

СПЕКТРОМЕТР С ВЕРШИННЫМ ДЕТЕКТОРОМ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА УСКОРИТЕЛЕ ИФВЭ

© 2013 г. В. В. Авдейчиков**, А. Н. Алеев**, Е. Н. Ардашев*, С. Г. Басиладзе, Г. А. Богданова, А. М. Вишневская, В. Ю. Волков, А. П. Воробьев*, А. Г. Воронин, С. Н. Головня*, В. Ф. Головкин*, С. А. Горохов*, Я. В. Гришкевич, П. Ф. Ермолов, Е. Г. Зверев, С. А. Зоткин, Д. Е. Карманов, В. И. Киреев**, Е. С. Кокоулина**, В. А. Крамаренко, А. Я. Кутов**, Г. И. Ланщиков**, А. К. Лефлат, С. И. Лютов, В. Х. Маляев*, М. М. Меркин, Г. Я. Митрофанов*, В. В. Мялковский**, В. А. Никитин**, В. С. Петров*, В. Д. Пешехонов**, А. В. Плескач*, М. К. Полковников*, В. В. Попов, И. А. Руфанов**, В. Н. Рядовилов*, В. А. Сенько*, М. М. Солдатов*, Л. А. Тихонова, Н. Ф. Фурманец**, А. Г. Холоденко*, Ю. П. Цюпа*, Н. А. Шаланда*, А. И. Юкаев**, В. И. Якимчук*

*НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского
государственного университета им. М.В. Ломоносова*

Россия, 119992, Москва, Воробьевы горы, 1, стр. 2

**ГНЦ РФ “Институт физики высоких энергий”*

Россия, 142281, Протвино Московской обл., ул. Победы, 1

***Объединенный институт ядерных исследований*

Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6

Поступила в редакцию 27.02.2012 г.

Описаны этапы развития и современное состояние многоцелевой установки “Спектрометр с вершинным детектором”, созданной для проведения физических экспериментов на ускорителе У-70 Института физики высоких энергий (Протвино). Основными детекторами установки являются: вершинный детектор на основе кремниевых микростриповых детекторов, широкоапертурный магнитный спектрометр на основе пропорциональных камер, годоскопический детектор γ -квантов, собранный из свинцовых стекол. Для отбора нужных взаимодействий частиц в установке имеется быстродействующая двухуровневая система запуска. Приведены основные характеристики созданных систем установки, кратко перечислены полученные физические результаты.

DOI: 10.7868/S003281621206002X

ВВЕДЕНИЕ

В 1984 году тремя группами физиков под руководством П.Ф. Ермолова (НИИЯФ МГУ), А.М. Моисеева (ИФВЭ) и И.М. Граменицкого (ОИЯИ) и электронной группой под руководством С.Г. Басиладзе (тогда НИВЦ МГУ) был предложен проект эксперимента по измерению сечений и изучению механизмов образования очарованных частиц в адрон-адронных взаимодействиях на ускорителе У-70 ИФВЭ (г. Протвино) с использованием установки гибридного типа “Спектрометр с вершинным детектором” (СВД) [1]. Установка включает в себя прецизионный вершинный детектор, магнитный спектрометр, годоскопический черенковский γ -детектор и систему запуска (триггер).

Исследование процессов образования очарованных частиц с применением подобной методики было новым для энергий ускорителя У-70 (в сравнении с [2–12]). Ожидалось, что полученные

экспериментальные данные будут содержать качественно иную информацию, критичную для понимания механизмов образования очарованных частиц.

Эксперимент получил название E-161 [13] и предусматривал два этапа. Первоочередной задачей эксперимента ставилось точное измерение сечений инклюзивных процессов образования частиц с открытым очарованием в pp - и π^-p -взаимодействиях при энергиях 60–70 ГэВ с оценкой их топологических сечений. В случае подтверждения достаточно больших сечений процессов при этих энергиях планировалось определить минимальное значение энергии, при которой доступны такие измерения. В качестве следующего шага исследования образования очарованных частиц рассматривалось изучение механизмов образования пар очарованных частиц.

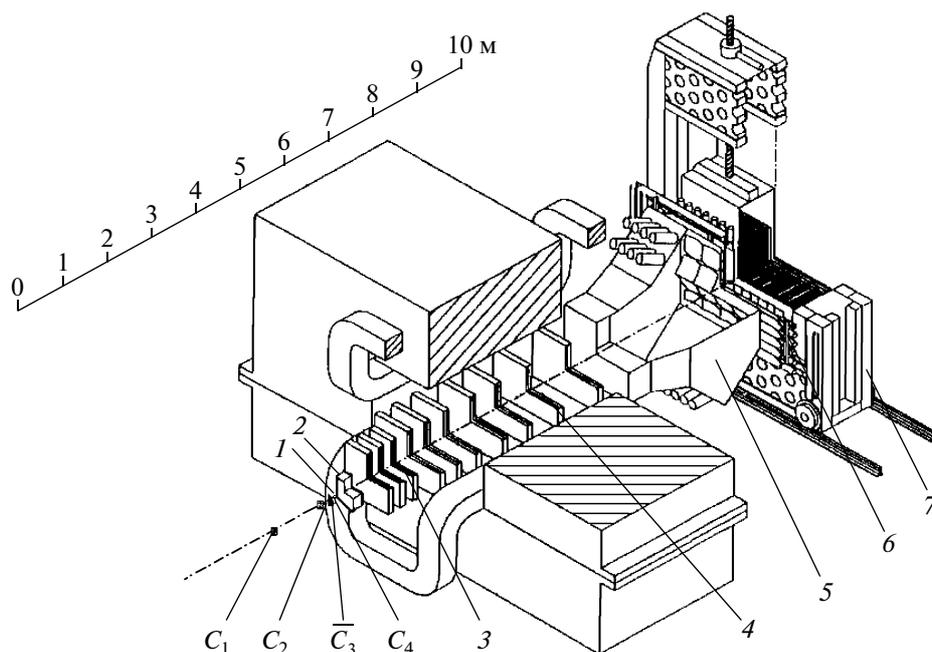


Рис. 1. Детекторы и магнит установки СВД. 1 – быстроциклирующая пузырьковая камера (замененная впоследствии на активную мишень); 2 – прецизионный вершинный детектор; 3 – блок координатных детекторов перед магнитом (первоначально это были метровые пропорциональные камеры, впоследствии – блок мини-дрейфовых трубок); 4 – магнитный спектрометр внутри магнита; 5 – черенковский газовый детектор; 6 – сцинтилляционный годоскоп; 7 – детектор γ -квантов (ДЕГА); C_1, C_2, \bar{C}_3, C_4 – сцинтилляционные детекторы монитора пучка.

Было решено, что создание установки будет разбито на два этапа, соответствующие этапам эксперимента E-161. На первом этапе в состав установки входили: быстроциклирующая жидководородная пузырьковая камера с системой запуска, используемая в качестве прецизионного вершинного детектора, широкоапертурный магнитный спектрометр на пропорциональных камерах и годоскопический черенковский γ -детектор на основе свинцовых стекол. На втором этапе развития установки для существенного увеличения темпа набора статистики (более чем в 100 раз) предполагалось создание быстродействующего прецизионного вершинного детектора, основанного на электронной методике, и развитие спектрометрической части, а также включение в состав установки дополнительных детекторов.

СИСТЕМЫ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ И РЕГИСТРАЦИИ ПЕРВОЙ СТАДИИ ЭКСПЕРИМЕНТА (СВД-1)

В данном разделе основное внимание уделено детекторам и связанным с ними системам, которые после ряда модификаций используются в основном по настоящее время. Общий современный вид детекторов установки СВД показан на рис. 1.

Монитор, вершинный детектор и система запуска

Регистрация короткоживущих очарованных частиц требует высокой точности определения координат (~ 50 – 100 мкм) как вершины первичного взаимодействия, так и точек вторичной активности от распада очарованных частиц.

В СВД-1 вершинным детектором являлась быстроциклирующая пузырьковая камера [14] совместно с микростриповыми кремниевыми детекторами МКД (шаг стрипов 200 мкм), сигналы с которых использовались для мониторинга пучка и запуска установки. Информация с МКД записывалась также на магнитную ленту и использовалась при геометрической реконструкции событий.

Расположение детекторов, включенных в системы мониторинга пучка, вершинного детектора и системы запуска, показано на рис. 2. Сцинтилляционные детекторы C_1, C_2, C_4 имеют размеры $80 \times 80, 80 \times 80$ и 3×38 мм соответственно; \bar{C}_3 имеет отверстие для пропуска пучка. Пучок распространяется вдоль оси Z , его поперечное сечение, имеющее размеры $\sim 2 \times 40$ мм², вытянуто в вертикальном направлении вдоль оси Y . Перед мишенью и после нее установлены телескопы из пропорциональных камер ПК и микростриповых кремниевых детекторов МКД. Число каналов считывания данных составляет 128 для МКД_{1Y}, 256 для МКД_{2Y} и 512 для МКД_{2X} (суммарное число

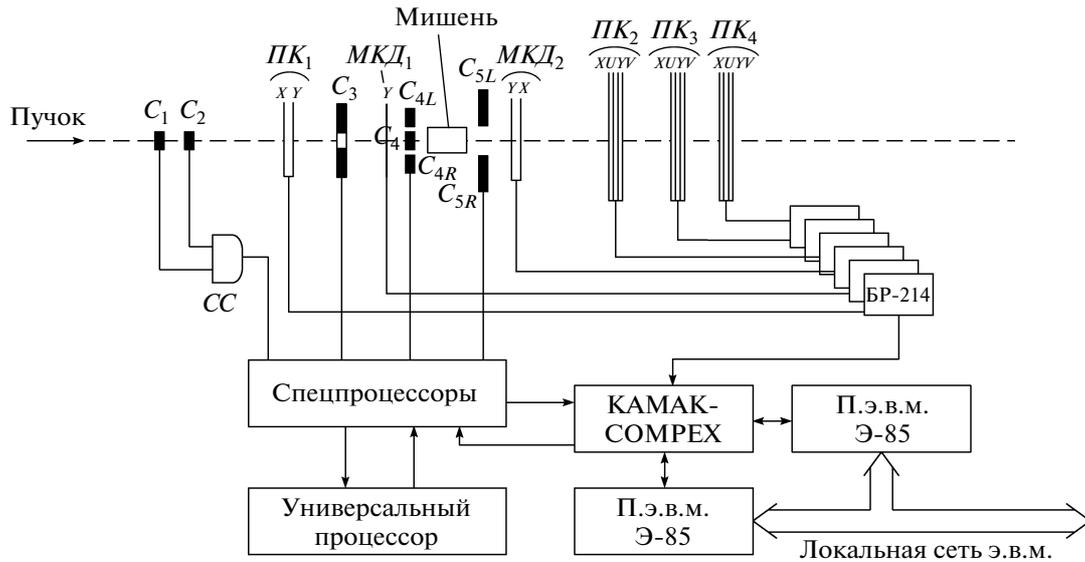


Рис. 2. Расположение детекторов и блок-схема аппаратуры отбора событий и сбора данных в начальной стадии эксперимента. C_1 – C_5 – сцинтилляционные детекторы (C_3 – с отверстием под пучок; C_{4L} , C_4 , C_{4R} – три приставленных вплотную друг к другу детектора; C_{5L} , C_{5R} – два детектора, между которыми находится шель для пропуска пучка); $МКД$ – микростриповые кремниевые детекторы; $ПК$ – пропорциональные камеры (индексами X , Y , U , V обозначены проволоочки (или стрипы), направленные соответственно по горизонтали, вертикали или образующие углы $\pm 10.5^\circ$ с вертикальной осью); $СС$ – схема совпадений; $БР$ – блок регистрации данных.

каналов 896). $МКД_1$ и $МКД_2$ установлены на расстоянии 25 см от мишени.

Электронная аппаратура подсистемы запуска была выполнена в стандарте КАМАК-КОМПЛЕКС [15] на основе схем наносекундной потенциальной логики [16] и включала в себя: модули совпадений и антисовпадений, модули регистрации БР-214, спецпроцессоры, универсальный микропроцессор INTEL 80386 с тактовой частотой 33 МГц, две персональные э.в.м. “Электроника-85”. Многоуровневый триггер был предназначен для решения следующих задач: выделение пучковой частицы в канале по совпадению импульсов от сцинтилляционных детекторов C_1 и C_2 (сигнал “Монитор”); определение взаимодействия по выбыванию начальной частицы из пучка (триггер 1-го уровня); выделение взаимодействий, произошедших в эффективном объеме мишени (триггер 2-го уровня); обогащение экспериментальной выборки событиями с распадами очарованных частиц (триггер 3-го уровня). Обе п.э.в.м. служили для оперативного контроля аппаратуры, визуализации данных, управления работой спецпроцессоров и триггерного процессора.

Магнитный спектрометр

Широкоапертурный магнитный спектрометр (м.с.) является важной частью установки СВД. Первоначально пропорциональные камеры были сгруппированы в 10 блоков, три из которых установлены перед магнитом (впоследствии они бы-

ли заменены на блок дрейфовых трубок), а семь – в магните МС-7А (длина магнитной дорожки по пучку 3 м, апертура $1.8 \times 1.2 \text{ м}^2$ (ширина \times высота), напряженность поля $B = 1.18 \text{ Тл}$ при токе 4 кА). В каждом блоке камер может быть от двух до трех плоскостей, проволоочки в которых располагаются в вертикальном (Y) или двух “косых” (U , V) направлениях. В зависимости от размера камеры количество проволоочек в каждой плоскости может быть от 602 до 704, общее используемое количество плоскостей составляет 28, а общее количество сигнальных проволоочек ~18 тысяч.

В силу ограниченности свободного пространства в магните (зазор между камерами и магнитом составляет 6 см) на самих камерах размещены только усилители-формирователи, а аппаратура регистрации сигналов находится в крейтах КАМАК, помещенных в экспериментальном домике. Длина соединительных кабелей составляет ~50 м. Один крейт содержит электронику регистрации для одной плоскости.

Съем сигналов с пропорциональных камер. Съем и усиление импульсов с сигнальных проволоочек осуществляется усилителями-формирователями двух типов:

1) 16-канальными усилителями разработки ИЯФ СОАН (Новосибирск), основу которых составляет гибридная интегральная схема 155УД1 [17];

2) усилителями на основе гибридной микросхемы УИ5 разработки ЛИЯФ (Ленинград) [18].

Входное сопротивление усилителей первого типа ~1 кОм, усиление по напряжению ~300. На

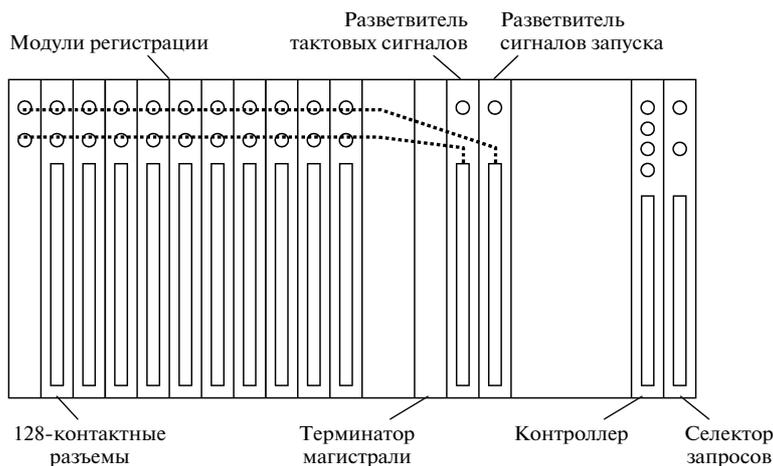


Рис. 3. Расположение модулей в крейтах регистрации магнитного спектрометра.

выходе стоит ключ с общим эмиттером с регулируемым порогом срабатывания (от 300 до 700 мВ), развивающий ток до 30 мА, т.е. способный формировать в выходном кабеле (витая пара, волновое сопротивление ~ 110 Ом) импульсы напряжения в логических уровнях ТТЛ. Ради упрощения схем формирования выходных импульсов по длительности не производится.

Практика показала, что в силу весьма высокой плотности монтажа имеется заметное обратное влияние выходного сигнала на вход усилителей, что при большом количестве каналов делает подсистему съема склонной к возбуждению. Поэтому величина выходного тока формирователей в усилителях была снижена примерно на порядок — до минимального уровня, необходимого для срабатывания входов ТТЛ-микросхем. Для этого на выходе соединительных кабелей были поставлены преобразователи импедансов (с волнового сопротивления кабеля до ~ 1 кОм) в виде транзисторов с общей базой.

В усилителях второго типа выходной ток был ограничен уже на стадии проектирования введением выходного токового ключа (~ 5 мА).

Организация модулей регистрации. В состав каждого крейта регистрации входят следующие модули:

- 64-канальные модули регистрации и кодирования сигналов с пропорциональных камер РПК-213 [19] (один крейт соответствует одной пропорциональной камере);
- крейт-контроллер КПК-671 [20], выходящий на межкрейтовую магистраль, связывающую их с центральным крейтом;
- специализированные модули разветвления тактовых сигналов и сигналов запуска ТР-183;
- селекторы запросов СЗ-611, фильтрующие перед кодированием модули регистрации, не имеющие данных.

Модули регистрации сигналов с пропорциональных камер имеют по 64 входа [19], в каждом крейте (рис. 3) содержится от 10 до 11 модулей. Их основу составляет быстродействующее запоминающее устройство $3У$ на 16 64-разрядных слов, которое фиксирует наличие или отсутствие сигнала на каждом из входов модуля в тактах, повторяющихся с периодом 80 нс (12 МГц). Поскольку $3У$ имеет 16 адресных входов, суммарная длина временного интервала хранения информации о предыдущем состоянии входов составляет ~ 1.2 мкс. Это время может быть использовано для выработки сигнала запуска подсистемы (триггер 1-го уровня) по необходимым физическим критериям.

Тактовые импульсы генерируются в центральном управляющем крейте системы и затем распределяются в 2 этапа по всем крейтам с помощью 16-канальных разветвителей в уровнях NIM. Централизованное тактирование снимает проблему индивидуальной подстройки, свойственную системам со схемами задержек в каждом канале регистрации.

Сигнал запуска распределяется по модулям регистрации из центрального крейта аналогичным образом через такие же разветвители (показаны на рис. 3). При поступлении фронта сигнала запуска $3У$ в каждом модуле переводится из режима записи в режим чтения. Для выделения факта прохождения частицы вблизи сигнальной проводочки (в момент отобранного взаимодействия) необходимо выполнить следующие действия:

- 1) отступить во времени назад на число тактов, равное задержке системы запуска;
- 2) в каждом канале выделить факт появления импульса с усилителя в исследуемом такте, т.е. убедиться, что:
 - а) в предыдущем такте состояние входа $3У$ было равно нулю,

б) в исследуемом такте или в следующем такте состояние входа изменилось с нуля на единицу (два такта необходимы, так как в одном такте импульс может быть “срезан” и потерян);

3) выработать код сработавшего канала.

Исследуемые на установке СВД физические процессы характеризуются большой множественностью вторичных частиц, поэтому с большой вероятностью можно ожидать появления многих сигналов в модуле регистрации в отдельном взаимодействии. Следовательно, каждый модуль регистрации должен иметь внутреннюю стековую память (LIFO) для хранения нескольких кодов сработавших каналов.

В описываемой системе длина стека позволяет тестировать все каналы одновременно. В этом случае при двоичном кодировании необходимо повторить описанные выше действия 64 раза, что требует значительного времени, причем суммарная длина кода, полученная в результате, будет довольно большой (64 кода по 6 бит). Гораздо выгоднее разбить 64 входа в модуле регистрации на группы по 8 каналов и сохранить представление данных в группе в исходном — линейном — коде (т.е. в виде набора из 8 бит), а в двоичном коде представлять только номер группы (3 бит). Как нетрудно видеть, максимальная общая длина кода в этом случае равна 88 бит (8 кодов по 11 бит), а не 384 бит.

Для выполнения действий в группах, отмеченных выше в пунктах 1–3, необходимо 4 тактовых сигнала (4-й такт нужен для запоминания кода группы в стеке). Эти действия повторяются 8 раз одновременно во всех модулях регистрации и во всех крейтах. Одновременно с кодированием производится фильтрация “нулевых” групп (не содержащих ни одного сработавшего канала). Всего для кодирования всех сигналов необходимо 32 тактовых интервала, что занимает время <6 мкс.

Управление процессом кодирования берут на себя контроллеры крейтов [20], генерирующие по сигналу запуска 8 серий из четырех сдвинутых друг относительно друга во времени импульсов. Если в модуле регистрации зарегистрирована хотя бы одна сработавшая группа, то по окончании управляющей тактовой серии он выставляет сигнал запроса обслуживания. Начиная с этого момента система готова к считыванию данных, которого, в принципе, может и не быть, если система отбора (триггер) второго уровня выдаст отрицательное решение, т.е. забракует событие, отобранное подсистемой отбора первого уровня.

Центральный крейт системы. Основными модулями центрального крейта (рис. 4) являются:

- крейт-контроллеры ветвей ККС-731 [21];
- контроллер центрального крейта КЦК [22] (со своим селектором запросов СЗ-611 [23]), связывающий аппаратуру с on line компьютером;

- программно-управляемый блок задержки (2БЗУ-122 [24], диапазон 64 нс) для снятия кривых задержанных совпадений пропорциональных камер;

- две пары специализированных модулей ТР-183 разветвления тактовых сигналов и сигналов запуска первой ступени;

- генератор (имитатор) сигналов запуска (левый модуль Clock-730А);

- генератор (имитатор) сигналов начала цикла ускорения (правый модуль Clock-730А);

- модуль INTERRUPT системы синхронизации [25];

- два входных регистра 214-БР-16 этой подсистемы, принимающие номер очередного события от системы запуска установки.

Во вспомогательном крейте находится сдвоенная схема совпадений 2СС-1511, с помощью которой можно устанавливать различные режимы работы магнитного спектрометра. Система может работать в трех режимах:

- 1) тест в общей СВД-программе,
- 2) тест в специализированной программе контроля,
- 3) рабочий режим в общей программе.

Организация считывания данных. Для построения системы использованы крейты КАМАК. Однако в системе считывания на магистрали крейта реализован протокол КОМПЕКС [15], адресное пространство которого — 24 разряда — соответствует современным стандартам (использованы линии W_1-W_{24}). Для увеличения физического быстродействия магистрали нагрузочные сопротивления линий магистрали снижены до 500 Ом (для этого введены специальные модули — терминаторы), а в модулях регистрации и контроллерах использованы приемопередатчики с большими выходными токами. Благодаря этому длительность цикла на магистрали снижена до 600 нс, т.е. почти вдвое по сравнению с циклом на магистрали КАМАК.

Система считывания в магнитном спектрометре — централизованная (рис. 5) и имеет, так же как в КАМАК, 3 иерархических уровня. Выбор централизованной структуры обусловлен однотипностью большинства детекторов, простотой алгоритмов кодирования зарегистрированных данных, допускающей централизованное управление, а также тем, что данные должны накапливаться в одну общую память. Применение протокола КОМПЕКС позволило унифицировать строение магистралей в крейтах регистрации, (кабельных) ветвях и в центральном крейте (по сути, в протоколе КОМПЕКС протокол магистрали ветви КАМАК перенесен на магистрали крейтов). Всего имеется 4 ветви (каждая со своим интерфейсным контроллером [21] в центральном крейте (см. рис. 4)). Каждая ветвь имеет по семь крейтов регистрации. К центральному крейту подключен on line ком-

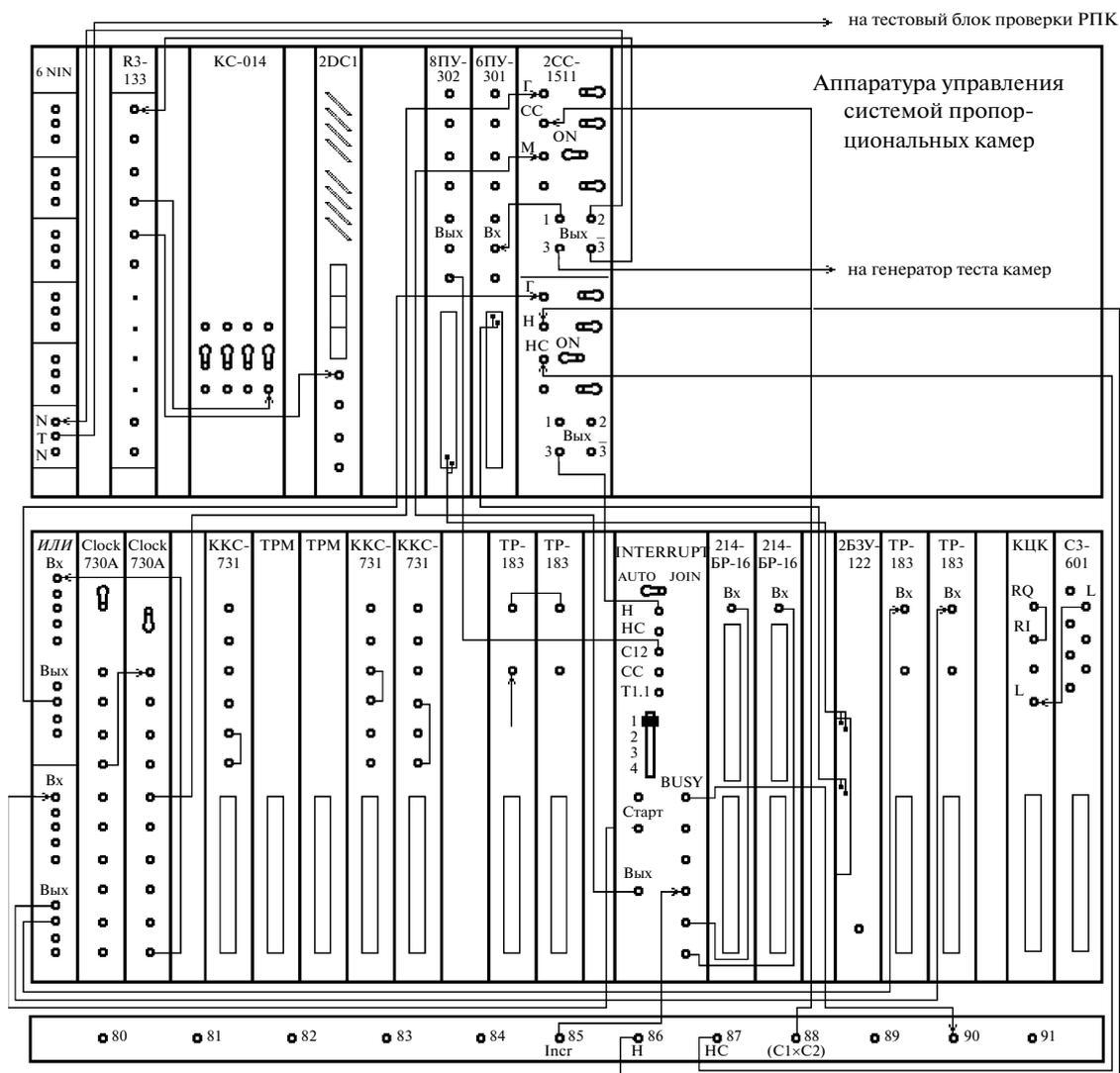


Рис. 4. Центральный и вспомогательный крейты электроники магнитного спектрометра; внизу показана кабельная панель системы синхронизации. 6NTN – преобразователь уровней NIM–TTL–NIM; R3-133 – разветвитель сигналов NIM; KC-014 и 2DC1 – счетчики импульсов; 6ПУ-301 и 8ПУ-302 – преобразователи уровней NIM–ECL–NIM; 2СС1 – двоякая схема совпадений; ИЛИ – объединитель сигналов NIM; Clock-730A – TTL-генераторы (частот); ККС-731 – контроллеры (меж)крейтовой связи; ТРМ и ТР-183 – многоканальные разветвители-генераторы тактовых сигналов; 2БЗУ – управляемый блок наносекундной задержки; КЦК – контроллер центрального крейта; СЗ-601 – селектор запросов ((LAM) модулей крейта.

пьютер (IMB PC) через свой собственный интерфейсный контроллер [22]. В этом же крейте находятся модули связи с системой запуска.

Если в центральном крейте получено отрицательное решение от подсистемы запуска второго уровня, то компьютер выдает на магистраль центрального крейта сигнал сброса Z. Последний распределяется по всем крейтам системы через магистрали ветвей и, далее, поступает на все модули регистрации. Если же решение положительное, то начинается процесс считывания. Поскольку один крейт соответствует одной координатной плоскости, то вероятность того, что при запуске системы

каждый ее крейт содержит данные (для чтения), довольно велика. В силу этого данные считываются простейшим способом, а именно путем последовательного поочередного опроса (по “программному каналу”). Центральный компьютер считывает данные с каждого крейта до тех пор, пока имеется подтверждение наличия данных – Q в цикле чтения, после чего он переходит к считыванию следующего крейта.

В пределах крейта считывание происходит следующим образом. Как уже говорилось, если модуль регистрации имеет данные, то он выставляет сигнал запроса обслуживания L. На 25-й станции

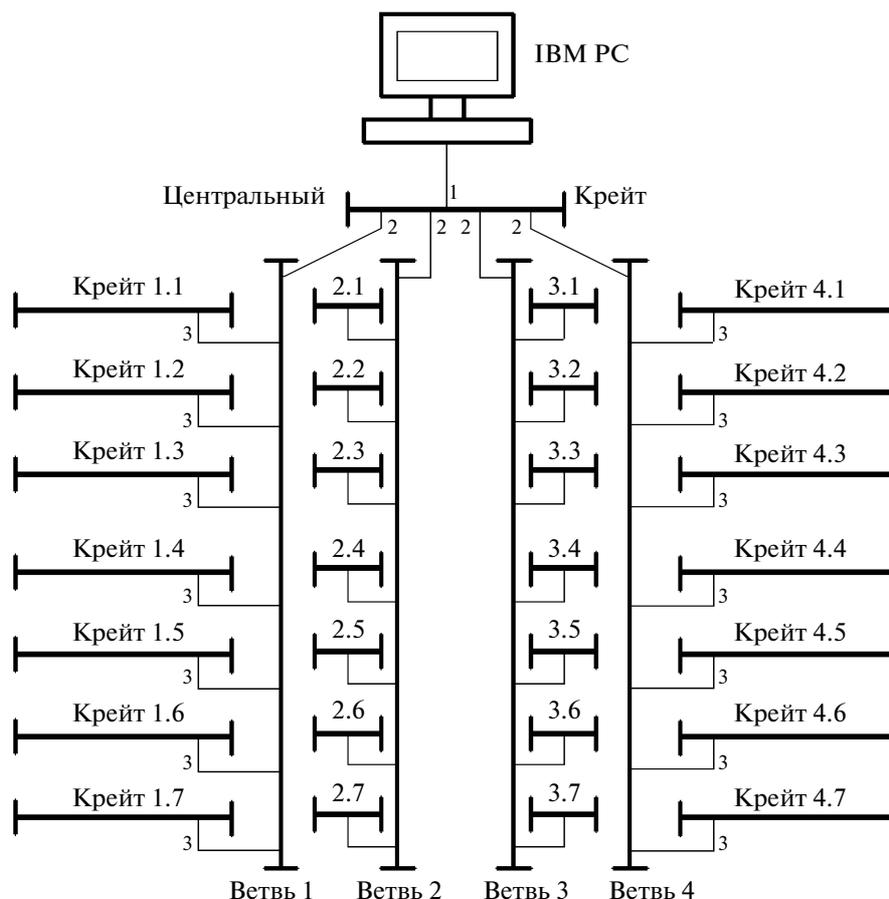


Рис. 5. Строение магистралей системы считывания магнитного спектрометра. Интерфейсные контроллеры: 1 – контроллер IBM PC; 2 – контроллер ветви; 3 – контроллер крейта.

крейта имеется селектор запросов [23] с приоритетным шифратором (в двоичный код); приоритет отображает позицию модуля в крейте. Код текущего (наиболее приоритетного) запроса передается селектором по дополнительной магистрали [15] на контроллер крейта. При получении от компьютера команды считывания контроллер использует этот код для считывания имеющихся данных из модуля регистрации (столько раз, сколько имеется слов в стеке). Если данные в модуле регистрации исчерпаны, то он снимает сигнал L , и в следующем цикле начинается опрос следующего по приоритету (по позиции) модуля регистрации. В результате, на уровне крейта не требуется дополнительных программных действий по нахождению кодированных данных (это делается аппаратными методами), и считывание идет с максимальной возможной для аппаратуры скоростью.

Фактором, определяющим скорость считывания, является физическое быстродействие магистрали ветви, цикл считывания одной координаты занимает ~ 4.5 мкс. Всего в событии считывается ~ 300 слов, т.е. время считывания одного события занимает ~ 1.2 мс. Таким образом, за одну секунду

вывода пучка из ускорителя ($\sim 10^6$ частиц) имеется возможность приема данных от ~ 750 событий.

Программно-аппаратные средства контроля системы. Для спектрометра создана система контроля, позволяющая проверять работоспособность на уровне отдельных каналов, модулей, крейтов и всей системы в целом без наличия пучка ускорителя. Основой системы контроля является генератор импульсов, сигнал с которого может быть подан на любую из катодных плоскостей пропорциональных камер с помощью механического коммутатора. Из-за наличия паразитных емкостей “катодная плоскость – анодная проволока” сигнал генератора разветвляется по всем каналам, благодаря чему можно проверить работу каждой проволоки в каждой камере.

Вторым важным модулем подсистемы контроля является программно-управляемый модуль задержки [24] с шагом 1 нс и диапазоном 128 нс, позволяющий сдвигать во времени импульс запуска относительно сигналов с проволочек.

Программным компонентом системы контроля является специализированная программа, напи-

санная на языке 'С Builder', с применением графических средств, которая:

- 1) проверяет работоспособность центрального крейта системы;
- 2) проверяет каждый крейт регистрации в каждой из ветвей;
- 3) проверяет каждую проволочку в каждой из плоскостей путем набора и анализа гистограмм с тестового генератора;
- 4) строит кривые задержанных совпадений для каждой плоскости в тестовом и рабочем режимах (на пучке), что позволяет подбирать оптимальную задержку сигнала запуска.

Магнитный спектрометр является одним из крупнейших в нашей стране. В течение многих лет он успешно эксплуатируется на ускорителе У-70, и доля потерь времени эксперимента, вызванных неисправностями аппаратуры спектрометра, всегда была небольшой.

На установке СВД-1 было проведено два сеанса в протонном пучке с импульсом 70 ГэВ/с (1992, 1994 гг.), в которых было получено ~310 тысяч снимков (около 20% запланированной статистики) с плотностью треков 100–300 пузырьков/см при диаметре пузырька 25–30 мкм. Обработка экспериментального материала, как и на всех установках гибридного типа, объединяющих камерную и электронную методики, была разбита на два этапа. На первом этапе велась обработка фотоснимков с быстроциклирующей пузырьковой камеры, на втором – полученная информация “сшивалась” с данными магнитного спектрометра. Предварительные результаты, полученные на первом этапе эксперимента, были доложены на XXVII Международной конференции по физике высоких энергий [26]. Выполнены предварительные оценки сечения образования очарованных частиц в pp -взаимодействиях при 70 ГэВ/с [27, 28]. Однако низкая эффективность регистрации и реконструкции редких процессов в реализованной на первом этапе постановке эксперимента потребовала существенного повышения быстродействия установки и ее значительной модернизации.

Предложение второго этапа эксперимента

В 1998–99 гг. сотрудниками НИИЯФ МГУ, ИФВЭ (Протвино), ОИЯИ (Дубна) и ИФВЭ ТГУ (Тбилиси) было подготовлено Предложение о модернизации СВД [29]. На втором этапе эксперимент по изучению механизмов образования очарованных частиц в pA -взаимодействиях при 70 ГэВ и их распадах получил название Е-184.

Основные цели второй стадии исследований. Получение большой статистики по распадам очарованных частиц позволяет выполнить следующие исследования.

1. Измерение полного сечения образования очарованных частиц на ядрах с точностью не хуже 10% (требуемая статистика ~300 распадов).

2. Измерение A -зависимости полного сечения по данным на ядрах Si и других мишеней (требуемая статистика – по 500 распадов для каждой мишени).

3. Измерение дифференциального сечения в переменных Фейнмана и поперечного импульса p_T , изучение эффекта лидирования (требуемая статистика – по 1000 распадов для каждой мишени).

4. Поиски эффектов, связанных с механизмом высвобождения внутреннего очарования (требуемая статистика – 2500–3000 распадов для каждой мишени).

5. Проверка применимости теории возмущений квантовой хромодинамики для описания околопорогового образования очарованных частиц и проверка предсказаний двухкомпонентных моделей [30, 31] (требуемая статистика – 2500–3000 распадов для каждой мишени).

6. Определение мод малоизученных распадов Λ_c^+ -бариона (требуемая статистика – 2500–3000 распадов для каждой мишени).

Необходимый состав установки для второго этапа эксперимента. Для решения поставленных выше задач требовалась экспериментальная установка, с помощью которой можно восстановить кинематические характеристики очарованных частиц в широком диапазоне переменных x_F (переменная Фейнмана) и p_T .

Без существенных изменений в состав СВД-2 вошел широкоапертурный магнитный спектрометр с пропорциональными камерами, а также детектор γ -квантов из черенковских счетчиков полного поглощения, изготовленный на первом этапе эксперимента. На этом этапе были также изготовлены и отлажены сцинтилляционные детекторы мониторинга пучка, малые пропорциональные камеры для диагностики пучка и большой сцинтилляционный годоскоп, расположенный перед детектором γ -квантов.

Для второго этапа эксперимента дополнительно требовалось создать следующие детекторы:

- прецизионный вершинный детектор с высоким быстродействием на основе микростриповых кремниевых детекторов;
- блок из шести плоскостей мини-дрейфовых трубок;
- дополнить установку детектором-идентификатором сорта частиц на основе порогового ячеистого черенковского счетчика.

Кроме того, требовалось разработать и изготовить новую электронику системы запуска, а также систему сбора и представления данных на основе новейших (в то время) быстрых сетевых средств связи и новых компьютеров.

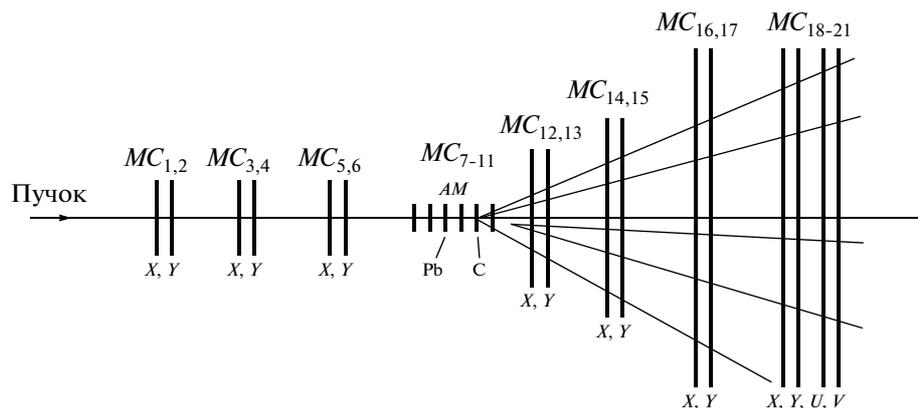


Рис. 6. Строение составных частей вершинного детектора. $МС_1$ – $МС_6$ – сенсоры пучкового телескопа; $МС_7$ – $МС_{11}$ – сенсоры мишени; $МС_{12}$ – $МС_{17}$ – сенсоры вершинного телескопа; $МС_{18}$ – $МС_{21}$ – сенсоры трековой системы; $АМ$ – активная мишень.

СИСТЕМЫ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ И РЕГИСТРАЦИИ НА ВТОРОЙ СТАДИИ ЭКСПЕРИМЕНТА (СВД-2)

Существенный прогресс в исследовании очарованных частиц на выведенных пучках в последние годы был достигнут благодаря развитию техники прецизионных вершинных детекторов (п.в.д.), основанных на электронной методике, и внедрению мощных процессоров, способных быстро обрабатывать большой объем экспериментальных данных. Техника п.в.д. позволяет делать быструю оценку промаха вторичных треков относительно первичной вершины для отбора событий с распадами короткоживущих частиц в реальном времени эксперимента, а также восстанавливать вершины этих распадов. Кроме того, в состав п.в.д. могут быть легко включены мишени с различными атомными номерами.

В экспериментах следующего поколения по изучению фото- и адронобразования тяжелых кварков на выведенных пучках CERN и FNAL были использованы сложные п.в.д., содержащие большое количество *МКД* с общим числом каналов несколько десятков тысяч [32–34]. Количество восстановленных распадов очарованных частиц достигало 10^5 , что позволяло перейти к детальному исследованию динамики адронобразования очарованных кварков и механизмов их распада.

Поскольку величина промаха $\delta \approx \sigma_t$ практически не зависит от импульса распадающейся очарованной частицы [35], техника п.в.д. может быть эффективно использована для улучшения отношения сигнал/шум в исследованиях очарованных частиц в околопороговой области. Поэтому для реализации второго этапа эксперимента по исследованию образования очарованных частиц было предложено использовать быстродействующий п.в.д., структура которого оптимизирована для исследуемого

диапазона энергий. Ожидаемые функции п.в.д. состояли в следующем:

- на уровне *on line* отбора событий: должны обеспечиваться точные измерения координат точки взаимодействия (± 150 мкм) и координат на траекториях первичной и вторичных заряженных частиц (± 5 мкм), позволяющие установить факт взаимодействия первичной частицы в мишени и наличие вторичных вершин, близлежащих к первичной;

- на уровне геометрической реконструкции треков: отсчеты с детекторов п.в.д. должны гарантировать высокое (~ 3 мрад) двухтрековое разрешение для заряженных частиц, испущенных под малыми углами, и обеспечивать эффективное восстановление траекторий всех заряженных частиц;

- на уровне восстановления топологии событий: данные, полученные с помощью п.в.д., должны обеспечить реконструкцию вторичных вершин, расположенных на расстоянии до 5 мм от первичного взаимодействия, и привязку к ним “третичных” треков.

Вершинный микростриповый детектор

Конструкция, параметры сенсоров вершинного детектора и электроника съема сигналов описаны в работе [36]. На рис. 6 схематически показана структура вершинного детектора [37]. Детектор включает в себя:

- 1) Пучковый телескоп, предназначенный для регистрации прохождения и определения направления начальных пучковых частиц от ускорителя (протоны) и состоящий из трех пар сенсоров ($МС_1$ – $МС_6$), обеспечивающих полное перекрытие площади пучка диаметром ~ 3 мм;

- 2) активную – чувствительную к трекам – мишень ($АМ$), в которой протоны в протон-ядерных взаимодействиях вызывают первичные взаимодей-

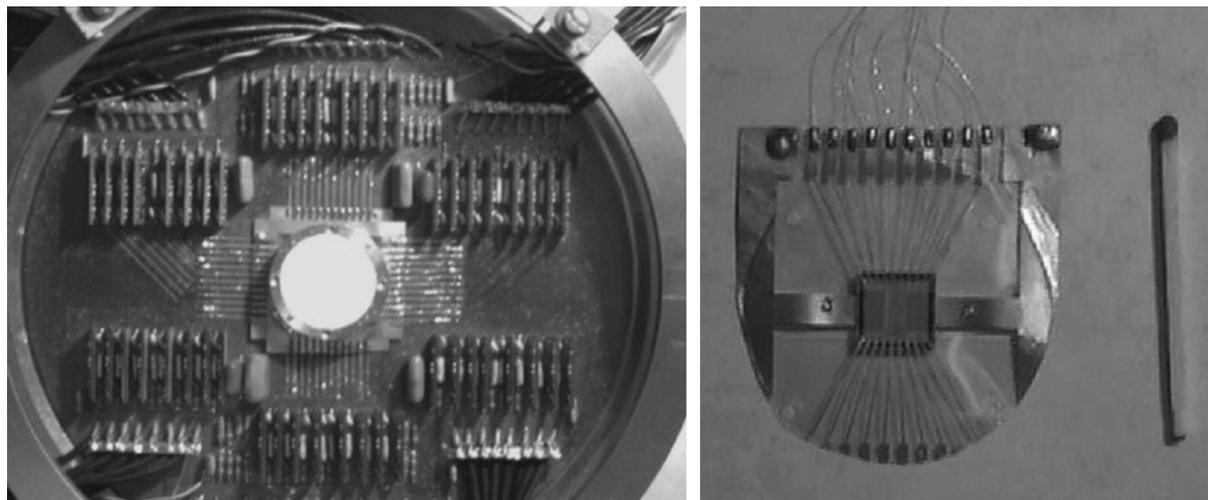


Рис. 7. Слева – внешний вид мишени, смонтированной на печатной плате (в центре), мишень окружена шестью группами предварительных усилителей, по восемь усилителей в каждой группе; справа – крепление кремниевого детектора.

ствия; малая часть последних ($\sim 10^{-4}$) содержит очарованные частицы или редкие события с большой множественностью адронов, а также узкие адронные резонансы;

3) основную (трековую) часть вершинного детектора, обеспечивающую регистрацию треков, выделение первичной и вторичной вершин и состоящую из 5 (X, Y) пар сенсоров для регистрации треков в апертуре ± 250 мрад по полярному углу θ и $0-360^\circ$ по азимутальному углу ϕ , где θ – угол вторичных треков относительно направления начального пучкового трека, а ϕ – начальный угол в плоскости, протонов); указанная апертюра сравнима с апертурой других детекторов установки.

Сенсоры изготавливают из 100-миллиметровых пластин кремния, размеры сенсоров и их взаимное расположение по оси Z указаны в таблице

(за $Z = 0$ принята координата первого сенсора активной мишени);

Активная мишень. Для решения физических задач с использованием вершинного детектора мишень должна выполнять следующие функции:

- выделение событий с первичным взаимодействием в мишени на стадии выработки сигнала триггера 1-го уровня;

- предварительную локализацию вершины события по Z - и (X, Y)-координатам, используемую далее в формировании триггера 2-го уровня и при последующей геометрической реконструкции события;

- обеспечение возможности исследования A -зависимости механизма образования очарованных частиц путем установки между ее активными слоями дополнительных пассивных слоев,

Таблица

Номер сенсора и ориентация стрипов	Назначение	Расположение стрипов	Размеры рабочей области сенсора, мм	Z -координата, мм	Расстояние между стрипами, мм
1, 2 (X, Y)	Пучковый телескоп	Верт., гориз.	16 × 16	-1000; -1000	25
3, 4 (X, Y)		Верт., гориз.		-500; -500	
5, 6 (X, Y)		Верт., гориз.		-12; -11	
7–11 (Y)	Активная мишень	Вертикальная	8 × 8	0, +4, +12*, +18, +22	1000
12, 13 (X, Y)	Трековая часть детектора	Верт., гориз.	16 × 16	+31; +32	25
14, 15 (X, Y)		Верт., гориз.	32 × 32	+51; +52	50
16, 17 (X, Y)		Верт., гориз.	51 × 51	+81; +82	50
18, 19 (X, Y)		Верт., гориз.	51 × 51	+106; +113	50
20, 21 (U, V)		Наклон 10.5°	51 × 51	+120; +126	50

* Для исследования зависимости сечений от атомного номера ядра по Z -координате +8 мм расположена пассивная мишень – фольга из свинца толщиной 220 мкм; по Z -координате +16 мм – пассивная мишень – пластина углерода толщиной 500 мкм.

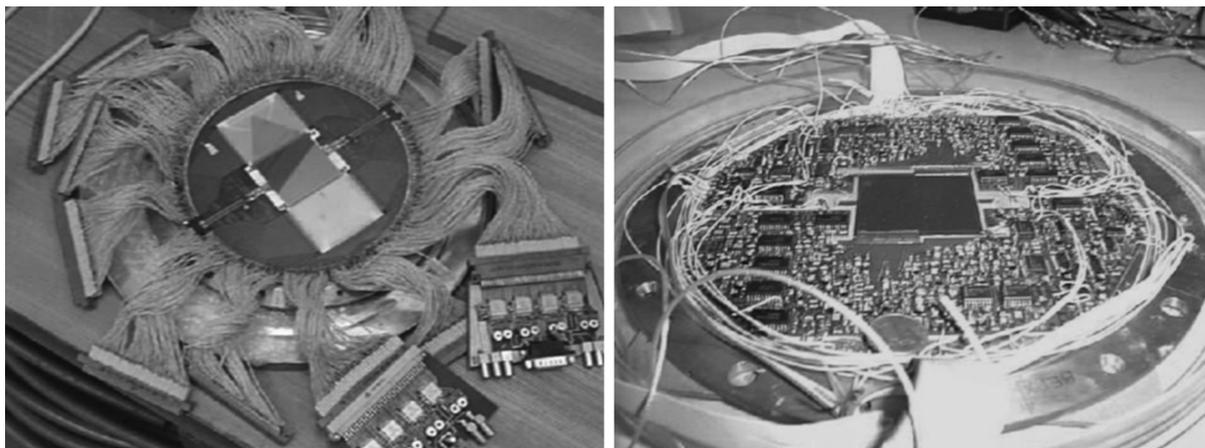


Рис. 8. Микростриповые детекторы с микросхемами “Гассиплекс” (слева) и “Викинг” (справа).

выполненных из веществ с заметно отличающимися значениями атомного номера (легкого углерода С и тяжелого свинца Pb).

Общий вид мишени приведен на рис. 7 [38]. Мишень состоит из набора стриповых кремниевых сенсоров $МС_7$ – $МС_{11}$ и смонтирована в центре печатной платы, изготовленной из стеклотекстолита в форме диска толщиной 1.5 мм и диаметром 200 мм с отверстием в центре диаметром 30 мм. На этой же плате установлены предварительные усилители (полное число усилителей на плате 48). Длина коммутационных проводников, связывающих полоски мишени с входами усилителей, менее 30 мм.

Мишень выполнена в форме цилиндра. Стенки цилиндра образованы собранными в пакет кольцами из плексигласа. Дно и крышка цилиндра изготовлены из алюминиевой фольги толщиной 20 мкм. Мишень собирается непосредственно на печатной плате с позиционированием по центральному отверстию. В рабочем состоянии мишень ориентирована так, что ось цилиндра совпадает с направлением первичного пучка частиц. Между каждой парой колец вложена и натянута печатная плата, на которой закреплен кремниевый детектор. Плата выполнена из алюминизированного полиимида (толщина несущего полиимида равна 10 мкм, печатных алюминиевых проводников – 20 мкм (см. рис. 7, справа)). Натяжение платы в радиальном направлении осуществляется автоматически при сборке мишени вследствие конического профиля сопряжения колец друг с другом в пакете. Коэффициент растяжения платы в радиальном направлении составляет 0.04 величины внутреннего радиуса кольца. По центру каждой из плат к алюминиевым проводникам разварен кремниевый сенсор. Крепление кристалла сенсора к плате осуществляется только за счет его симметричной разварки.

Электроника съема и регистрации сигналов.

В вершинном детекторе используются усилительные многоканальные микросхемы двух типов:

– “Гассиплекс” [39] (16 каналов, 10 МГц), усиливающие сигналы с сенсоров пучкового телескопа $МС_1$ – $МС_6$ и сенсоров вершинного телескопа $МС_{12}$ – $МС_{17}$ (рис. 8, слева);

– “Викинг” [40] (128 каналов, 10 МГц), усиливающие сигналы с сенсоров $МС_{18}$ – $МС_{21}$ трековой системы (рис. 8, справа).

Микросхемы первого типа ввиду малого времени формирования импульса (~ 0.5 мкс) применены для дальнейшей организации системы отбора 2-го уровня очарованных частиц; микросхемы второго типа использованы для упрощения конструкции вершинного детектора. Общее количество каналов усиления и формирования сигналов составляет около 10 тысяч.

Программное обеспечение вершинного детектора. В состав вершинного детектора входят 3 быстродействующих компьютера (IBM PC класса Pentium III 800 МГц и выше):

– два – для вершинного детектора с параллельной записью информации от вершинного телескопа и трековой системы с целью обеспечения нужного быстродействия вершинного детектора;

– один – центральный компьютер, обеспечивающий прием и анализ информации от всей системы в целом, а также контроль других детекторов установки, в составе которых работает вершинный детектор.

Компьютеры подсистем (кроме магнитного спектрометра) работают под операционной системой Windows-98, компьютер магнитного спектрометра и центральный компьютер – под Windows-XP. Языком программирования для разработки являлся С++ в интегрированных оболочках Borland Builder v6.0, Borland С++ v5.02. Все программы снабжены удобным пользовательским интерфей-

сом, современными средствами визуализации и графическим представлением данных.

Разработанное программное обеспечение вершинного детектора включает в себя:

- тесты модулей связи крейта КАМАК и компьютера;
- тесты модулей синхронизации;
- тесты электронных модулей вершинного детектора с имитацией его работы от тестирующих сигналов;
- программное обеспечение, позволяющее выполнять методические работы;
- набор программ для сбора данных с вершинного детектора.

Комплект программ для набора статистики обеспечивает следующие функции:

- 1) проведение калибровочных измерений и вычисление калибровочных констант как при ручном запуске, так и в автоматическом режиме, результаты калибровки заносятся для каждой плоскости в файл пьедесталов, общие результаты калибровки можно увидеть в файле svd.log, визуальнo результаты калибровки можно видеть на гистограммах плоскостей;
- 2) загрузку калибровочных констант в модули амплитудного анализа (ААМ, ААВ, ААТ-Н);
- 3) режим “компиляции” данных с использованием модулей КОМП и схем фильтрации данных модулей ААТ-Н;
- 4) сбор данных со всех работающих каналов (~10000) в режиме исключения “нулевых” каналов со скоростью до ~1000 событий/с;
- 5) создание, заполнение и визуализацию гистограмм для контроля качества данных (средние амплитуды, спектры сигналов по выделенным каналам и интегрально по детектору);
- 6) работу схемы синхронизации от прямых проходящих частиц, триггера 1-го уровня в автономном режиме и совместно с остальными подсистемами установки;
- 7) запись и хранение физической информации на жестком диске в автономном режиме;
- 8) передачу данных и управление заданиями с использованием протокола ТСР/IP при совместном режиме работы.

Вершинный детектор и электроника считывания сигналов испытывались в составе остальной аппаратуры установки СВД-2 на пучке ускорителя ИФВЭ. Получены следующие характеристики:

доля неработающих и шумящих каналов	5% (из 9200)
погрешность измерения координат:	
в сенсорах с шагом 25 мкм	5 мкм
в сенсорах с шагом 50 мкм	10 мкм
погрешность измерения углов	0.2 мрад

доля неработающих и шумящих каналов	5% (из 9200)
эффективность регистрации треков	96%
регистрация множественности треков	> 40 треков

Полученные характеристики соответствуют мировому уровню параметров вершинных детекторов.

За одну секунду вывода пучка из ускорителя имеется возможность приема данных: с “Гассиплекс” – 750 событий/с при 300 слов в событии; с “Викинг” – 1000 событий/с при 150 слов в событии.

Блок мини-дрейфовых трубок

Для сопряжения треков частиц в п.в.д. и треков, зарегистрированных в пропорциональных камерах магнитного спектрометра, и повышения точности измерения до ~0.3 мм метровые пропорциональные камеры заменены блоком мини-дрейфовых трубок. Это система из цилиндрических (токопроводящая пленка) газовых детекторов, объединенных в три двухслойных планарных модуля.

Более подробно конструкция дрейфовых трубок и электроника для них описаны ниже в разделе “Проект “Термализация” на установке СВД-2”.

Пороговый черенковский детектор

Для идентификации заряженных частиц используется многоканальный пороговый газовый черенковский детектор, размещенный между магнитом МС-7 и сцинтилляционным годоскопом. Детектор состоит из двух секций длиной 3 м с входной апертурой $177 \times 130 \text{ см}^2$. В задней части детектора расположены в 4 горизонтальных ряда прямоугольные сферические зеркала размером $42 \times 33 \text{ см}$ с радиусом кривизны $R = 200 \text{ см}$, по 8 штук в каждом ряду. Полная поверхность, перекрываемая зеркалами, составляет $265 \times 155 \text{ см}^2$ в проекции на плоскость, перпендикулярную оси счетчика. Объем детектора просматривается 32-мя ФЭУ-125 с диаметром катода 140 мм, дополненными светосборниками Винстона. Рядом с делителем ф.э.у. расположен быстрый преусилитель. Сигнал с преусилителя по коаксиальному кабелю поступает через линию задержки на а.ц.п., с которого считывается крейт-контроллером в локальную э.в.м.

Заполненный фреоном при атмосферном давлении и температуре 20°C детектор обеспечивает идентификацию π -мезонов в интервале импульсов от 6 до 21 ГэВ/с с эффективностью 98%, что позволяет в 50% случаев надежно разделить D^0 и \bar{D}^0 -мезоны, зарегистрированные в спектрометре.

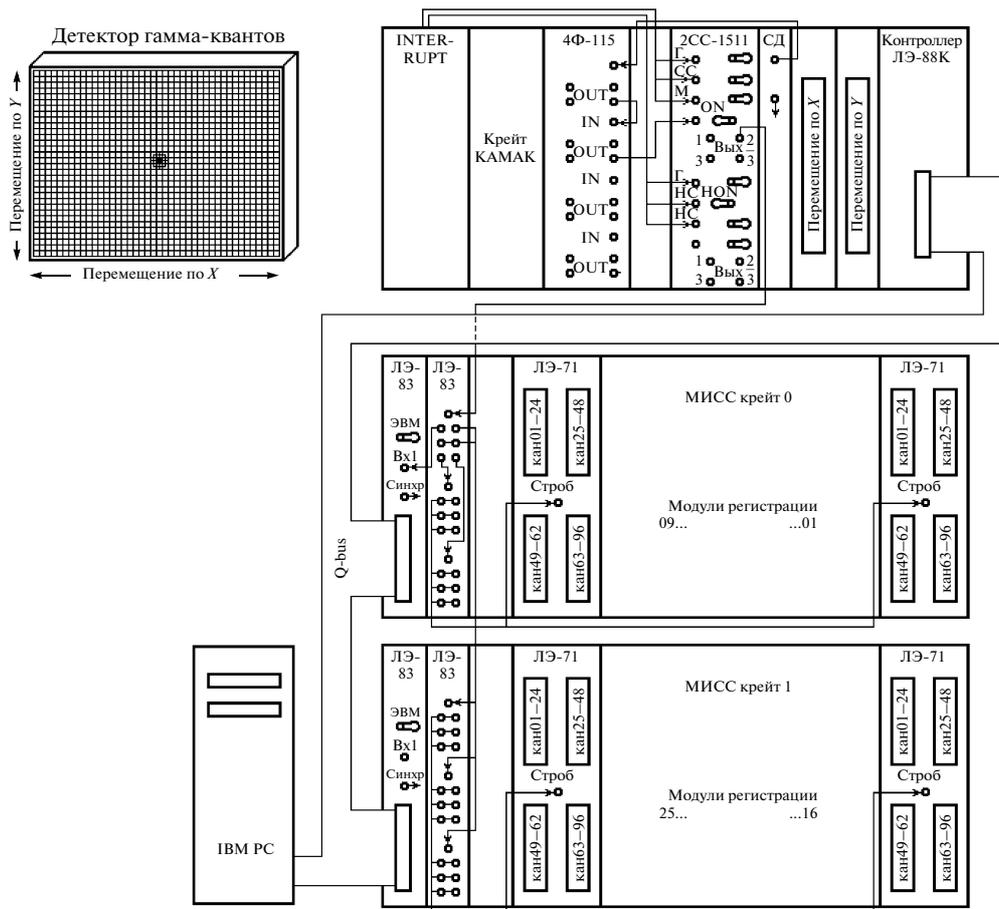


Рис. 9. Состав аппаратуры регистрации сигналов с детектора γ -квантов.

Сцинтилляционный годоскоп

Сцинтилляционный годоскоп размещен на подвижной платформе γ -детектора на расстоянии ~ 8.3 м от мишени и состоит из двух плоскостей сцинтилляционных детекторов (H_L и H_V), направленных вертикально и горизонтально. В горизонтальной плоскости расположены 12 детекторов со сцинтилляторами, изготовленными методом экструзии с термопластической формовкой световода на конце. Размер рабочего поля сцинтиллятора детектора 200×2400 мм при толщине 10 мм. В вертикальной плоскости расположены 12 детекторов с размером рабочего поля сцинтиллятора 200×1400 мм.

Конструктивно детекторы годоскопа полностью автономны и светоизолированы, каждый детектор оснащен фотоумножителем ФЭУ-110 с высокоточным делителем и имеет мониторинговую систему из драйвера и световода. Годоскоп смонтирован на раме, закрепленной на ферме γ -детектора.

Электроника регистрации сигналов со сцинтилляционного годоскопа содержит 36 формирователей сигналов, 36 каналов стролируемых реги-

стров, а логика отбора включает в себя 5 многоходовых схем совпадений.

Детектор γ -квантов

Для регистрации π^0 -мезонов и γ -квантов от распада очарованных частиц используется годоскопический детектор γ -квантов (ДЕГА) с радиаторами из свинцового стекла, расположенный на расстоянии ~ 8.9 м от активной мишени. ДЕГА состоит из $32 \cdot 48 - 4 = 1532$ (раньше $32 \cdot 42 - 4 = 1340$) черенковских счетчиков полного поглощения с поперечным размером стекол 38×38 мм² и длиной 505 мм, оснащенных ФЭУ-84-3. Общая поперечная площадь детектора $\sim 1.9 \times 1.3$ м² (раньше $\sim 1.6 \times 1.3$ м²). Конструктивно ДЕГА выполнен в виде автономного детектора и установлен на расстоянии 3 м за магнитом МС-7 на платформе, обеспечивающей дистанционно управляемое перемещение по двум поперечным к пучку координатам. ДЕГА обеспечивает регистрацию γ -квантов в интервале импульсов от 300 МэВ/с до 20 ГэВ/с с координатной точностью 2–3 мм. Геометрическая эффективность регистрации одиноч-

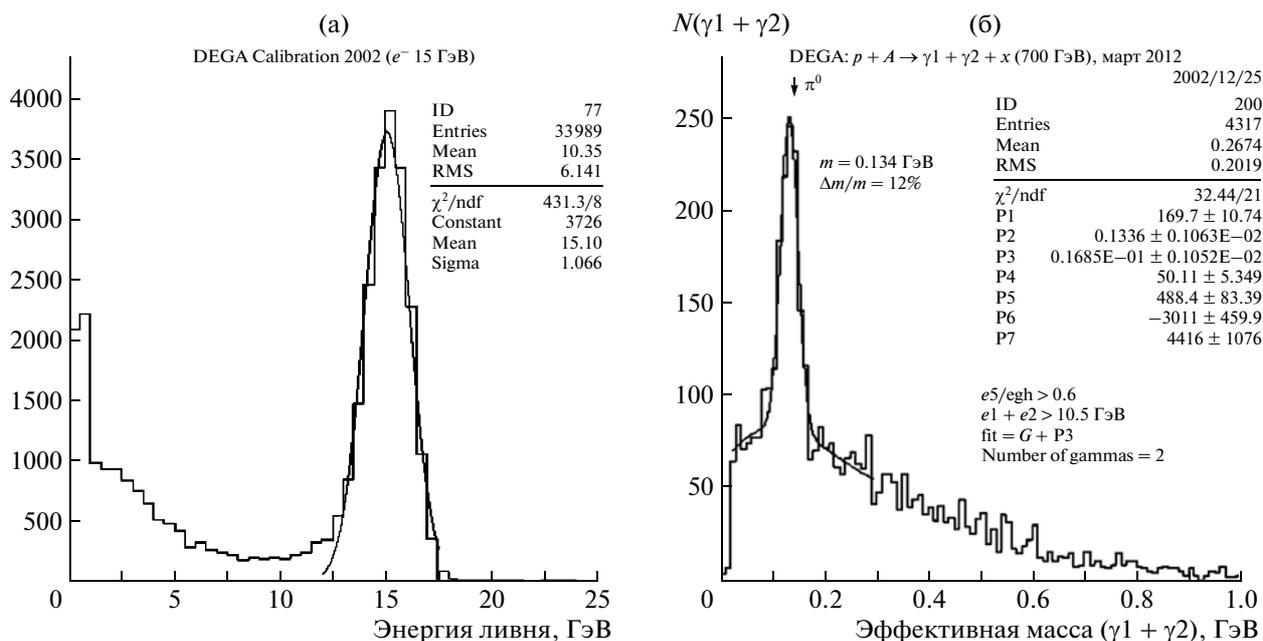


Рис. 10. Суммарный сигнал электронной лавины в ДЕГА при энергии электронов 15 ГэВ (а); спектр эффективных масс двух ливней при требовании, чтобы их суммарная энергия была >10 ГэВ (б).

ных π^0 -мезонов от распада Δ_c^+ и D, вылетающих в системе центра масс в переднюю полусферу, находится в диапазоне от 20 до 30%.

Электроника регистрации для ДЕГА. Первоначально в электронике ДЕГА использовались заряд-цифровые преобразователи фирмы Le Croy типа 2282 [41]. В настоящее время (для эксперимента E-190, см. ниже проект “Термализация”) электроника обновлена и построена на основе 96-канальных заряд-цифровых преобразователей QDC-96, входящих в систему МИСС [42] разработки ИФВЭ.

На рис. 9 показаны в схематическом виде детектор γ -квантов (масштаб $\sim 1:100$) и его электронная аппаратура. Аппаратура содержит 2 крейта МИСС для регистрации сигналов с ф.э.у. и 1 крейт КАМАК для выработки сигнала “Строб” на заряд-цифровые преобразователи и синхронизации работы с остальными частями установки [43]. В состав крейтов МИСС входят следующие модули:

- 96-канальные модули ЛЭ-71 регистрации сигналов;
- крейт-контроллеры ЛЭ-83, выходящие на магистраль Q-bus, связывающую их с компьютером IBM PC;
- стандартные МИСС-разветвители логических (NIM) сигналов ЛЭ-67.

Для калибровки ДЕГА облучался узким ($\varnothing 3$ мм) пучком электронов ($E = 15$ ГэВ), который последовательно засвечивал центр каждого счетчика. Управление системой передвижения по поперечным координатам X и Y осуществляется двумя модулями КАМАК (находятся в верхнем крейте, см. рис. 9).

С помощью коэффициентов выравнивания был получен суммарный сигнал электронной лавины в ДЕГА при энергии электронов 15 ГэВ (рис. 10а). Можно сделать заключение, что энергетическое разрешение ДЕГА составляет 1/15 (6.7%). Был выделен также сигнал от нейтральных пионов при облучении спектрометра с вершинным детектором пучком протонов 70 ГэВ. На рис. 10б показан спектр эффективных масс двух ливней при требовании, чтобы их суммарная энергия была >10 ГэВ.

СИСТЕМЫ ЗАПУСКА И СИНХРОНИЗАЦИИ УСТАНОВКИ СВД-2 В ЭКСПЕРИМЕНТЕ E-184

Система запуска в эксперименте E-184

Для проведения эксперимента E-184 был выбран триггер, выделяющий взаимодействия в активной мишени и основанный на быстрой оценке амплитуд сигналов с МКД активной мишени [44]. Такая оценка позволяет также определить Z-координату взаимодействия. Активная мишень, используемая в установке, была выполнена из пяти кремниевых пластин размером 8×8 мм и толщиной 300 мкм, сегментированных на восемь полосок (стрипов) шириной 1 мм. Детекторы мишени имели небольшой (менее 1 мкА) темновой ток и были сгруппированы по напряжению полного обеднения, которое составляло ~ 50 В. Напряжение пробоя детекторов мишени превышало 200 В [43]. Между вторым и третьим слоями мишени была установлена свинцовая фольга толщиной

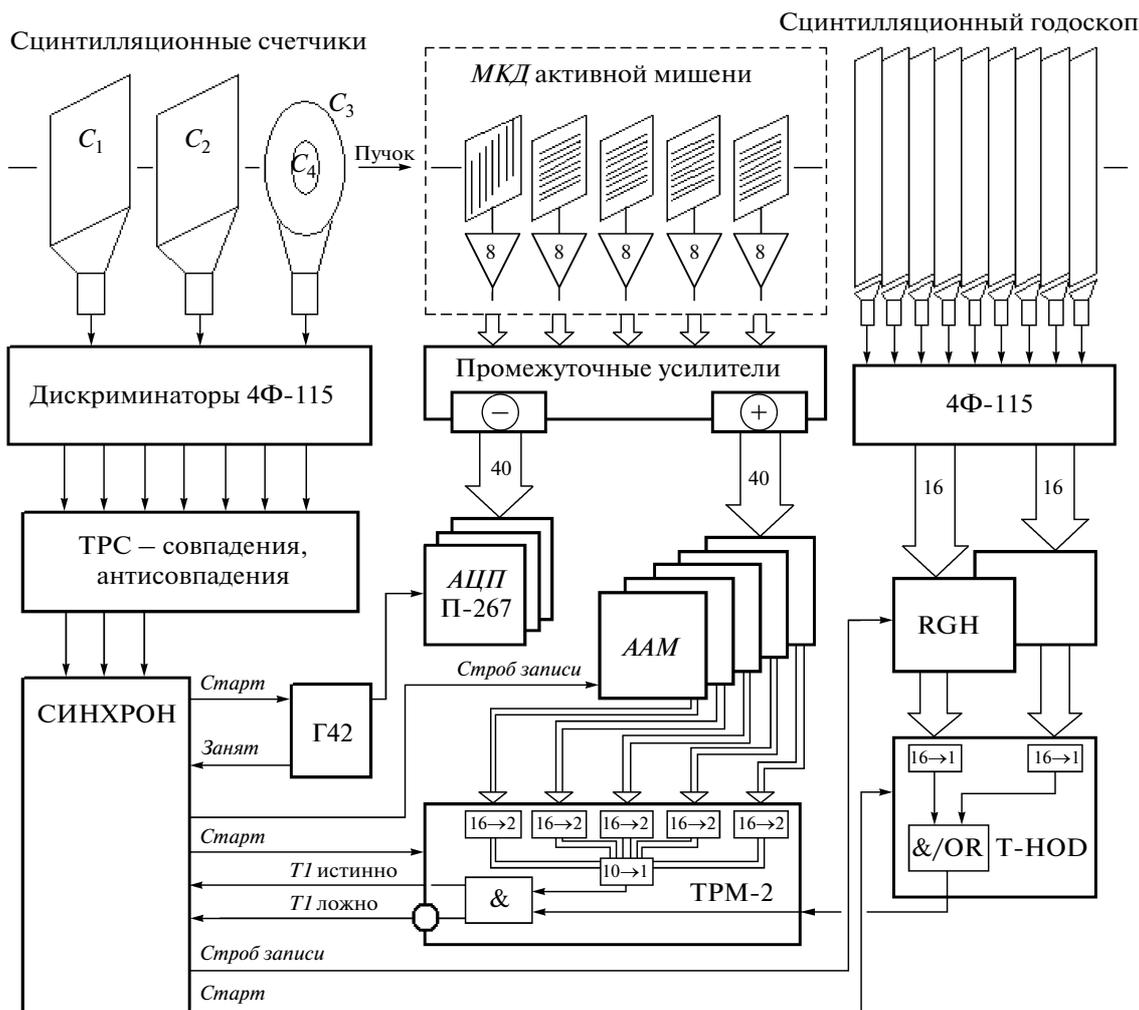


Рис. 11. Функциональная схема системы запуска установки.

240 мкм, а между третьим и четвертым слоями — пластинка углерода толщиной 520 мкм. Шаг установки всех плоскостей мишени составлял 4 мм по пучку. Детекторы активной мишени, как и все МКД установки, были изготовлены в НИИМВ (г. Зеленоград) и прошли сертификацию на комплексе тестирующей аппаратуры измерения параметров МКД [45, 46].

Как показали расчеты, проведенные в [47], если вторичные частицы регистрировать в полосах сцинтилляционного годоскопа, расположенных на некотором удалении от оси пучка, то можно обеспечить быстрый отбор событий, имеющих вторичные частицы с большим p_T . Это позволяет выделить события с (c, \bar{n}) -парами уже на первом уровне запуска установки.

Для запуска локальной системы Spectro сигнал триггера должен поступить в нее не позже 700 нс от момента прохождения пучковой частицы. Для запуска локальной системы Vertex, основными эле-

ментами системы регистрации которой являются усилители Gassiplex, триггерный сигнал должен приходиться через 400–500 нс относительно взаимодействия в активной мишени. Время от момента прохождения частицы через активную мишень до прихода триггерного сигнала в локальную систему ДЕГА не должно превышать 400 нс. Это самое критичное из условий работы системы запуска.

Электроника системы запуска

Функциональная схема системы запуска установки приведена на рис. 11. Ниже описаны модули, входящие в ее состав.

Анализатор активной мишени (ААМ) предназначен для усиления и амплитудной дискриминации сигналов, поступающих с промежуточных усилителей АМ. Модуль содержит 8 каналов амплитудной дискриминации, 6 цифроаналоговых преобразователей (ЦАП) для задания порогов и 8 ЦАП для сдвига базовой линии и тестирования

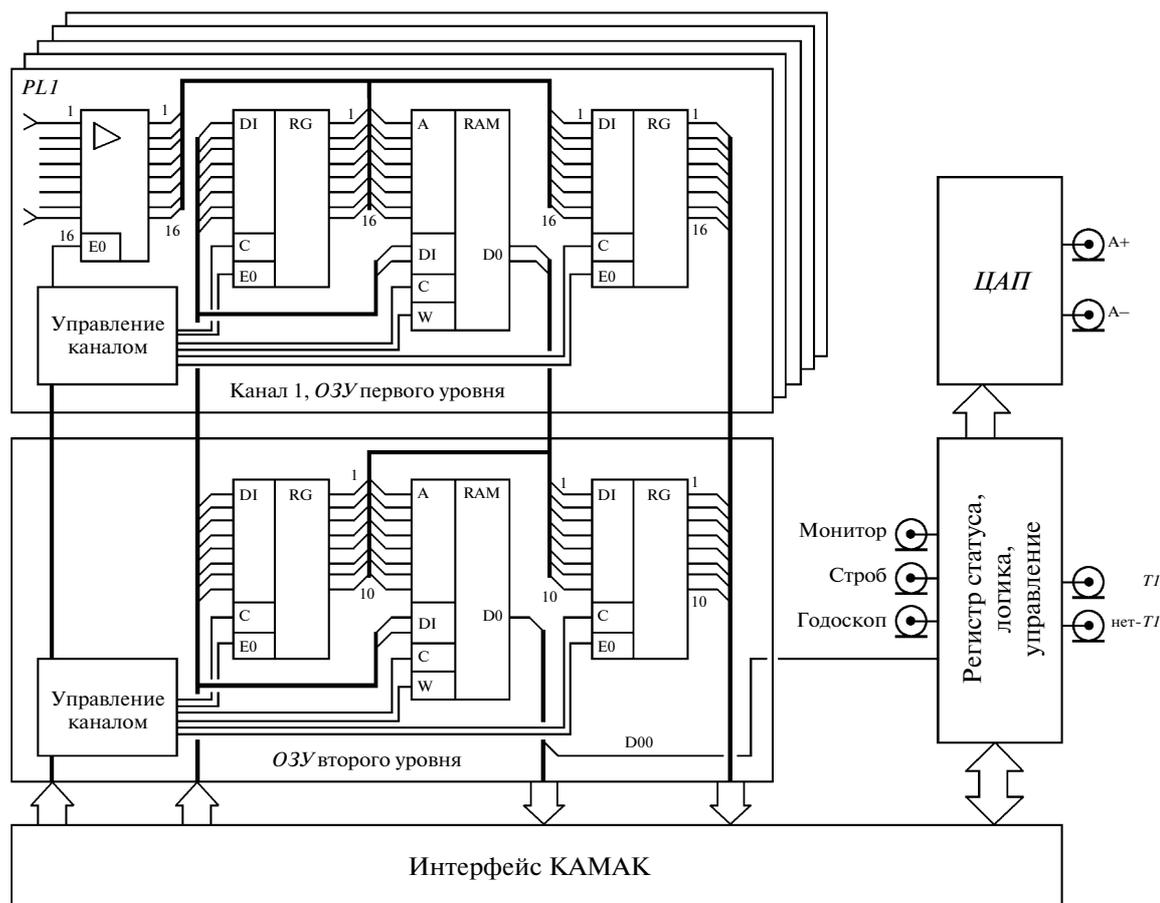


Рис. 12. Функциональная схема модуля ТРМ-2. *PL* – программируемая логика.

модуля. Последние восемь *ЦАП* являются индивидуальными для каждого входа.

На вход каждого канала поступают сигналы положительной полярности, которые без усиления и без инверсии подаются на входы трех компараторов, задающих 3 уровня дискриминации по амплитуде. На вторые входы компараторов приходят пороговые напряжения с микросхем *ЦАП*. Пороговые *ЦАП* сгруппированы так, что один *ЦАП* обслуживает один из трех порогов для четырех из восьми каналов. В случае превышения порога на выходе компаратора возникает положительный перепад напряжения, который заряжает емкость, задающую время задержки ~100 нс. Это сделано для случая, когда входные сигналы приходят несколько раньше триггерного сигнала.

Через 20 нс после прихода триггерного сигнала данные с компараторов поступают в приоритетные шифраторы и записываются в регистры выходных данных. Через 40 нс после прихода триггерного сигнала данные готовы и будут присутствовать на выходе модуля в течение 200 нс. Результатом работы модуля является 16-разряд-

ное слово, по 2 разряда на канал, содержащее код амплитуды.

Модуль *RGH* (регистр годоскопа) представляет собой 16-разрядный модуль, предназначенный для регистрации сигналов со сцинтилляционного годоскопа и подготовки данных для работы модуля *T-HOD* (триггер годоскопа). Модуль *RGH* использован также в системе регистрации черенковского детектора. Модуль имеет 16-канальный вход, шлейфовый вход строба записи, шлейфовый вход быстрого сброса и 16-канальный инверсный выход. Запись по строб-импульсу с передней панели организована так, что и фронт, и уровень сигнала со входа будут записаны в регистр на всей протяженности строба записи. Данные на выходе модуля не стробируются. Для тестирования триггерной электроники имеется возможность записи данных в регистр с магистрали *KAMAK*.

Модуль *TRM-2* (триггер мишени) предназначен для принятия решения о наличии неупругого взаимодействия первичной частицы в пяти активных сегментированных плоскостях и двух пассивных плоскостях мишени. Функциональная схема модуля показана на рис. 12.

Модуль организован как двухуровневое *ОЗУ* с произвольным доступом, в котором данные выхода первого уровня являются адресом для второго. Использована интегральная микросхема (и.м.с.) *СУ7С192-25* статической памяти с 16-ю адресными входами и четырьмя отдельными входами/выходами данных. Работа модуля начинается по приходу стартового сигнала с передней панели. Фронт сигнала устанавливает триггер пуска, формируя внутренний сигнал доступа к *ОЗУ*. Этот сигнал поступает на разрешающие входы входных буферов, а также на входы “Выбор корпуса” *ОЗУ*.

Данные с пяти 16-разрядных входов поступают на адресные входы *ОЗУ* первого уровня, работающие по схеме $16 \rightarrow 2$ (вырабатывают 2-разрядное слово выходных данных на основе 16-разрядного входного адреса), а данные с их выходов — на адресные входы *ОЗУ* второго уровня, работающего по схеме $10 \rightarrow 1$. Данные с выхода *ОЗУ* второго уровня поступают на схему совпадения, куда приходят сигналы состояния сцинтилляционного годоскопа. Все эти сигналы фиксируются в статусном регистре по срезу сигнала триггера пуска. Сигнал с выхода схемы совпадений формируется по длительности (50 нс) и поступает на выходы модуля. Полная задержка модуля на выдачу сигнала триггера первого уровня не превышает 100 нс. В модуль встроены 8-разрядный *ЦАП*, предназначенный для сквозного тестирования *ААМ*, *АЦП* и *ТРМ-2*.

Модуль Т-НОД (триггер годоскопа) предназначен для принятия решения о наличии вторичных частиц в сцинтилляционном годоскопе и может преобразовать в таблицу любую комбинацию входных разрядов. Схема модуля более простая по сравнению с модулем *ТРМ-2* и представляет собой два одноуровневых *ОЗУ*, работающих по схеме $16 \rightarrow 1$, выходные сигналы которых могут выдаваться отдельно на переднюю панель, либо объединяться по логическому *И/ИЛИ*. Использована та же и.м.с. *СУ7С192-25* статической памяти. Модуль имеет два 16-разрядных входа адреса, входы начала преобразования и “защелкивания” результата, а также выходы готового решения.

Логика работы системы запуска. Сигналы со сцинтилляционных детекторов (см. рис. 11) формируются по амплитуде и длительности и подаются в модуль совпадений-антисовпадений *ТРС*. Его выходной импульс поступает в модуль *СИНХРОН-2*, который вырабатывает сигнал, служащий строб-сигналом для модулей *ААМ* и *RGH* и стартовым сигналом для работы модулей *ТРМ-2* и *Т-НОД*. Параллельно сигналы со сцинтилляционного годоскопа формируются по длительности и записываются в регистры модуля *RGH*. Сигналы с 16-разрядных выходов модуля *RGH* поступают на входы модуля *Т-НОД*, где осуществляется одноуровневое табличное преобразование. Выходной сигнал модуля *Т-НОД*, поступающий на

вход модуля *ТРМ*, может быть выработан на основе *любой* комбинации входных сигналов.

Для выработки сигнала запуска *Т1* сигналы с сегментов детекторов мишени усиливаются быстрыми малошумящими усилителями и подаются по коаксиальным кабелям в две группы модулей. Три модуля первой группы — *АЦП* — имеют по 16 каналов 12-разрядного аналого-цифрового преобразования. Пять модулей второй группы — *ААМ* — имеют по 8 каналов трехуровневой дискриминации.

Параллельно данные анализируются модулями *ААМ*, каждый канал которых содержит усилитель, три компаратора, приоритетный шифратор и вырабатывает двухразрядное слово — так называемый статус канала. Результатом работы каждого модуля *ААМ* является 16-разрядное слово, содержащее информацию о восьми каналах амплитудного анализа и поступающее на выход с передней панели модуля.

Двухразрядный статус каждой пластины вырабатывается модулем *ТРМ-2* в *ОЗУ* первого уровня на основе данных о статусе каждого канала:

- 00 — нет частицы (все сегменты 00),
- 01 — одна частица (все сегменты 00, а один 01),
- 10 — две частицы (есть один сегмент с кодом 10 или два сегмента с кодами 01),
- 11 — три частицы (есть один сегмент с кодом 11, либо есть один сегмент с кодом 10, а другой — с кодом 01, либо есть два сегмента с кодами 10, либо есть три сегмента с кодами 01).

Статус мишени вырабатывается в *ОЗУ* второго уровня на основе статуса каждой пластины. Сигналы статуса мишени и состояния годоскопа определяют состояние выхода модуля *ТРМ-2*: *Т1* — истинно или *Т1* — ложно.

Основная статистика была набрана при триггере, требующем наличия трех и более частиц в любой из пяти плоскостей активной мишени и двух и более частиц в следующей за ней плоскости, при требовании наличия срабатывания в двух пластинах сцинтилляционного годоскопа. Модули *ААМ* имели динамический диапазон, соответствующий пяти частицам. Пороги *ААМ* настроены на одну, две и три частицы соответственно. События с вершиной в сцинтилляторе S_4 фильтруются вследствие применения аналогового *ВЕТО* на сигнал с этого сцинтиллятора. Таблицы, записываемые в модули *ТРМ-2* и *Т-НОД* в виде текстовых файлов, содержащих построчно адрес и записываемое данное, составлялись при помощи пакета *LabView 4.0*. Таблицы заносились в память модулей однократно при старте основной программы сбора данных. Время принятия решения от момента поступления сигнала на вход модуля *СИНХРОН* до выдачи сигнала триггера с выхода модуля *ТРМ-2* составляло 200 нс. Задержка сигнала от момента прохождения частицы через мишень до появления сигнала триггера в ло-

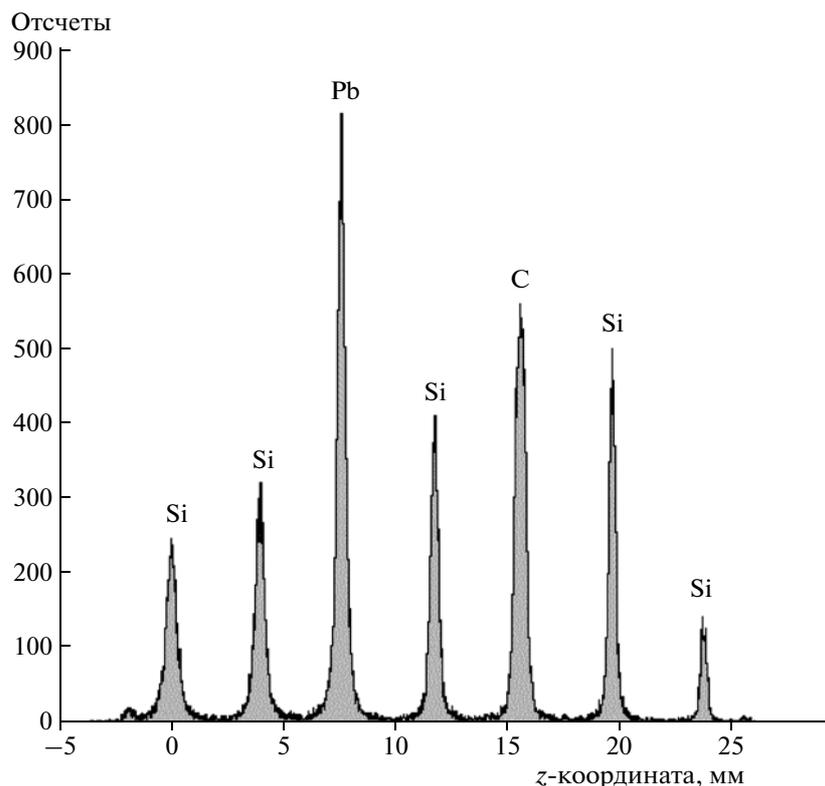


Рис. 13. Пространственное распределение вершин взаимодействия вдоль оси Z в активной мишени.

кальной системе ДЕГА не превышала 350 нс, что обеспечивало синхронную работу γ -детектора.

На рис. 13 показано пространственное распределение вдоль оси Z вершин взаимодействия, полученное с помощью треков, восстановленных в прецизионном вершинном детекторе. Явно видны взаимодействия как в кремнии, так и в пассивных углероде и свинце в соответствии с количеством вещества в этих слоях.

Система синхронизации СВД-2

Система синхронизации необходима для обеспечения согласованной работы всех остальных систем установки. Ее функциональная схема показана на рис. 14. Система включает в себя модули ТРС, СИНХРОН, INTERRUPT, БЭЗ-182 и РАЗВЕТВИТЕЛЬ. Ниже кратко приведены назначение и функциональные особенности каждого модуля.

Модуль ТРС предназначен для обработки сигналов, поступающих со сцинтилляционных детекторов первичного запуска, и имеет два тракта — совпадений и антисовпадений. Тракт антисовпадений реализован на и.м.с. К500ТМ131. В целях уменьшения влияния шумов детекторов, включенных в тракт антисовпадения, входы модуля, отвечающие за эти детекторы, стробируются сигналом с входа C_1 . Для выходных сигналов первичного запуска “ $TI.I$ ” и “ TRS ” задержка сигнала в

модуле составляет 16 нс, что обусловлено применением внутренней кабельной задержки 6 нс. Важной составной частью модуля является 8-разрядный регистр флагов триггера, позволяющий выдавать на выходы сигналы совпадений сцинтилляционных детекторов, одну из частот встроенного в модуль генератора, сигнал программно-го запуска установки либо пропускать на выход сигнал с одного из резервных входов.

Сцинтилляционные детекторы C_3 и C_4 устанавливаются на фланце кожуха, закрывающего МКД активной мишени и трековой части вершинного детектора, что обеспечивает их надежную геометрическую привязку. Сигнал с выхода анода ф.э.у. в C_4 подавался на вход двух формирователей. Порог первого формирователя был установлен так, чтобы обеспечить регистрацию одной частицы, порог второго поднят относительно первого с целью выделения взаимодействия в самом пластике. Выход второго формирователя включался в тракт антисовпадений модуля ТРС.

В целях снижения влияния рассеянного магнитного поля на работу ф.э.у. сцинтилляционных детекторов на кожух каждого ф.э.у. устанавливались компенсационные катушки.

Модуль СИНХРОН, находящийся в центральном крейте локальной системы Trigger, предназначен для:

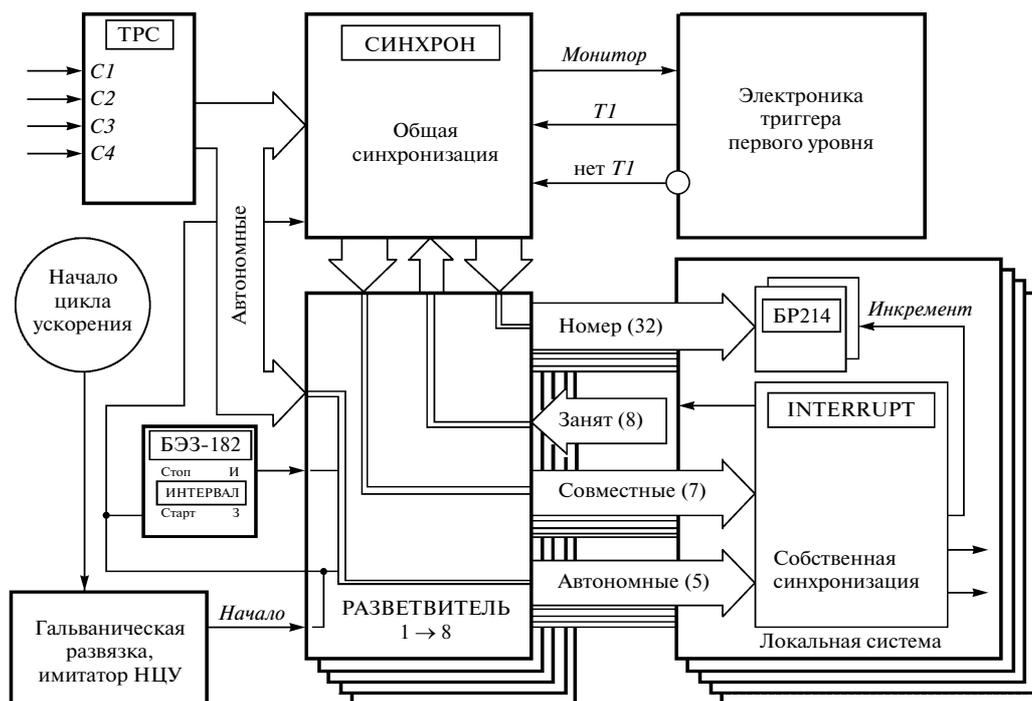


Рис. 14. Функциональная схема системы синхронизации установки.

- приема и передачи в остальные локальные системы сигналов синхронизации;
- запуска системы сбора данных активной мишени, сцинтилляционного годоскопа и черенковского детектора;
- формирования 32-разрядного аппаратного кода номера события, а также для организации запросов на обслуживание в локальной системе Trigger.

Счетчик номера события инкрементируется срезом импульса сигнала “Инкремент”. Модуль принимает NIM-сигнал “Начало” и сигналы C12, C3 и T1.1, поступающие от модуля ТРС, сигналы блокировок от всех локальных систем установки и служит для организации запросов на обслуживание в локальной системе Trigger. Модуль имеет следующие регистры: регистр маски запросов, регистр состояния запросов, регистр маски блокировок и 32-разрядный счетчик номера событий. При поступлении сигнала совпадения срабатываний сцинтилляционных детекторов на вход модуля устанавливается внутренняя блокировка, которая может быть снята либо программно после передачи данных в э.в.м., либо аппаратно, если сигнал триггера первого уровня ложный. Задержка модуля по сигналу “Монитор” составляет 40 нс.

Модуль INTERRUPT выполняет функции, аналогичные модулю СИНХРОН, в каждой локальной системе. Модуль INTERRUPT предназначен для приема и передачи сигналов синхронизации и запуска систем сбора данных, а также для органи-

зации запросов на обслуживание в локальные э.в.м. и для выставления сигнала блокировки, передаваемого в локальную систему Trigger. Модуль имеет возможность выполнять индивидуальные операции, характерные для данной локальной системы, и может находиться в одном из двух состояний – автономном или совместном. В зависимости от состояния модуль принимает сигналы от одной из двух групп. Автономный режим используется при отладках систем регистрации по отдельности, совместный – при наборе статистики в составе всей установки. Задержка модуля по сигналу “Монитор” составляет 30 нс.

Модуль БЭЗ-182 может быть использован как блок задержки в диапазоне 10^{-7} – 10^2 с, как 10-разрядный счетчик с предустановкой или как генератор серии “меандр” в трех диапазонах (микросекундном, миллисекундном и секундном). В любом из трех диапазонов множитель задержки (или периода) изменяется от 0.1 до 100. На передней панели модуля имеются: стартовый вход, вход принудительного сброса, выход задержанного импульса и два выхода интервала. Все входы и выходы – в уровнях NIM. Модуль не управляется по магистрали КАМАК. В системе синхронизации он используется для организации различных временных ворот, а также для мониторинга параметров пучка.

Более подробно модули системы синхронизации описаны в [48].

Последовательность работы системы синхронизации. Предположим, что система работает по сигналу первичного запуска от сцинтилляционных детекторов, локальные системы Trigger, Vertex и Spectro работают в режиме полной синхронизации, а локальная система ДЕГА – в режиме частичной синхронизации, т.е. принимает не каждое событие. Счетчик событий в этом случае равен нулю.

Модуль СИНХРОН в локальной системе Trigger принимает сигнал “Н” (начало) и раздает синхронизированный сигнал “НС” во все локальные системы. При этом в каждой локальной регистрирующей системе аппаратно взводится блокировка, а в локальную систему Trigger поступают сигналы “Занято”. Локальные э.в.м. каждой системы обрабатывают сигнал “НС”, снимая блокировку после обработки.

Модуль СИНХРОН в локальной системе Trigger принимает сигнал “СС” или “Т1.1” и через 40 нс выдает синхронизированный сигнал “Монитор” для запуска электроники триггера первого уровня Т1. По сигналам “Монитор” или “Т1” в модуле СИНХРОН вырабатывается сигнал “Инкремент”, который передается во все локальные системы. При этом в каждой локальной регистрирующей системе аппаратно взводится блокировка, которая передается в локальную систему Trigger. По фронту сигнала “Инкремент” записываются в 32-разрядные регистры номера событий в каждой локальной системе. 32-разрядный счетчик событий в модуле СИНХРОН инкрементируется по срезу импульса сигнала “Инкремент”. Заметим, что сигнал “Инкремент” может иметь разную задержку относительно прохождения частицы в зависимости от типа триггера установки.

Если локальная система ДЕГА, работающая в режиме частичной синхронизации, не успела обработать сигнал “Начало”, то она не принимает событие с номером ноль. Но сигнал “Инкремент” все равно сделает запись в регистр номера событий.

Для локальной э.в.м. обработка события заключается в следующей последовательности действий:

- 1) получение и обработка запроса из центрального крейта;
- 2) опрос регистра номера событий;
- 3) опрос крейтов и запись данных на жесткий или виртуальный диск;
- 4) программное снятие блокировки.

В паузах между сбросами ускорителя центральная э.в.м. Коллектор принимает по сети Ethernet данные от каждой локальной системы, сшивая их по номеру события, и освобождает место на дисках локальных э.в.м. В это время вся установка заблокирована для приема следующих событий.

Модуль СИНХРОН и модули INTERRUPT в локальных системах препятствуют прохождению “резаных” сигналов. В период отладки система

синхронизации обеспечивает возможность независимой работы для каждой локальной системы.

ПРОЕКТ “ТЕРМАЛИЗАЦИЯ” НА УСТАНОВКЕ СВД-2, ЭКСПЕРИМЕНТ E-190

Множественное образование частиц при высокой энергии является одной из фундаментальных проблем физики адронов. Этот процесс не может быть описан в теории сильных взаимодействий, поскольку эта теория дает только качественную картину явления: столкновение адронов инициирует партонный каскад. На конечном этапе партонного каскада, когда энергия относительного движения партонов исчерпана и существенными становятся силы конфайнмента, партоны объединяются, образуя адроны. Механизм удержания цвета (конфайнмент) неизвестен. Поэтому в настоящее время теоретически невозможно рассчитать основные характеристики множественного образования: распределение по множественности, энергетический и массовый спектры частиц.

Цель проекта “Термализация” на установке СВД-2 [44], предложенного в 2004 г. и получившего номер SERP-E-190, состоит в исследовании коллективного поведения частиц в процессе множественного образования в *pp*-взаимодействиях при энергии пучка протонов $E = 50\text{--}70$ ГэВ. В 70-х годах в экспериментах на пузырьковой камере Mirabelle было измерено распределение частиц по множественности при энергии пучка протонов $E = 50$ ГэВ до числа заряженных частиц $n_{ch} = 16$ [49]. Среднее число заряженных частиц составляет $\bar{n}_{ch} = 5.45$, кинематический предел – $n_{\pi} = 58$ (здесь n_{π} есть сумма числа заряженных и нейтральных пионов). Планировалось исследовать события с полной множественностью $n = 20\text{--}40$. В этой области значительная часть энергии в системе центра масс превращается в массу вторичных частиц.

Для адаптации установки СВД-2 к задачам проекта она была дополнена следующими подсистемами:

- жидководородной мишенью;
- дополнительной трековой системой на базе дрейфовых трубок;
- специальным триггерным годоскопом для отбора событий с большой множественностью.

Схема головной части модифицированной установки приведена на рис. 15.

Жидководородная мишень

Жидководородная мишень устанавливается на место активной мишени в вершинной части установки. Она имеет диаметр 27 мм, длину 70 мм, рабочий объем, заполняемый жидким водородом, 37 мм³. Внутренний сосуд мишени изготовлен из лавсана толщиной 100 мкм. Подробно конструк-

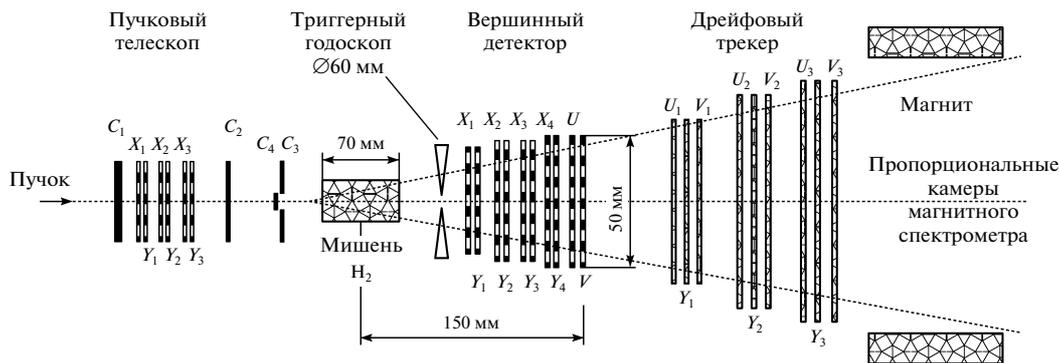


Рис. 15. Схема головной части установки для проекта “Термализация”.

ция мишени и ее термодинамические характеристики описаны в [50].

Трековая система

Трековая система построена на базе 2304 дрейфовых трубок (straw tubes), дополняет кремниевый вершинный детектор и позволяет надежно восстанавливать многочастичные события и “продолжать” треки в магнитный спектрометр. Система состоит из трех модулей размером $480 \times 483, 700 \times 771$ и 900×1059 мм (ширина \times высота). Размеры выбраны из условия соответствия угловому аксептансу кремниевого вершинного детектора и передней части магнитного спектрометра. Каждый модуль состоит из трех камер, измеряющих координаты частиц X, U, V . Камеры каждого модуля идентичны, но U - и V -детекторы повернуты относительно оси Y на углы $\pm 10.5^\circ$. Модули распределены по пучку на базе 950 мм. Камеры каждого модуля сдвинуты по пучку друг относительно друга на 100 мм. Каждая камера содержит два слоя тонкостенных дрейфовых трубок. Диаметр трубок $d = 6$ мм. Для устранения левосторонней неопределенности при измерении координат частиц трубки первого слоя сдвинуты относительно трубок второго слоя на величину радиуса $d/2$. Толщина стенок трубок (катодов) ~ 70 мкм. Информация считывается с анодных проволок диаметром 30 мкм. Каждая проволочка (трубка) является независимым каналом регистрации. Центральная зона размером 10×10 мм каждой камеры нечувствительна к пучковым частицам. Точность измерения координаты по времени дрейфа 150 мкм. Двухтрековое разрешение составляет ~ 1.5 мм. Расстояние между модулями ~ 150 мм. Первый модуль расположен на расстоянии 50 см от мишени.

Электроника дрейфовых трубок. Дрейфовые трубки имеют полное время дрейфа ~ 60 нс. Модули времяцифрового преобразования, разработанные для этих детекторов, имеют цену деления, равную 2 нс, что позволяет получать координатное разрешение на уровне 0.15 мм.

В основу 32-канальных усилителей-формирователей для съема сигналов с дрейфовых трубок [51] была положена разработка [52]. Аппаратура регистрации сигналов с усилителей-формирователей содержит 2 крейта регистрации МИСС [42] для сигналов с дрейфовых трубок и 1 крейт КАМАК для синхронизации системной работы [25] (рис. 16). В состав крейтов МИСС входят следующие модули:

- 64-канальные модули ЛЭ-82 многоканального времяцифрового преобразования (до 5 “стартов” в каждом канале, “стоп” – общий), цена деления канала 2 нс;
- крейт-контроллеры ЛЭ-83, выходящие на магистраль Q-bus, связывающую их с компьютером типа IBM PC;
- специализированные модули управления-разветвления сигналов ЛЭ-87р;
- стандартные МИСС-разветвители логических (NIM) сигналов ЛЭ-67.

В каждом событии считывается ~ 150 слов. За одну секунду вывода пучка из ускорителя имеется возможность приема данных от ~ 1000 событий.

Триггерный годоскоп

Работа подсистемы запуска в эксперименте E-190 подробно описана в [53]. Сигнал о появлении события с множественностью выше заданного порога получается из анализа амплитуд сигналов триггерного сцинтилляционного годоскопа. Амплитуды анализируются блоками ААМ. Триггерный годоскоп (рис. 17) выполнен в форме ромашки с девятнадцатью лепестками – сцинтилляторами, расположенными по окружности диска диаметром 260 мм. Диск имеет отверстие в центре диаметром 3.2 мм для пропускания пучка. Сцинтиллятор ВС-408 (I) имеет форму усеченной треугольной пластины высотой 28 мм и основанием 8.6 мм. Толщина пластины 1.8 мм. Она обернута алюминированным лавсаном толщиной 6 мкм для улучшения светосбора. Световод из органического стекла соединен с лепестком и входным

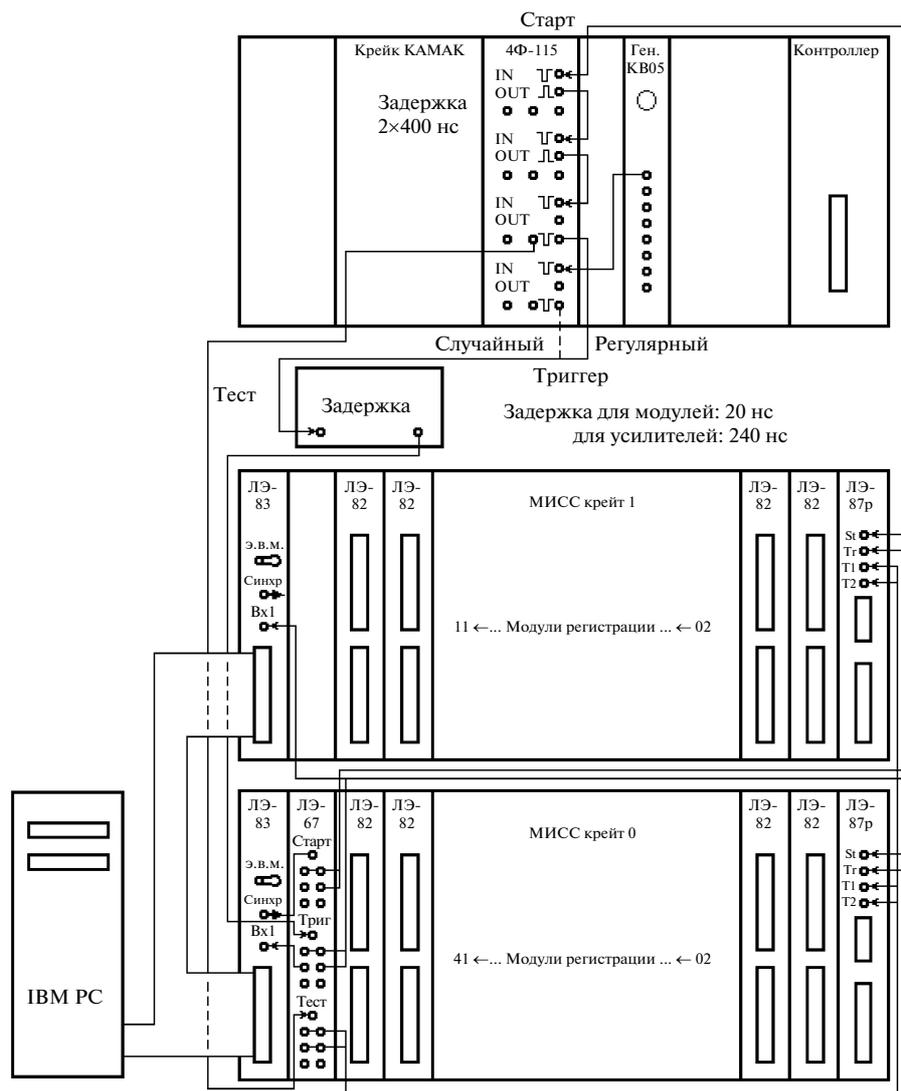


Рис. 16. Состав аппаратуры регистрации сигналов с дрейфовых трубок и межмодульные соединения.

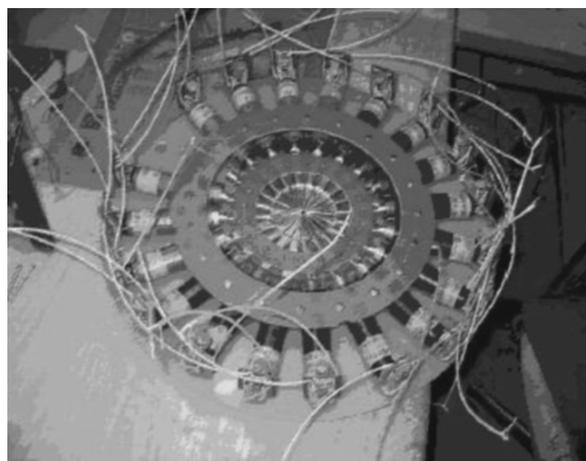
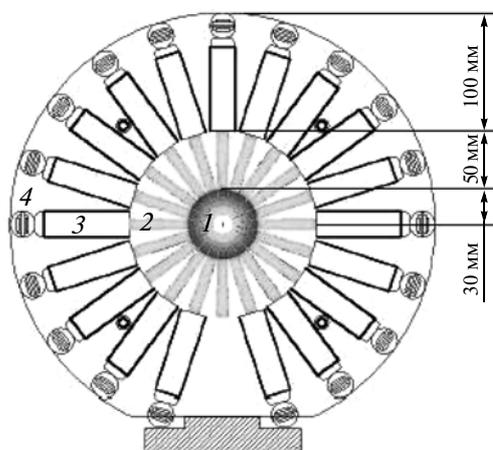


Рис. 17. а – схема триггерного годоскопа: 1 – сцинтилятор, 2 – световод, 3 – ф.э.у., 4 – делитель ф.э.у.; б – триггерный годоскоп в процессе монтажа.

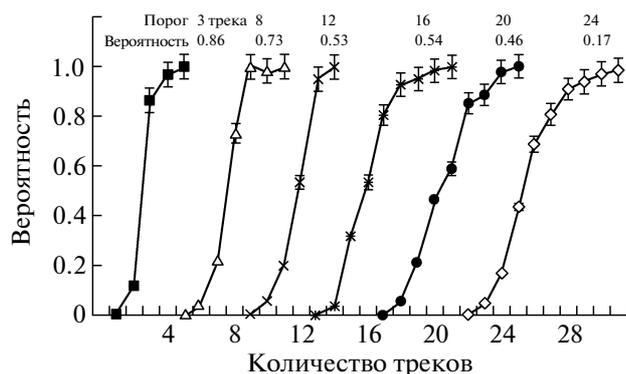


Рис. 18. Вероятность срабатывания триггера от числа треков в годоскопе.

окном ФЭУ-147-2 оптической эпоксидной смолы ЕРО301. Защита каждого ф.э.у. 3 от внешнего магнитного поля (~ 50 Гс) осуществляется слоем мю-металла толщиной 0.3 мм; фактор ослабления поля равен ~ 100 .

При интенсивности пучка протонов $2 \cdot 10^6$ с $^{-1}$ загрузка одного лепестка заряженными частицами, идущими из мишени, составляет $\sim 10^3$ с $^{-1}$. Основная загрузка элемента триггера фоновыми частицами обусловлена гало пучка и при оптимальной юстировке пучка составляет $2 \cdot 10^4$ с $^{-1}$. При среднем токе анода ф.э.у., равном 0.1 мА, и использовании сильноточного делителя допустимая загрузка элемента триггера составляет 10^6 с $^{-1}$. Сопротивление делителя ф.э.у. 4.2 МОм, средний ток 0.4 мА. Выделяемая тепловая мощность одного канала регистрации при этом составляет 0.8 Вт (полная мощность годоскопа ~ 15 Вт), что не превосходит допустимого предела системы охлаждения электроники.

Зависимость вероятности срабатывания системы триггера от числа треков для порогов по множественности $M = 3, 8, 12, 16, 20$ и 24 частиц приведена на рис. 18.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Благодаря высокому уровню характеристик спектрометра СВД-2: широкой апертуре, прецизионному восстановлению вершины взаимодействия, возможности реконструирования событий с большой множественностью и эффективному отбору событий — к настоящему времени получен ряд важных физических результатов. Прежде всего, это исследование рождения открытого чарма в pA -взаимодействиях при 70 ГэВ в околороговой области [54, 55], где измерено не только интегральное сечение, но и дифференциальные сечения рождения чарма. Выполнено также измерение топологических сечений множественного рождения заряженных частиц в pp -взаимодействиях при

50 ГэВ [56]. Благодаря возможностям установки СВД топологическое сечение измерено для событий с 24 заряженными частицами в конечном состоянии, что на три порядка ниже ранее измеренных топологических сечений при этой энергии. На установке СВД впервые обнаружен рост нормированной дисперсии $\omega^0 = \sigma^2(n_{\pi 0})/\langle n_{\pi 0} \rangle$ для нейтральных пионов в событиях с полной множественностью частиц, превышающей 22 [57], что может свидетельствовать об образовании пионного конденсата в событиях с большой множественностью частиц в конечном состоянии.

Казалось бы, за весьма длительное время эксплуатации на пучке ускорителя У-70 (около 20 лет) установка должна неминуемо устареть не только морально, но и физически. Однако этого не произошло, поскольку спектрометр с вершинным детектором постоянно находится в процессе совершенствования и модернизации. За последние 8 лет практически полностью обновлены почти все системы: вершинный детектор со своей электроникой, трековый детектор с электроникой, детектор γ -квантов с электроникой и система запуска установки. В магнитном спектрометре заменены источники питания. Электроника спектрометра по времени считывания данных до сих пор не уступает другим системам и не ограничивает скорость набора статистики.

Разумеется, перед каждым сеансом по набору статистики установка проходит тщательную проверку, и возникшие неисправности устраняются. Из опыта эксплуатации можно сказать, что быстрее всего стареют и требуют замены компьютеры, далее идут источники питания, затем пропорциональные камеры (выгорают анодные проволочки) и их усилители.

В настоящее время установка СВД-2 готовится для проведения нового эксперимента по исследованию аномальных мягких фотонов в адрон-адронных взаимодействиях по проекту "Термализация".

Все исследования выполнены при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, гранты: 95-02-05226, 00-02-16239, 03-02-16984, 06-02-16954, 09-02-00445, а также фонда президента РФ для поддержки научных школ по грантам: НШ-1456.2008.2 и НШ-4142.2010.2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андришин А.М., Ардашев Е.Н., Бабинцев В.В. и др. Препринт ИФВЭ 84-3. Серпухов, 1984.
2. Goldhaber G., Pierre F.M., Abrams G.S. et al. // Phys. Rev. Lett. 1976. V. 37. P. 225.
3. Shindler R.H., Alam M.S., Boyarski A.M. et al. // Phys. Rev. 1981. V. 24D. P. 78.
4. Baltay C., Caroumbalis D., French H. et al. // Phys. Rev. Lett. 1978. V. 41. P. 73.
5. Alston D., Cardman L.S., Axel P. et al. // Phys. Lett. 1980. V. 49B. P. 113.

6. *Drijard D., Clover M.R., Cormier T.M. et al.* // Phys. Lett. 1979. V. 81B. P. 250; 1979. V. 85B. P. 452.
7. *Giboni K.L., Eisert J., Wilkens M. et al.* // Phys. Lett. 1979. V. 85B. P. 437.
8. *Basile M., Romeo G.R., Cifarelli L. et al.* // Nuovo Cim. 1981. V. 63A. P. 230.
9. *Sandweiss J., Cardello T., Cooper P. et al.* // Phys. Rev. Lett. 1980. V. 44. P. 1104.
10. *Bosetti P., Bucksbaum P., Chu S. et al.* // Phys. Lett. 1979. V. B74. P. 343.
11. *Church M., Donaldson R., Gustafson R. et al.* Fermilab Proposal. № 690. 1981.
12. *Asratian A.E., Epstein V.Sh., Fakhutdinov F.M. et al.* // Phys. Lett. 1978. V. 79B. P. 497.
13. *Ardashev E., Bogolyubsky M., Bulgakov N. et al.* Preprint ИИЯФ-96-98. Протвино, 1996.
14. *Ardashev E.N., Boguslavsky I.V., Gramenitsky I.M. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods. 1995. V. A356. P. 210.
15. *Басиладзе С.Г.* // ПТЭ. 1983. № 5. С. 6.
16. *Басиладзе С.Г., Смирнов А.Н., Степанов А.Н., Рыбников В.М.* // ПТЭ. 1985. № 6. С. 68.
17. *Бару С.Е., Басиладзе С.Г., Грошев В.Р. и др.* // ПТЭ. 1975. № 4. С. 105.
18. *Беленький В.З., Бондарь Н.Ф., Казаков И.Б. и др.* Препринт ЛИЯФ 1049. Л., 1985.
19. *Басиладзе С.Г., Элов О.З.* 64-канальный модуль регистрации сигналов с пропорциональных камер РПК-213. Разработка аппаратуры сопряжения ЭВМ с измерительными установками. М.: Изд-во МГУ, 1985.
20. *Басиладзе С.Г., Элов О.З.* Специализированный контроллер для отбора и считывания данных с пропорциональных камер КПК-671. Разработка аппаратуры сопряжения ЭВМ с измерительными установками. М.: Изд-во МГУ, 1985.
21. *Басиладзе С.Г., Рыбников В.М.* // ПТЭ. 1986. № 1. С. 55.
22. *Алеев А.Н., Басиладзе С.Г., Селиков А.Е.* // ПТЭ. 2003. № 5. С. 56.
23. *Басиладзе С.Г., Смирнов А.Н., Суворов В.В.* // ПТЭ. 1985. № 1. С. 81.
24. *Басиладзе С.Г., Рыбников В.М.* Сдвоенный управляемый блок задержки 2БЗУ-122. Аппаратура систем автоматизации научных исследований МГУ. М.: Изд-во МГУ, 1984.
25. *Богданова Г.А., Волков М.Ю., Лефлат А.К. и др.* // ПТЭ. 2001. № 4. С. 31.
26. *The SVD-Collaboration. Ermolov P.F. et al.* // Proc. of XXVII Int. Conf. on High Energy Physics. Glasgow (20–27 July 1994) Singapore: World Scientific, 1995. P. 1029.
27. *СВД-объединение. Авдейчиков В.В., Алеев А.Н., Ардашев Е.Н. и др.* Препринт НИИЯФ МГУ-99-27/585. М., 1999.
28. *СВД-объединение. Авдейчиков В.В., Алеев А.Н., Ардашев Е.Н. и др.* Препринт НИИЯФ МГУ-97-40/49. М., 1997.
29. *Ардашев Е.Н., Боголюбский М.Ю., Булгаков Н.К. и др.* Препринт НИИЯФ МГУ-99-28/586. М., 1999.
30. *Картвелишвили В.Г., Лиходед А.К., Слабоспицкий С.Р.* // Ядерная физика. 1981. Т. 33. № 4 С. 832; *Лиходед А.К., Слабоспицкий С.Р., Суслов М.В.* // Ядерная физика. 1983. Т. 38. № 3 С. 727.
31. *Anjos J.C., Herrera G., Magnin J. et al.* Preprint CBPF-NF-010/97. 1997; CBPF-011/97. 1997.
32. *Alves G.A., Amato S., Anjos J.C. et al.* // Phys. Rev. Lett. 1993. V. 70. P. 722.
33. *Verzocchi M.* // Nucl. Instrum. and Methods. 1994. V. A351. P. 222.
34. *Frabetti P.L., Bogart C.W., Cheung H.W.K. et al.* // Phys. Rev. Lett. 1990. V. B251. P. 639.
35. *Blumlein J., Brunner J., Grabosh H.-J. et al.* // Phys. Rev. Lett. 1992. V. B279. P. 405.
36. *Басиладзе С.Г., Богданова Г.А., Волков В.Ю. и др.* // ПТЭ. 2006. № 3. С. 52.
37. *Ардашев Е.Н., Басиладзе С.Г., Богданова Г.А. и др.* // ПТЭ. 2007. № 5. С. 75.
38. *Ардашев Е.Н., Бабинцев В.В., Воробьев А.П. и др.* Препринт ИФВЭ 2001-31. Протвино, 2001.
39. *Santiard J.C., Beusch W., Buytaert S. et al.* Preprint CERN-ECP/94-17. 1994.
40. *Ansel P., Boulter R., Czermak A. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods. 1992. V. A315. P. 425.
41. Le Croy Catalog, December 1982, USA.
42. *Бушин Ю.Б., Ваньев В.С., Гончаров П.И. и др.* Препринт ИФВЭ 88-47. Серпухов, 1988.
43. *Ардашев Е.Н., Богданова Г.А., Волков В.Ю. и др.* Препринт НИИЯФ МГУ № 14/780. М., 2005.
44. *Сотрудничество СВД-2. Авдейчиков В.В., Алеев А.И., Баландин В.П. и др.* Сообщение ОИЯИ Р1-2004-190. Дубна, 2004.
45. *Дерюгин О.А., Зверев Е.Г., Лефлат А.К.* // ПТЭ. 1998. № 1. С. 72.
46. *Ермолов П.Ф., Зверев Е.Г., Карманов Д.Е. и др.* // ПТЭ. 2002. № 2. С. 54.
47. *Богданова Г.А., Боголюбский М.Ю., Волков В.Ю. и др.* Сообщение ОИЯИ Р1-95-451. Дубна, 1995.
48. *Богданова Г.А., Волков В.Ю., Лефлат А.К. и др.* Препринт НИИЯФ МГУ 2000-25/629. М., 2000.
49. *Ammosov V.V., Voitsov V.N., Ermolov P.F., Ivanilov A.A. et al.* // Phys. Lett. 1972. V. B42. P. 519.
50. *Борзунов Ю.Т., Голованов Л.Б., Киреев В.И. и др.* Препринт ИФВЭ 2009-4. Протвино, 2009.
51. *Басиладзе С.Г., Батурицкий М.А., Богданова Г.А. и др.* // ПТЭ. 2008. № 3. С. 14.
52. *Baturitsky M.A., Dvornikov O.V.* // Nucl. Instrum. and Methods. 1999. V. A423. P. 163.
53. *Авдейчиков В.В., Богданова Г.А., Будилов В.А. и др.* // ПТЭ. 2011. № 2. С. 15.
54. *Сотрудничество СВД-2. Рядовилов В.Н. и др.* // Ядерная физика. 2010. Т. 73. № 9. С. 1585.
55. *Сотрудничество СВД-2. Рядовилов В.Н. и др.* // Ядерная физика. 2011. Т. 74. № 1. С. 324.
56. *Сотрудничество СВД-2. Ардашев Е.Н., Боголюбский М.Ю., Булгаков Н.К. и др.* Препринт ИФВЭ 2011-4. Протвино, 2011; arXiv [hep-ex] 1104.0101.
57. *Сотрудничество СВД-2. Ардашев Е.Н., Боголюбский М.Ю., Булгаков Н.К. и др.* Препринт ИФВЭ 2011-5. Протвино, 2011; arXiv [hep-ex] 1104.3673.