВЭ, откуда небольшими партиями перевозились в НИЯУ МИФИ, где проходили первичную проверку на герметичность. Для единообразного тестирования камер необходимо было создание стенда, способного в поточном режиме проверять партии ДК на работоспособность, эффективность и точность.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ДРЕЙФОВЫХ КАМЕР

В экспериментальном комплексе накоплен большой опыт работы с многопроволочными дрейфовыми камерами ИФВЭ. Первые 40 дрейфовых камер были использованы в установках КТУДК [7] и ПротоТРЕК [8], где была продемонстрирована хорошая работоспособность и точность реконструкции одиночных и множественных треков заряженных частиц. Для проверки характеристик ДК создавались вспомогательные стенды [9], исследование зонных характеристик проводилось с помощью координатно-трекового детектора УРА-ГАН [10]. Однако такой метод не подходит для тестирования по-настоящему больших партий камер (более 300 шт.).

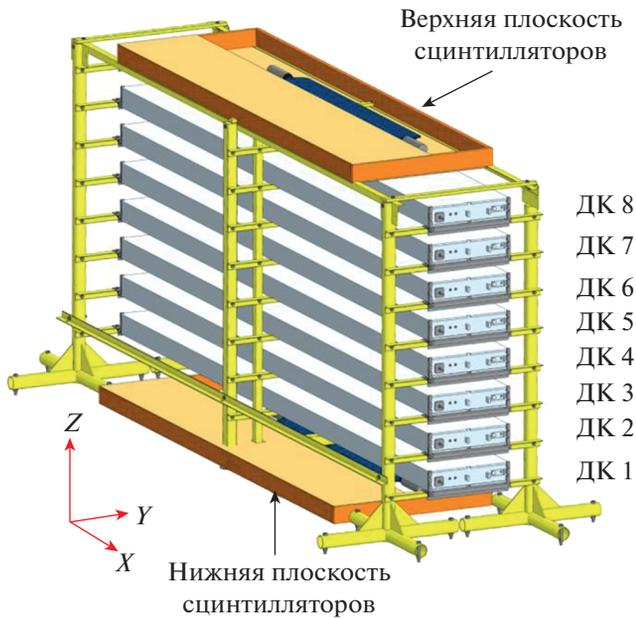


Рис. 1. Схема рамной конструкции стенда с установленным комплектом ДК и плоскостями сцинтилляционных детекторов.

Дрейфовая камера представляет собой алюминиевый кожух объемом $4000 \times 508 \times 112 \text{ мм}^3$, ограниченный с торцов двумя пробками из оргстекла. Объем ДК (около 200 л) заполняется смесью 94% Ag и 6% CO_2 . Вдоль всей камеры натянуты сотни поле-формирующих проволочек, создающих поперек ДК однородное электрическое поле напряженностью 480 В/см в диапазоне от 12 кВ до 0. При прохождении частицы газ рабочей смеси ионизируется, высвободившиеся электроны с постоянной скоростью под действием поля дрейфуют к центру камеры, где располагаются два ряда катодных проволочек и 4 сигнальных проволочки между ними. Между катодными и сигнальными проволочками на расстоянии около 1 мм создается напряженность в 2.2 кВ, что обеспечивает газовое усиление порядка 10^5 . По времени дрейфа электронов до сигнальных проволочек определяется положение точек ионизации газа и реконструируется трек частицы.

Характеристики дрейфовых камер можно разделить на постоянные и переменные. К последним относится максимальное время (до 6 мкс) и скорость дрейфа (от 41 мм/мкс), которые должны контролироваться при каждой экспозиции. К постоянным относятся эффективность сигнальных проволочек, угловая и координатная точность.

РАМНАЯ КОНСТРУКЦИЯ

Стенд спроектирован в виде этажерки, на которой одновременно размещается восемь дрейфовых камер и два уровня сцинтилляционных детек-

торов, обеспечивающих отбор событий и формирование триггерного сигнала. Основные требования к несущей раме установки включают жесткость фиксации дрейфовых камер, гарантирующую одинаковое положение комплектов ДК во всех сериях измерений.

Габаритные размеры рамы: $1760 \times 2037 \times 4877 \text{ мм}^3$. Рама состоит из трех стоек, соединенных продольно (рис. 1). Фронтальная и задняя стойки состоят из двух колонн с крестообразной опорой и 8 опорных металлических уголков размерами $40 \times 40 \times 980 \text{ мм}^3$ толщиной 4 мм. Промежуточная стойка состоит только из одной колонны и выступает в роли вспомогательной, на ней расположены 8 опорных уголков в виде консолей, страхующих и облегчающих монтаж ДК. Три трубы прямоугольного сечения размерами $20 \times 40 \times 950 \text{ мм}^3$ и толщиной стенок 2 мм, а также 2 уголка размерами $40 \times 40 \times 4220 \text{ мм}^3$ и толщиной 4 мм скрепляют верхушки трех стоек и играют роль опоры для верхней сцинтилляционной плоскости триггерной системы стенда.

Точность фиксации дрейфовых камер обеспечивается наличием в торцах ДК направляющих: к горизонтальным уголкам стоек крепятся алюминиевые швеллеры с пазами, в которые они входят с люфтом менее 0.2 мм.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ СТЕНДА

Дрейфовые камеры делятся на два основных типа: нДК и пДК, отличающиеся номиналами используемого высокого напряжения: -12 кВ и 2.2 кВ для нДК и $+12 \text{ кВ}$ и $+14.2 \text{ кВ}$ для пДК. Внутренняя плоскость детектора ТРЕК оснащается 132 нДК, а внешняя 132 пДК. Поэтому тестирование проводилось в два этапа: сначала проверены все нДК, а затем все пДК.

Высокое напряжение обеспечивается многоканальным источником, разработанным в ООО "Высоковольтные системы" SM-32-220 для установки ТРЕК [11]. Источник позволяет подавать напряжение в диапазонах от 0 до 15 кВ положительной и отрицательной полярностей, от 0 до 3 кВ положительной полярности. При тестировании используются две пары каналов в зависимости от типа ДК ($-12/+2.2 \text{ кВ}$ или $+12/+14.2 \text{ кВ}$). Питание с источника подается на разветвители, с которых по высоковольтным кабелям разводится по дрейфовым камерам.

Для питания накамерной электроники (усилитель-формирователь АМР-4 [12]) используется пара источников АКПП-1115, обеспечивающих ток до 30 А при напряжении 5.5 В. Распределение питания по камерам также осуществляется через разветвитель.

Для работы дрейфовых камер необходима газовая смесь 94% Ag и 6% CO_2 . Изначально на стенд

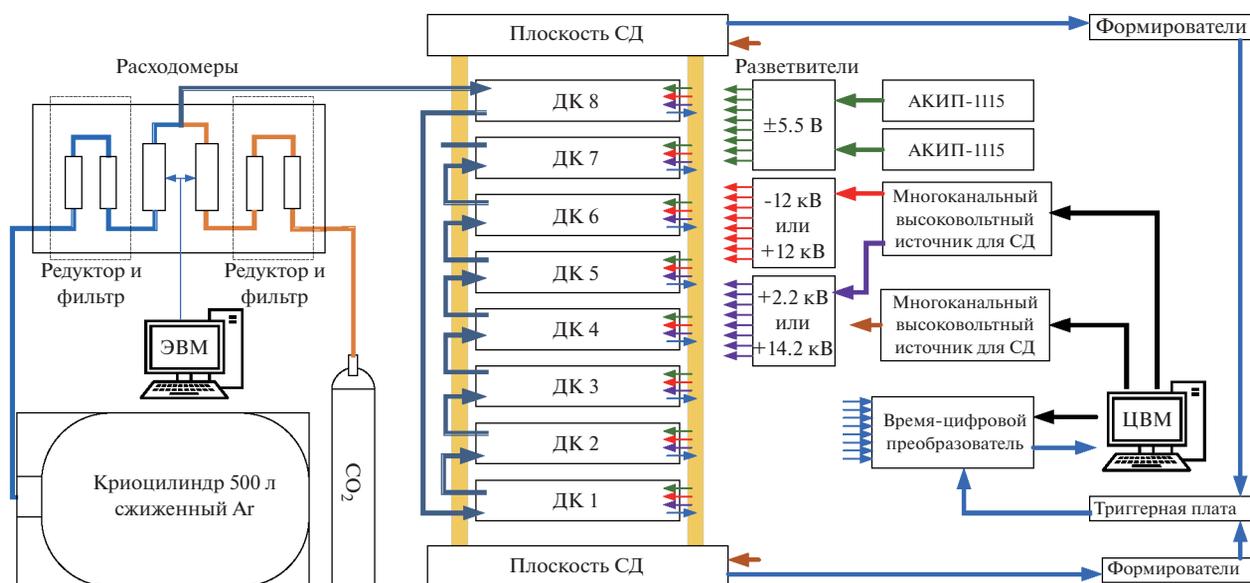


Рис. 2. Технологические измерительные системы стенда: высоковольтное и низковольтное питание, газоподготовка, триггерная система, регистрирующая электроника и управление.

устанавливаются камеры, наполненные воздухом. При объеме ДК 200 л необходимо через нее пропустить около 600 л газовой смеси для выхода в рабочий режим. В качестве источника аргона используется криоцилиндр объемом 500 л, который заправляется сжиженным газом (соответствует примерно 350 м^3 аргона при стандартных условиях). Цилиндр оснащен газификатором с максимальным выходным давлением 1.6 МПа. При превышении давления избыточный объем газа сбрасывается в атмосферу. В качестве источника углекислого газа используются стандартные 40 л баллоны.

Оба сосуда подключаются к газовому щиту (рис. 2), где с помощью комплекта редукторов и микронных фильтров давление снижается до 150 кПа, удаляются пары воды и примеси кислорода. Регулировка скорости продува и пропорций смеси осуществляется с помощью двух расходомеров Bronkhorst F-201CV, управляемых с отдельного ПК. С учетом использования двух комплектов расходомеров скорость продува может варьироваться в интервале от 10 до 1000 л/ч. В основном режиме продув осуществлялся со скоростью 400 л/ч, что позволяет подготовить комплект дрейфовых камер к тестированию всего за 6 ч. Экономия газовой смеси и времени на продув ДК происходит за счет последовательного подключения ДК к газовой системе: последующая камера получает газовую смесь от предыдущей. Камеры подключены к системе не по порядку: сначала смесь подается на ДК 1 и 8, которые являются опорными и остаются на стенде постоянно.

ТРИГГЕРНАЯ СИСТЕМА

Система отбора событий стенда состоит из двух плоскостей сцинтилляционных детекторов (СД), подключенных к схеме совпадений (рис. 1, 2 и 3). За время эксплуатации стенда использовались два комплекта СД.

Первый комплект состоял из 12 детекторов, ранее использовавшихся в детекторе ТЕМП [13]. СД состоит из сцинтилляционных пластин $1200 \times 200 \times 10 \text{ мм}^3$, в торце которых установлены фотоэлектронные умножители ФЭУ-97. В каждой плоскости шесть СД для повышения эффективности укладывались в два слоя. Для дополнительной светоизоляции изготовлены светонепроницаемые ящики (рис. 1). Эффективная площадь одной плоскости составила 0.9 м^2 . Для каждого СД подобрано напряжение питание, подаваемое с многоканального источника, подключенного к ЦВМ (рис. 2).

Для тестирования пДК сформирован второй комплект (рис. 3) из 5 сцинтилляционных детекторов размерами $1 \times 1 \text{ м}^2$, изготовленных в ИФВЭ. Использование новых СД позволило существенно повысить скорость набора статистики.

Схема совпадений выполнена в виде двух дискриминаторов-формирователей CAEN Mod.188, формирующих 20 нс логические сигналы в уровнях NIM, и 12 канальной триггерной платы, собирающей по ИЛИ сигналы в пределах плоскостей и проверяющей по И сигналы между плоскостями. При наличии как минимум по одному сигналу в каждой плоскости в пределах 20 нс окна плата формирует триггерный сигнал и по стандарту

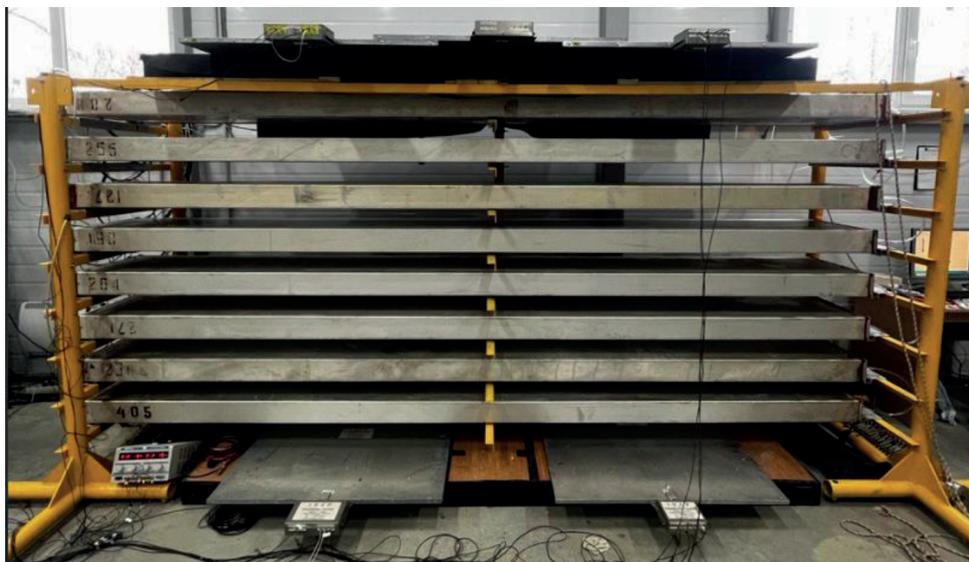


Рис. 3. Фотография рамной конструкции стенда с установленным комплектом ДК и вторым комплектом сцинтилляционных детекторов.

RS485 передает его на переходную плату основного измерительного прибора стенда – время-цифрового преобразователя (ВЦП) KV-001 [14].

РЕГИСТРИРУЮЩАЯ СИСТЕМА СТЕНДА

Каждая дрейфовая камера комплектуется усилителем-формирователем АМР-4, принимающим токовые импульсы амплитудой от 1.5 мкА и генерирующим логические сигналы длительностью 50–150 нс в уровнях LVDS. При тестировании на камеры устанавливается электроника, вместе с которой они размещаются в детекторе ТРЕК.

Сигналы с усилителей передаются на 32-канальный время-цифровой преобразователь (ВЦП) KV-001, разработанный в НИЯУ МИФИ и выполненный на основе платы Terasic DE0-Nano-SoC с ПЛИС Altera Cyclone V [15] (рис. 4). Для преобразования LVDS-TTL разработана переходная плата, в функции которой также входит преобразование триггерного сигнала RS-485 в TTL.

Основная функция ВЦП заключается в измерении времени между поступлением сигналов с проволок дрейфовых камер и триггерным сигналом, поступающим от схемы совпадений. Наименьший значимый бит ВЦП составляет 5 нс, а ширина ворот совпадений 20480 нс. После поступления триггерного сигнала информация о наличии импульсов на всех 32 каналах записывается в буферную память, которая вычитывается несколько раз в секунду. Помимо записи событий, в функционал ВЦП входит поканальное измерение шумов, фак-

тически запись числа всех поступивших сигналов на канал за указанный интервал времени.

Взаимодействие между внешним ПО и управляющей программой ВЦП осуществляется путем обмена командами и ответами по сети Ethernet по протоколу ТСР/IP. Большая часть команд обеспечивает удаленные чтение и запись регистров ВЦП для управления и настройки. Предусмотрен ряд дополнительных команд для управления процессом измерений на ВЦП.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СТЕНДА

Программный комплекс стенда осуществляет взаимодействие с блоками высоковольтного питания и ВЦП, а также реализует два режима измерений – измерение счетных характеристик ДК и экспозицию (основной режим сбора информации о прохождении заряженных частиц через установку).

Структура комплекса представлена на рис. 5. В процессе работы программа использует четыре потока: основной поток, в котором работает графический интерфейс приложения (Graphical user interface, GUI); HV_TS и HV_DC, предназначенные для управления блоками высоковольтного питания сцинтилляционных счетчиков ТС стенда и ДК, изменения настроек каналов, а также мониторинга значений напряжений и токов на выходах каналов; поток TDC управляет ВЦП, изменяет его настройки, считывает результаты измерения шумов дрейфовых камер и информации о регистрируемых событиях, а также реализует режим экспозиции.

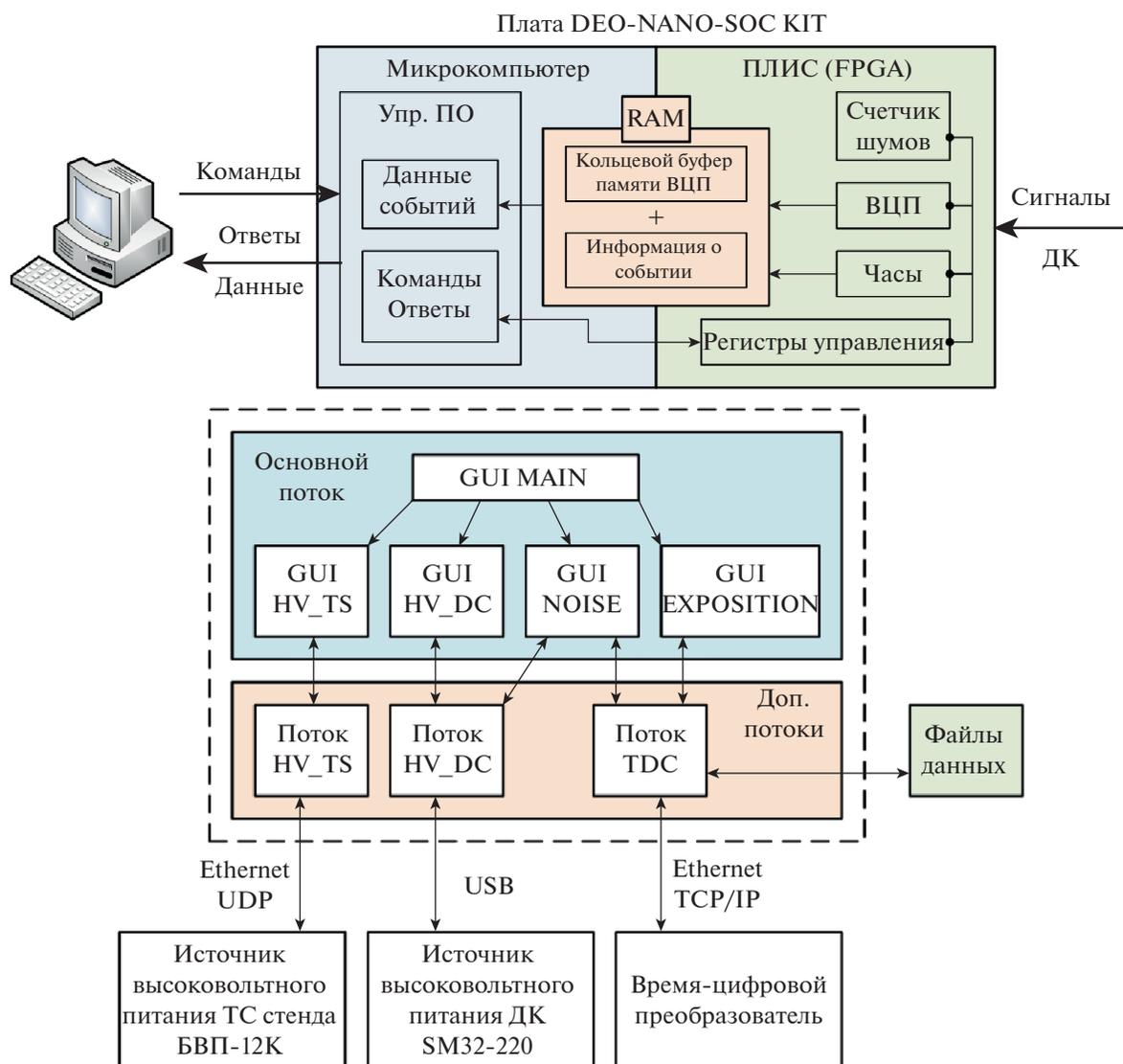


Рис. 4. Структура программного обеспечения ВЦП и архитектура программного комплекса стенда.

На рис. 5 приведен графический интерфейс программы на примере окна измерения шумовых характеристик дрейфовых камер. В этом режиме ПО одновременно задействует потоки управления источником и ВЦП: для напряжений в диапазоне 1800–2300 В (для нДК) с шагом 25 В автоматически измеряется количество сигналов на канале за 10 с. Для каждого канала строится график зависимости скорости счета от напряжения. Для повышения качества и точности съемки шумовой кривой между каждым изменением напряжения и измерением числа сигналов вводится 20 секундная пауза. Все интервалы времени и напряжений могут быть изменены оператором. После завершения цикла оператор просматривает полученные шумовые кривые и сохраняет их на диск.

В режиме экспозиции оператор вводит номера всех установленных в стенд ДК и запускает набор экспериментальных данных. Программа записывает последовательно в файл события, выделяемые триггерной системой. В один файл записывается 10 тыс. событий, одновременно с этим каждые 20 мин записывается уровень шумов на каждом канале, который пишется в отдельный файл, что позволяет отслеживать состояние камер в течение всего периода измерений. Для контроля работы камер, помимо базовой статистической информации для оператора, выводится эффективность каналов по каждой ДК, эта величина оценивается по доле событий, в которых на данном канале наблюдались сигналы.

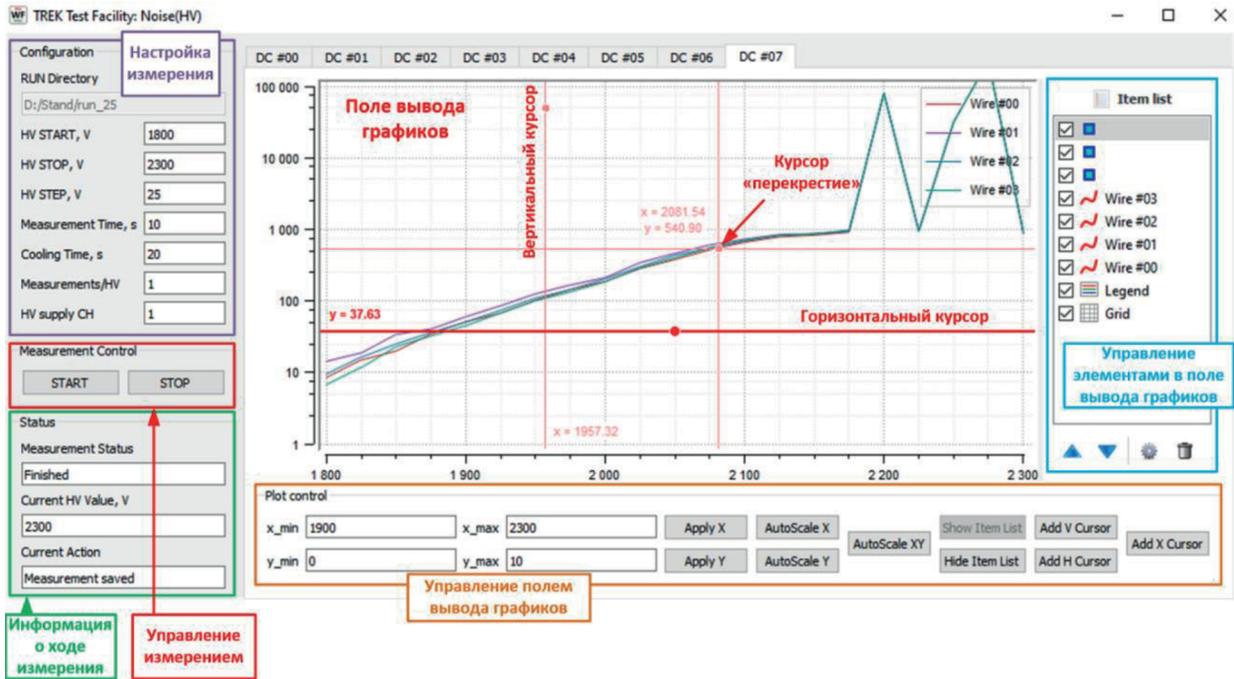


Рис. 5. Интерфейс ПО в режиме измерения шумовой кривой.

ОБРАБОТКА ДАННЫХ СТЕНДА

В качестве опорных дрейфовых камер, отклик которых в рамках измерений считается эталонным, выбраны первая и восьмая ДК. Все нДК и пДК проверены при одном комплекте опорных камер соответствующего типа. Методика определения рабочих характеристик дрейфовых камер основана на сравнении отклика исследуемых ДК с треком, восстановленным по данным опорных камер.

Перед основной обработкой данных проводится предварительный отбор событий по следующим критериям:

1. В каждой в камере в событии наблюдается не более шести сигналов, при этом не более трех сигналов на одном измерительном канале. Это позволяет выделить одночастичные события.
2. В опорных камерах сигналы наблюдаются минимум на трех каналах. Трек частицы должен быть реконструируемым в опорных камерах. Для реконструкции трека нужно минимум три точки.
3. Разность углов реконструкции по двум опорным камерам и в каждой опорной камере отдельно не должна превышать 3° . Это позволяет отсеять существенную долю электронов от ШАЛ, рассеиваемых в камерах.

На рис. 6 приведен пример события, реконструированного как по данным опорных ДК (зеленая сплошная линия), так и каждой дрейфовой камеры отдельно (пунктирные линии). В каждом

событии определяется разница в значении реконструированного угла и координаты трека по данным исследуемой камеры и трека по данным опорных. Точность определения тангенса угла наклона трека по данным опорных камер на два порядка лучше, чем у индивидуальной камеры. Поэтому угловой погрешностью реконструкции трека по опорным камерам можно пренебречь.

Координатная точность определяется через разность координат треков реконструированных по опорным камерам и исследуемой. При этом разность рассматривается на уровне центра исследуемой камеры (рис. 7). Точность реконструкции по опорным камерам такая же, как и по данным отдельной камеры. Так как измерения в камерах независимы, то дисперсия разности координат будет равна сумме дисперсий, которые в свою очередь равны. Таким образом координатная точность будет определяться, как

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{D(\Delta x)}{2}}. \quad (1)$$

На рис. 8 представлены полученные распределения по разности координат и углов, измеренные для отдельной камеры. Точность реконструкции треков определяется через ширину распределения на полувысоте. Предполагая распределение Гаусса, для приведенных распределений получаем координатную и угловую точности камер 1.2 мм и 1.78° соответственно. Причины, почему эти распределения могут отличаться от гауссова, заклю-

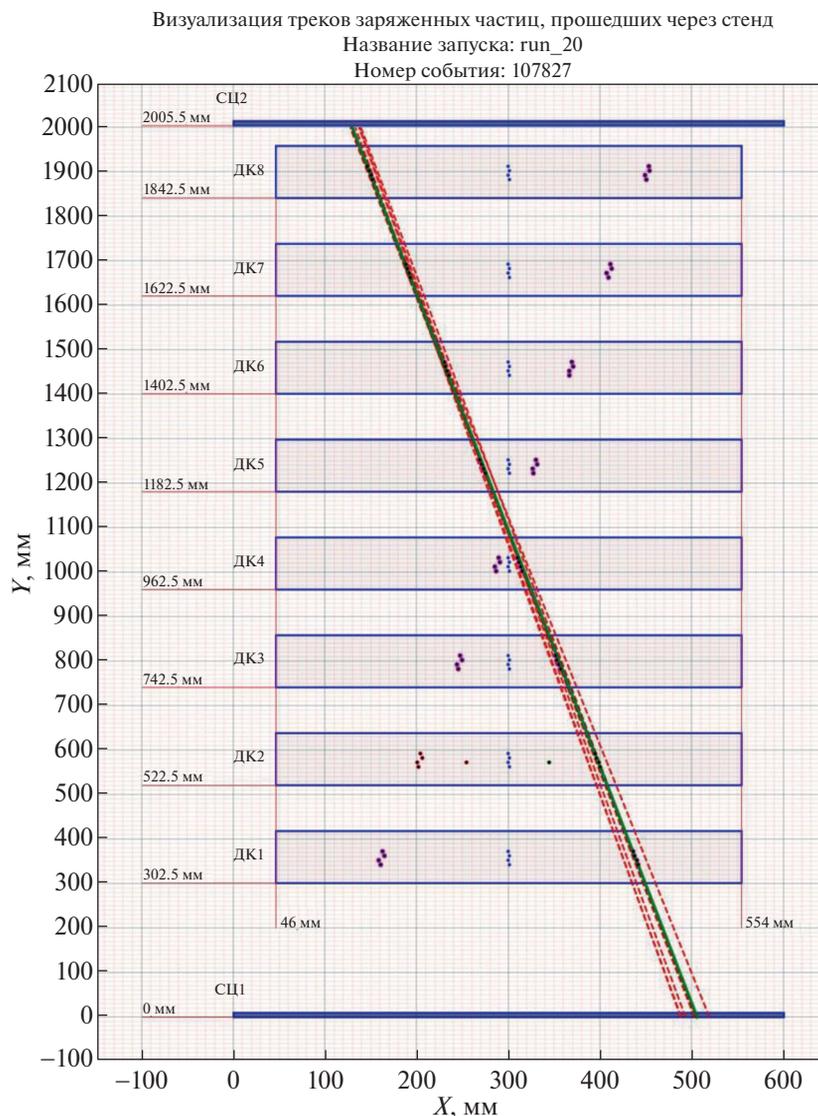


Рис. 6. Пример реконструкции события по данным восьми дрейфовых камер.

чаются в точности определения скоростей дрейфа электронов как в опорных, так и в исследуемых камерах, а также искривленные треки, которые не удалось исключить.

Эти распределения предоставляют интегральную информацию о камере. Более детальная информация показана на рис. 9. На всех распределениях по оси абсцисс отложена координата трека в камере, а по оси ординат – угол трека. Из распределений видно, что эффективность реконструкции ухудшается в центре камеры в области, где происходит газовое усиление – лавинообразная вторичная ионизация газа. Это связано как с уменьшением амплитуды сигнала, так и с близким расположением точек, что из-за лево-правой неодно-

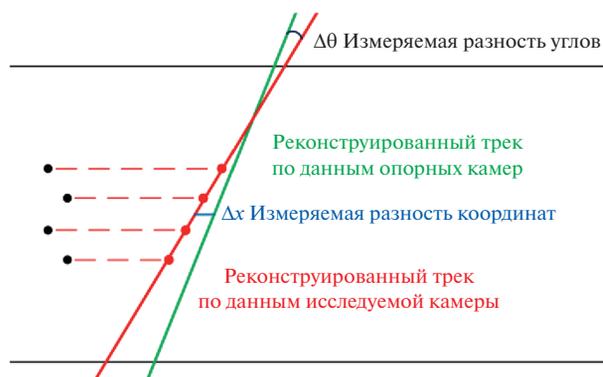


Рис. 7. Схематичное представление измерения разности координат и углов реконструкции по данным опорных камер и исследуемой.

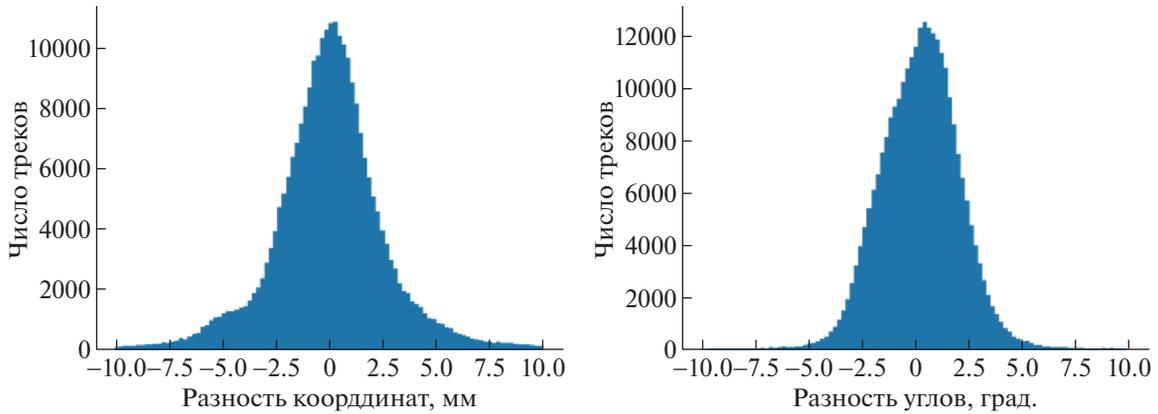


Рис. 8. Распределение по разности координат (слева) и углов (справа).

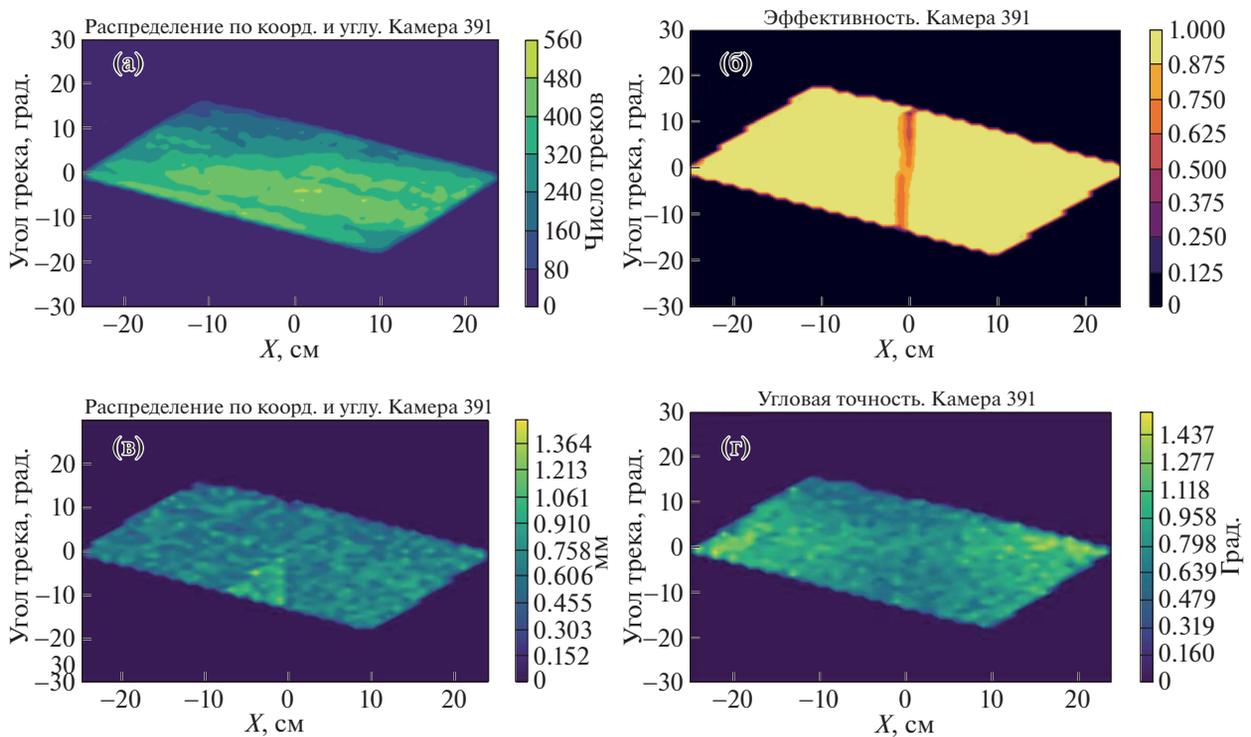


Рис. 9. Распределения разных величин в пространстве координаты и угла трека. (а) Распределение числа треков; (б) распределение эффективности реконструкции; (в) распределение координатной точности; (г) распределение угловой точности.

Таблица 1. Распределение дрейфовых камер, прошедших проверку

Характеристика	Количество
Установлено в ТРЕК	264
Резерв пДК	45
Резерв нДК	20
Для МДМ	28
Искровой пробой при напряжении до 12 кВ	27
Негерметичны	4
Низкая точность и эффективность	6
ИТОГО	394

значности может привести к некорректной реконструкции. Координатное разрешение ухудшается приблизительно в той же области, а угловая точность ухудшается от центра к краям камеры.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДРЕЙФОВЫХ КАМЕР

В табл. 1 приведены результаты тестирования всех дрейфовых камер, что были доставлены в НИЯУ МИФИ. Из 396 дрейфовых камер отображено 328. На рис. 10 показано распределение камер

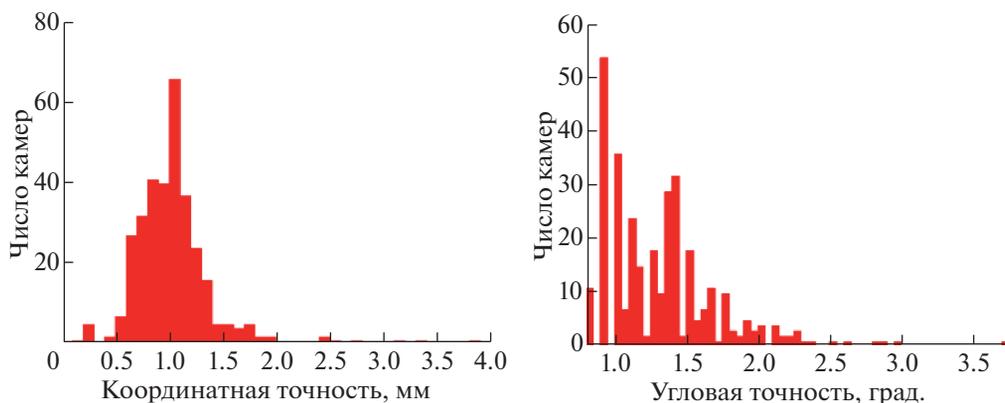


Рис. 10. Распределение камер по измеренным координатным (слева) и угловым (справа) точностям.

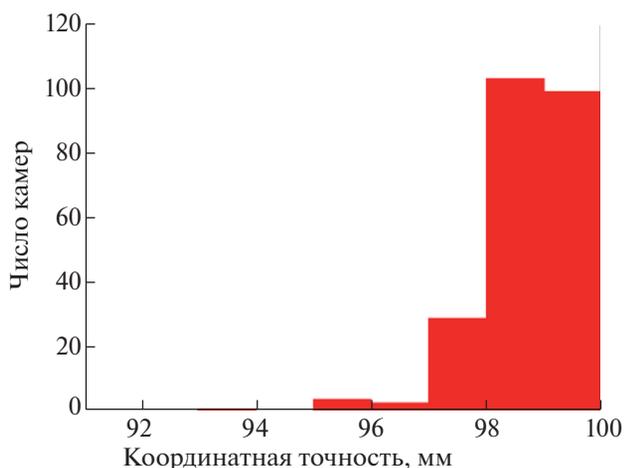


Рис. 11. Эффективность реконструкции треков в исследуемых камерах.

по измеренным точностям. Средняя координатная точность составила 1.05 мм, а угловая – 1.3°. На рис. 11 показана эффективность реконструкции треков. Как видно, все отобранные камеры имеют высокую эффективность, среднее значение 99.1%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создан стенд, позволяющий в поточном режиме проверять рабочие характеристики многопроволочных дрейфовых камер двух возможных полярностей. В результате тестирования 394 ДК, доставленных из ИФВЭ в НИЯУ МИФИ, камеры показали высокую среднюю эффективность на уровне 99.1%, угловую точность в 1.3°, координатную точность 1.05 мм. Удалось выделить 264 дрейфовые камеры для детектора ТРЕК, 28 камер для

установки МДМ и сохранить 65 ДК в качестве резервных для ремонта и модернизации.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена на Уникальной научной установке “Экспериментальный комплекс НЕВОД” и поддержана Российским научным фондом, 23-72-10067, <https://rscf.ru/project/23-72-10067/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Petrukhin A.A.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2014. V. 742. P. 228–231 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.nima.2013.12.011>
2. *Dembinski H.P. et al.* // EPJ Web Conf. 2019. V. 210. P. 02004.
3. *Yashin I.I. et al.* // J. Instrum. 2021. V. 16. P. T08014.
4. *Zadeba E.A. et al.* J. Instrum. 2014. V. 9. P. C08018.
5. *Bozhko N.I. et al.* // Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res., Sect. A. 1986. P. 388–394. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(86\)90972-1](https://doi.org/10.1016/0168-9002(86)90972-1)
6. *Барабаш Л.С. и др.* // Приборы и техника эксперимента. 2003. Т. 46 (3). С. 5.
7. *Задеба Е.А. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. С. 411–413.
8. *Vorobev V.S. et al.* // PoS(ICRC2021). 2021. P. 401.
9. *Vorobev V.S. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 2023. V. 87 (7). P. 983–986.
10. *Chernov D.V. et al.* // Proc. 29th Int. Cosmic Ray Conf. (ICRC 2005). Aug. 3–11, 2005. Pune, India. 2005. V. 2. P. 457–460.
11. ООО “Высоковольтные системы”. Высоковольтные источники питания. <http://hvsys.ru/>
12. *Zadeba E.A. et al.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. V. 675. P. 032039.
13. *Borog V.V. et al.* // Proc. 24th Int. Cosmic Ray Conf. (ICRC 1995). Aug. 28– Sep. 8, 1995. Rome, Italy. V. 4. P. 1291–1294.
14. *Vorobev V.S. et al.* // J. Instrum. 2020. V. 15. P. C08007.
15. Intel. FPGA Altera Cyclone V. <https://www.intel.com/>

Bench for Studying the Characteristics of Multiwire Drift Chambers

E. A. Zadeba¹, *, V. S. Vorobev¹, D. V. Gazizova¹, K. G. Kompaniets¹, E. A. Miroshnichenko¹, R. V. Nikolaenko¹, I. Yu. Troshin¹, E. P. Khomchuk¹, I. A. Shulzhenko¹, and V. V. Shutenko¹

¹ National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

*e-mail: EAZadeba@mephi.ru

Received April 24, 2024; revised May 15, 2024; accepted May 22, 2024

Abstract—To study cosmic ray muons, the world's largest coordinate detector TREK based on multiwire drift chambers, which were previously used in the neutrino detector at the U-70 accelerator (IHEP, Protvino) is under development at National Research Nuclear University MEPHI. To study the characteristics of drift chambers before installation in the TREK detector and in the designed MDM detector, a bench has been fabricated to determine their efficiency, coordinate and angular accuracy, and zone characteristics. The design of the bench and the results of testing 394 drift chambers for the TREK and MDM detectors have been reported.

Keywords: cosmic rays, drift chambers, gas-filled detectors, calibration, detector testing