



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

Институт физики высоких энергий имени А.А. Логанова
Национального исследовательского центра
«Курчатовский институт»

Препринт 2025-4

А.А. Борисов, Д.А. Васильев, А.П. Власенко, В.Г. Готман,
В.А. Дорофеев, А.В. Екимов, Д.Р. Еремеев, А.М. Зайцев,
А.В. Ивагин, А.Н. Исаев, А.Н. Карюхин, И.А. Качаев, А.С. Кожин,
В.Ф. Константинов, В.И. Лисин, А.В. Лутчев, В.Д. Матвеев,
Е.В. Назаров, А.Н. Плеханов, А.Д. Рябов, Д.И. Рябчиков,
М.М. Солдатов, А.А. Солодков, Е.А. Старченко, В.П. Сугоняев,
М.С. Холоденко, Р.М. Фахрутдинов, В.Н. Федорченко, А.П. Филин,
Ю.А. Хохлов, Е.Н. Чернов, Н.А. Шаланда, А.А. Шумаков,
В.И. Якимчук

Установка ВЕС

Протвино 2025

Аннотация

А.А. Борисов, Д.А. Васильев, А.П. Власенко, В.Г. Готман и др. Установка ВЕС : Препринт НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ 2025-4. – Протвино, 2025. – 44 с., 25 рис., 4 табл.

Установка ВЕС (**Вершинный Спектрометр**) – это широкоапертурный магнитный спектрометр, работающий на вторичном пучке ускорителя У-70 ускорительного комплекса НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ. В работе описаны общая компоновка, основные детекторы и системы установки. Затронуты вопросы реконструкции и моделирования данных. Характеристики установки проиллюстрированы примерами из выполненных ранее экспериментов по адронной спектроскопии.

Abstract

A.A. Borisov, V.A. Dorofeev, A.V. Ekimov, et al. Performance of the VES setup: NRC «Kurchatov Institute» – IHEP Preprint 2025-4. – Protvino, 2025. – p. 44, figs. 25, tables 4.

The VES setup at the U-70 accelerator complex of IHEP is presented. Its general composition, major detectors and systems are described. Data reconstruction and modelling are considered. Characteristics of the setup are illustrated with examples from the experiments on meson spectroscopy.

1. Введение

Установка ВЕС работает на ускорительном комплексе У-70 (г. Протвино) с середины 80-х гг. XX столетия. В экспериментах на ВЕС получены и опубликованы многочисленные результаты в области спектроскопии легких мезонов. Ранее было опубликовано несколько работ ([1] – [10]), посвященных отдельным детекторам, системам и приборам установки. В недавней работе [11] в некоторой степени также рассмотрены технические аспекты эксперимента. Однако до сих пор не было публикации, достаточно полно описывающей всю установку.

Данная работа призвана закрыть этот пробел. За время существования практически все системы установки претерпели модернизацию. Самые большие были выполнены до 2012 г. В табл. 1 справочно приведена таблица со сведениями об экспозициях (сеансах), проведенных с этого времени на модернизированной установке. Показаны только так называемые физические сеансы - с набором существенной для физического анализа статистики. Темы, подробно рассмотренные в предшествующих публикациях, в данной работе представлены по возможности коротко.

Работа включает 13 разделов. В разделе 2 приводятся общие сведения об установке. Разделы 3,4,5 посвящены системам триггера, сбора данных и контроля установки соответственно. Общая схема вычислительной модели, нужная для понимания следующих разделов, представлена в разделе 6. В разделах 7 – 11 в порядке следования по направлению пучка представлены: пучковая часть установки, мишенная часть с вето-системой, основной спектрометр, многоканальный черенковский счетчик, электромагнитный калориметр. При необходимости используются результаты физического анализа. В разделе 12 кратко затронут вопрос реконструкции данных. В разделе 13 даны некоторые общие характеристики эксперимента.

2. Размещение, назначение и состав установки ВЕС. Общая схема эксперимента

ВЕС - это широко-апертурный универсальный спектрометр для регистрации многочастичных реакций на фиксированной мишени. Главным предметом анализа на

Сеанс#	датировка	мишень	N BEAM, 10 ¹⁰	N tot, 10 ⁹	N $3\pi^\pm$, 10 ⁶	N $\pi^+\pi^-\pi^0$, 10 ⁶
44	осень-2012	Be	8.9	3.5	48.	1.8
45	весна-2013	Be	5.3	2.1	31.	1.1
47	весна-2015	Be	3.2	1.7	15.	0.67
48	осень-2015	Be	4.6	2.2	26.	0.96
50	осень-2016	Pb, Be	5.0	2.0	5.5	0.18
53	весна-2018	Pb, Be	9.7	4.6	18.	0.92
59	осень-2022	Be, C, CH ₂	3.1	1.4	21.	0.73
60	осень-2023	Be, C, CH ₂	1.1	0.9	8.3	0.48
62	осень-2024	Be	2.2	1.1	15.	0.45
63	весна-2025	Be, C, CH ₂	1.3	0.6	5.4	0.17

Таблица 1. Физические сеансы на модернизированной установке ВЕС. В 4–7-й колонках приведены соответственно числа: частиц, прошедших через пучковый телескоп за «живое» время установки; зарегистрированных событий; отобранных событий $3\pi^\pm$; отобранных событий $\pi^+\pi^-\pi^0$.

ВЕС являются t -канальные эксклюзивные реакции фрагментации мезонного пучка. Установка расположена на выводном канале К-4Д протонного синхротрона У-70 НИЦ КИ - ИФВЭ (Протвино). Общий вид установки приведен на рис. 1. Далее в этом разделе приведена общая компоновка установки. Характеристики оборудования приведены в последующих разделах.

В хвостовой части канала размещены пучковые детекторы. За ними установлена мишень, окруженная в кинематической области фрагментации мишени вето-системой. Заряженные вторичные частицы в области фрагментации пучка детектируются трековыми детекторами в составе магнитного спектрометра. Для их идентификации служит многоканальный черенковский счетчик (МЧС). В конце установки расположен электромагнитный калориметр (ЭМК) для регистрации гамма-квантов. На установке принята и далее используется система координат с опорой на основной спектрометрический магнит: центр – в центре его зазора, оси – по его осям: Z – по ходу пучка, Y – вверх, X – дополняет до правой тройки, по направлению от кольца У-70.

Цикличность работы У-70 задает основу циклограммы установки. Типичная длительность цикла 9 с. Из них вывод пучка в канал К-4Д («сброс») длится от 0.5 до 2.5 с в зависимости от режимов У-70 и работы других потребителей пучка. Несколько заранее формируется сигнал BS (*begin spill*), а через некоторое время после окончания – ES (*end spill*). Время от BS до ES занимает сигнал GATE, в течение которого триггерная система (ТС) готова к выдаче триггеров, а система сбора данных (ССД) – к приему данных по сигналам START и их буферизации. По сигналу ES стартует передача накопленных за сброс данных в ЭВМ ССД, а также при необходимости – выполнение служебных задач аппаратуры ССД (загрузка прошивок, конфигурирование модулей, работа с пьедесталами аналого-цифровых преобразователей (АЦП) ЭМК и др.).

В ходе пучковой экспозиции с помощью программы – гистограмматора onl-hist

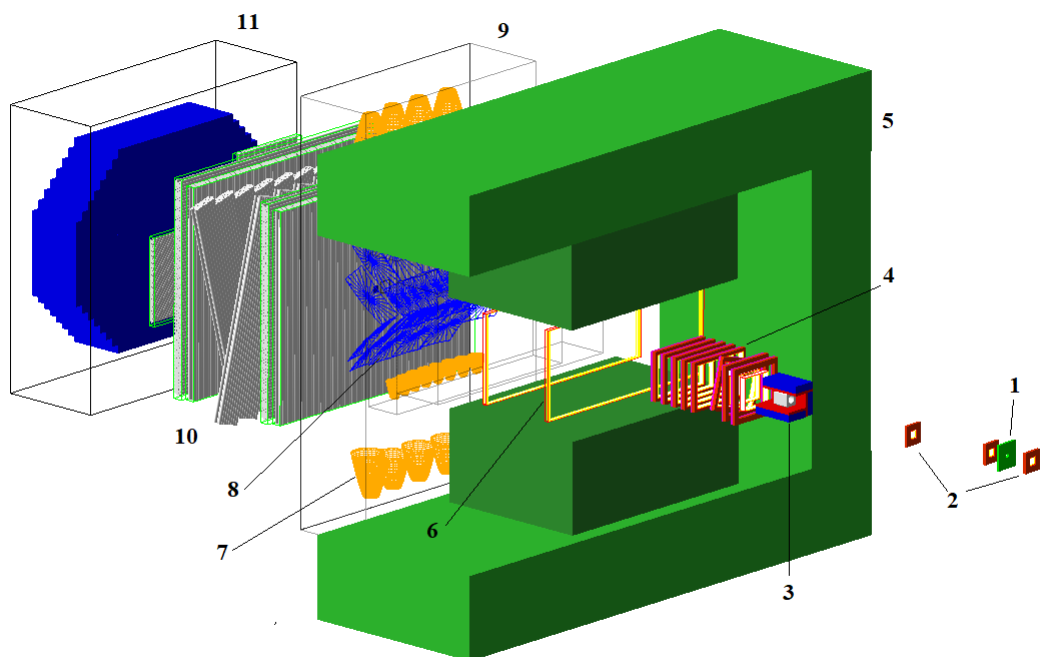


Рис. 1. Схема установки ВЕС (без пучкового спектрометра). Показаны чувствительные элементы без деталей конструкции. Обозначены (см. в тексте): счетчик А10-11 (1); камеры из группы НРС (2); система вето с мишенью (3); головные пропорциональные камеры (4); магнит (5), обмотки и левая стойка ярма не показаны; дрейфовые камеры (6); светособирающие конуса (7), зеркала (8) и корпус (9) МЧС; дрейфовые трубки (10); ЭМК (11) (цвета в онлайн версии).

и другого программного обеспечения (ПО) «в линию» (*on-line*) данные частично обрабатываются для отслеживания работоспособности и стабильности детекторов и систем. Далее в тексте для этого употребляется термин «мониторирование». Для контроля медленных систем и процессов служит комплекс аппаратно-программных средств – система контроля установки (СКУ).

3. Триггерная система

ТС установки выполнена на современном структурном и схемотехническом уровне на основе составного электронного модуля собственной разработки MPDP-44 [9]. Он состоит из материнской платы с 44-мя преобразователями уровней сигналов NIM – HSTL18 и мезонинного модуля TDC-96MWC с программируемой логической интегральной схемой (ПЛИС) микроконтроллером и памятью.

Модуль MPDP-44 работает в синхронном режиме: обработка выполняется синхронной схемой, работающей на частоте 200 МГц, с захватом и выдачей внешних сигналов на эффективной частоте до 800 МГц. Путем эмуляции асинхронного интерфейса модуль извне представляется схемой совпадений, обычной для экспериментов на неподвижной мишени с использованием триггерных детекторов, в которой три счетчика пучкового телескопа ВЕС (см. далее) являются опорными для времени триггера.

Один модуль MPDP-44 выполняет практически все основные функции ТС: выработку триггера, прием и выдачу сигналов ССД [4]. Кроме того, он выполняет другие функции, связанные с триггером: задание временной диаграммы работы установки, счет импульсов интегрально за цикл, а также по-событийную выдачу счета импульсов и оцифровку времен сигналов триггерных детекторов. Функциональный блок модуля MPDP-44, генерирующий по-событийные данные, логически является частью ССД.

Большинство параметров обработки сигналов программируются: временные параметры циклограммы, длительности и задержки входных логических сигналов, временные окна встроенных время-цифровых преобразователей (ВЦП) для них, логические функции - компоненты триггерного решения (в том числе задаваемые в виде таблиц истинности LUT) и их коэффициенты разреживания, длительности и задержки управляющих сигналов для ССД.

В дополнение к MPDP-44 в ТС и в ее интерфейсе с ССД использован ряд модулей с простыми функциями: разветвители (повторители или с преобразованием уровней) логических сигналов запуска подсистем ССД, логические сумматоры сигналов BUSY от подсистем ССД, резистивные разветвители аналоговых сигналов счетчиков и пороговые дискриминаторы – формирователи сигналов NIM. В актуальной ТС ВЕС дискриминаторы – формирователи настроены на порог 25 мВ и длительность формирования 20 нс, при минимально допустимой длительности импульсов на входах в MPDP-44 в 5 нс. При необходимости расширение для логических функций делается внутри ПЛИС MPDP-44.

Для выработки триггера ВЕС на 20 внешних входов MPDP-44 поданы сигналы пучковых сцинтилляционных счетчиков, обозначаемых $S_0...S_4$, A_{10} , A_{11} , одного из

пучковых черенковских счётчиков ($BCh1$), детекторов выбывания пучка (K_1, K_2) и детекторов мишенной вето-системы ($TG_0...TG_9$).

Триггерное решение является логической суммой нескольких компонент. Триггерные счетчики и некоторые аспекты решений рассмотрены в главах ниже. Связанными с прохождением пучка («физическими») компонентами являются т.н. *BEAM* – на пучковую частицу, *KBEAM* – на преимущественно каон в пучке, *HALO* – на частицу из гало пучка, *MAIN* – на взаимодействие пучка с подавлением фрагментации мишени, *MWG* («main without guard», см. раздел 8) – на взаимодействие пучка безотносительно фрагментации мишени.

События с компонентой *MAIN* с примерно 20-ти-кратным подавлением потока пучковых частиц являются основными для дальнейшего физического анализа. Низкая специфичность *MAIN* дает возможность изучения широкого круга процессов. Ввиду ограниченной пропускной способности ССД другие физические компоненты триггера, еще менее избирательные, участвуют в решении со своими коэффициентами разреживания K_{TRIG} .

Кроме физических, есть вспомогательные компоненты триггера: *PULSER* от внутреннего генератора, а также вырабатываемые на части GATE вне вывода пучка *COSMIC* – на космические мюоны и *LED* – на засветку части детекторов светоизлучающими диодами (СИД).

Для выполнения служебных задач по ЭМК вне работы с пучком и помимо ССД задействованы еще два входа MPDP-44: FRONT_PANEL_LED для генерации ворот интегрирующих АЦП GATE_ADC с одновременным сигналом зажигания СИД LED_ECAL, и FRONT_PANEL_PED для генерации GATE_ADC в процедуре считывания пьедесталов. Выработка сигналов FRONT_PANEL_LED и FRONT_PANEL_PED производится специализированным модулем LECAL после получения им сигнала циклограммы ES. Этот модуль в каркасе МИСС с контроллером ЛЭ98 (см. раздел 4) управляется программами чтения, работающими на отдельном так называемом аппаратном компьютере.

Конфигурирование MPDP-44 осуществляется с помощью набора пользовательских макрокоманд, посылаемых в микроконтроллер (МК) модуля с компьютера ССД. Для мониторинга состояния триггерной части служат две программы – сервер на МК MPDP-44 и клиент на компьютере ССД. На рис. 2 представлен снимок операторского экрана программы – клиента.

4. Система сбора данных

ССД ВЕС характеризуется комбинированной архитектурой с использованием как каркасно-модульной электроники, так и предназначенной для размещения непосредственно на детекторах распределенной электроники. Последняя в дальнейшем называется «надетекторной».

Надетекторная электроника включает несколько типов автономных модулей собственной разработки с широким набором функций – от оцифровки сигналов детекторов до передачи данных по каналу Ethernet в ЭВМ ССД с операционной системой (ОС) Linux. По этому же каналу при необходимости производится загрузка прошивки и конфигурирование модулей. Каждый модуль содержит микроконтроллер

Trigger state (Thu Nov 28 13:59:23 2024)																		
	Decision	T0	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	F0	F1	F2	F3	C0	C1	C2	C3	
00	S0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22689
01	S1	C	0	0	C	C	0	0	0	C	0	0	0	0	C	C	C	614228
02	S2	C	C	C	C	0	0	0	0	C	0	0	0	0	C	C	C	643852
03	S3	C	0	C	C	0	0	0	C	0	0	0	0	0	C	C	C	479565
04	A10	A	0	A	A	0	0	0	A	A	0	0	0	0	A	A	A	205026
05	A11	A	0	A	A	0	0	0	A	A	0	0	0	0	A	A	A	92694
06	K1	0	0	A	0	0	0	0	A	0	0	0	0	0	0	A	A	441159
07	K2	0	0	A	0	0	0	0	A	0	0	0	0	0	0	A	A	431459
08	BCHERO1	0	0	0	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	614445
09	Smu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	TG0	0	0	0	0	0	0	0	A	0	0	0	0	0	0	0	A	31667
11	TG1	0	0	0	0	0	0	0	A	0	0	0	0	0	0	0	A	40660
12	TG2	0	0	0	0	0	0	0	A	0	0	0	0	0	0	0	A	20835
13	TG3	0	0	0	0	0	0	0	A	0	0	0	0	0	0	0	A	33480
14	TG4	0	0	0	0	0	0	0	A	0	0	0	0	0	0	0	A	40534
15	TG5	0	0	0	0	0	0	0	A	0	0	0	0	0	0	0	A	51299
16	TG6	0	0	0	0	0	0	0	A	0	0	0	0	0	0	0	A	37933
17	TG7	0	0	0	0	0	0	0	A	0	0	0	0	0	0	0	A	67760
18	TG8	0	0	0	0	0	0	0	A	0	0	0	0	0	0	0	A	78591
19	TG9	0	0	0	0	0	0	0	A	0	0	0	0	0	0	0	A	45305
20	F0	0	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	213098
21	F1	0	0	0	0	C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	54359
22	F2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	F3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	LED	0	0	0	0	0	0	C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80
25	PULSER	0	0	0	0	0	C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	43103
26	BUSY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9255
27	PGATE_A	0	0	0	0	C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-
	ALL	384074	171252	37943	10579	8	43103	80	13635	213098	54359	0	0	558932	384074	37943	13635	
	Prescaled	384	86	3794	212	8	673	80	13635							Trigger	total	9255

Рис. 2. Экран программы мониторинга триггера. Назначения входов (слева) см. в тексте. Задействованы триггерные решения T0–T7, два из которых используют функции F0 и F1. Функция F1 задана как LUT (не индицируется) для формирования COSMIC в T4, дополнительные ворота PGATE_A вырезают интервал до сброса пучка. Счетчик C0 относится к интенсивности. Показания за цикл.

с Linux-подобной ОС, загрузочную и буферную памяти, ПЛИС, все необходимые источники питания (ИП) на основе DC/DC преобразователей. Среди особенностей модулей этого класса – малое (< 5 мкс) и фиксированное мертвое время на обработку события. Однотипные модули для одного детектора или однотипных детекторов в количестве от одного до нескольких десятков логически объединены в подсистемы – сектора.

Надетекторная электроника объединена в общую древовидную Ethernet-сеть. Конечные устройства подключаются к коммутаторам нижнего уровня интерфейсами 10/100BASE-T. Эти коммутаторы, в свою очередь, объединяются через интерфейсы 1000BASE-T и образуют каскадную структуру, на вершине которой находится центральный коммутатор, подключенный к ЭВМ ССД. К этой же сети подключены устройства, используемые для автоматизации ряда процедур с обменом информацией с ССД. Это система перемещения ЭМК [8], сервоприводы триггерных счетчиков (раздел 7), управляемый источник питания для регулировки интенсивности излучения светодиодов.

Каркасная регистрирующая электроника выполнена в стандарте МИСС [12]. Один каркас составляет один или два сектора. Оцифрованные в регистрирующих модулях данные считываются автономными контроллерами секторов [13] по магистрали МИСС, после обработки (подавление незначащей информации, форматирование) поступают в контроллер AC-USB [4], а по окончании ускорительного сброса передаются в компьютер ССД по каналу USB. Секторы ВЦП ЛЭ-78 [14] и интегрирующих амплитудно-цифровых преобразователей (ИАЦП) ЛЭ-71 [15] работают в синхронном режиме шины МИСС. Их мертвое время, зависящее от числа срабатываний, определяет мертвое время всей ССД, в среднем ~ 16 мкс на физическое событие.

В части каркасов установлены каркасные контроллеры (КК) ЛЭ-98 [16], связанные по USB с аппаратным компьютером и выполняющие служебные задачи вне фазы вывода пучка и/или выработки триггеров от ТС, такие как чтение и запись в память пьедесталов ИАЦП.

В табл. 2 перечислены используемые типы модулей. Упомянутый в составе MPDP-44 модуль TDC-96MWC с соответствующей прошивкой ПЛИС используется также в качестве ВЦП для трековых детекторов (см. ниже). Использование современной элементной базы и надетекторное исполнение большей части электроники ССД на 1.5 порядка снизило ее общее энергопотребление и позволило обеспечить с большим запасом охлаждение домика с аппаратурой при помощи промышленного двухблочного кондиционера канального типа с холодильной мощностью 12 кВт.

Конфигурирование ССД из подсистем (секторов), мониторинг ее работы, сборка полного события из фрагментов выполняет комплекс специализированных программ на компьютере ССД. На рис. 3 показан снимок экрана мониторирующей программы ССД.

Типичный размер «сырого» события в формате ССД $\sim 2 - 3$ кБ, их количество за один цикл $(1...4) \cdot 10^4$. Сгруппированные и снабженные заголовком цикла события записываются в файлы размером ~ 1 ГБ на диск компьютера ССД в роли буфера, а затем передаются в роботизированную систему *castor* [17] ленточного хранения данных вычислительного центра ИФВЭ. Исторически принятое на ВЕС группирование до 100 файлов в «ленты» условно и не соответствует емкости реальных магнитных

#	Тип модуля	Детектор (система, функция), кол.-во модулей	Актуальные установки параметров
1a	ВЦП TDC-32MWC (+ разветвитель LVDRV-24)	BSPC01—03 (12 шт.) INOX01,02 (40 шт.)	32 канала 1-hit, 2.55 нс, 128 отсчетов
1b	ВЦП TDC-32MWC	S1-3, A10A11, K1-2 (1 шт.); «детектор» наложений	32 канала M-hit, 2.55 нс, 256 отсчетов
2a	ВЦП TDC-48DT (+ LVDRV-24)	DC01—04 (36 шт.)	48 каналов 1-hit, 2.55 нс 164 отсчета
2b	ВЦП TDC-48DT	Gate ИАЦП ЭМК (1 шт.)	24 канала 1-hit, 2.55 нс 164 отсчета
2c	ВЦП TDC-48DT	Триггерное вето (1 шт.)	48 каналов 1-hit, 3.39 нс, 104 отсчета
3	ВЦП TDC-96MWC (+ TNPD-24)	HPC01—04 (4 шт.) PC 40x60 01—05 (25 шт.)	96 каналов 1-hit, 5 нс, 64 отсчета
4	ВАЦП SADC-32ATC	CH28 (1 шт.) Вето&BCh1—4 (1 шт.)	32 канала 40 млн.выб./с, 16 выборов, 12 бит
5	Многофункциональный MPDP-44	Регистр триггерных признаков	1 канал 16 бит
		ВЦП	20 каналов 1-hit, 2.5 нс, 136 (4 канала) и 164 (16 каналов) отсчетов
		Счетчики пособытийные	5 каналов 24 бита
		Счетчики за цикл	48 каналов 24 бита
6	ВЦП ЛЭ-78 (в синхр.моде МИСС)	PC RED01—03 (NNN шт.)	64 канала M-hit 5 нс 128 отсчетов
7	ИАЦП ЛЭ-71 (в синхр.моде МИСС)	ЭМК (20 шт.)	96 каналов 12 бит

Таблица 2. Модули в составе ССД ВЕС. 1-hit и M-hit обозначает «однохитовый» и «многохитовый», «хит» – срабатывание канала детектора с измерением определённого типа (адрес, время, амплитуда). Обозначения и состав детекторов см. в соответствующих разделах.

Main event builder state (Mon Nov 21 19:39:11 2022)

Input streams:

SFTIME(us)	MODE	MID	LSFSZ	RLSFSZ	BSTATUS	NSTARTS	NRESETS	AVGBSY(us)	MAXBSY(us)	QUEUESZ	FILE
1669048741148182	0x00	D10	964764	964764	OK	10452	2	5.0	5.0	1	/tmp/D10
1669048741236378	0x00	D2	668288	668288	OK	10452	2	0.0	0.0	1	/tmp/D2
1669048741313742	0x00	D1	1918944	1918944	OK	10452	2	0.0	0.0	1	/tmp/D1
1669048741626693	0x00	G1	21010452	21010452	OK	10452	2	0.0	0.0	0	/tmp/G1
1669048741224078	0x00	P13	1619192	1619192	OK	10452	2	3.9	9.6	1	/tmp/P13
1669048741390451	0x00	D13	732420	732420	OK	10452	2	1.0	1.0	1	/tmp/D13
1669048741160938	0x00	D12	283852	283852	OK	10452	2	1.0	1.0	1	/tmp/D12
1669048741671806	0x00	D14	743492	743492	OK	10452	2	1.0	1.0	1	/tmp/D14
1669048741039734	0x23	A3	531272	531272	OK	10452	2	13.0	44.8	0	/dev/usbmiss11
1669048741003107	0x23	A4	423952	423952	OK	10452	2	10.7	29.0	0	/dev/usbmiss10
1669048741047241	0x23	A2	496784	496784	OK	10452	2	13.7	47.0	0	/dev/usbmiss9
1669048741049481	0x23	A1	856156	856156	OK	10452	2	13.7	46.4	0	/dev/usbmiss8
1669048741048729	0x23	A7	879800	879800	OK	10452	2	12.4	22.6	0	/dev/usbmiss7
1669048741013032	0x23	A5	662052	662052	OK	10452	2	11.8	43.2	0	/dev/usbmiss6
1669048741052851	0x23	A6	902192	902192	OK	10452	2	14.5	36.0	0	/dev/usbmiss5
1669048741002230	0x23	P4	245436	245436	OK	10452	2	3.4	11.2	0	/dev/usbmiss4
1669048741052590	0x23	P3	931344	931344	OK	10452	2	5.5	39.8	0	/dev/usbmiss3
1669048741102007	0x23	P6	209040	209040	OK	10452	2	3.3	3.6	0	/dev/usbmiss2
1669048741002897	0x23	P2	372728	372728	OK	10452	2	3.8	30.0	0	/dev/usbmiss1
1669048741002496	0x23	P1	372884	372884	OK	10452	2	3.9	23.4	0	/dev/usbmiss0

Рис. 3. Экран состояния основного построителя событий ССД. Показания за цикл.

носителей. Данные за ~ 3 недели сеанса, несколько десятков лент, имеют суммарный объем до 10 ТБ. Последующая *off-line* обработка сырых данных рассмотрена в разделе 12.

5. Система контроля установки

Первая версия СКУ ВЕС опубликована в [5]. За прошедшее время система была усовершенствована при сохранении общих подходов. Основное структурное изменение – расширение набора контролируемых приборов, с добавлением к имевшейся программе, далее называемой DCS-1, еще двух. Все они используют LabView и работают на отдельном компьютере ПК-DCS, единственном на установке с ОС Windows. Для связи аппаратуры СКУ с ПК используются несколько портов и интерфейсов, в т.ч. преобразователь AC-4 [18].

Интерфейс программы DCS-2 построен подобно DCS-1 в виде набора переключаемых страниц. Главная страница сжато представляет информацию от всех приборов, контролируемых DCS-2. Она содержит цветовые индикаторы их соединений с ПК-DCS и нахождения их основных показаний в установленных пределах, а также сами показания. Здесь также находятся кнопки старта/остановки программы, управления архивированием и графиками для остальных страниц.

По одной странице выделено группам однотипных приборов с общим каналом опроса:

1. датчики абсолютного давления (ZetLab) с встроенным интерфейсом RS485, один в объеме радиатора МЧС, второй снаружи;
2. четыре ИП (FUG) для подпитки ФЭУ с встроенным интерфейсом RS422 и конвертором в RS485;
3. весы с RS232 под баллоном с фреоном-22, используемом в МЧС;
4. манометр (ДМ5001) с RS232 на входном трубопроводе охлаждающей воды магнита;
5. два манометра (ДМ5007) с преобразователем MR8 «0-5 мА – RS485» на баллонах с метаном;
6. четыре магнитометра разработки, аналогичной [19].

Содержимое страниц в целом аналогично DCS-1. Это текущие показания и их графики, уставки на сигнал «Авария», в случае применимости – калибровочные коэффициенты и кнопки включения/выключения.

Страница настроек содержит адреса (номера) адаптеров интерфейсов и задействованных портов ПК-DCS, кнопки включения опроса и выработки аварийных сигналов по каждой группе приборов, а также калибровочные величины для магнитометров.

Отдельная программа DGA считывает, отображает и архивирует показания акустического анализатора состава газа [20] в радиаторе МЧС.

6. Моделирование установки и процессов

Вычислительное моделирование используется на всех этапах эксперимента: при его планировании, при изучении детекторов, при разработке алгоритмов реконструкции, в физическом анализе. Здесь рассмотрены общие принципы моделирования на ВЕС. Некоторые детали, касающиеся отдельных детекторов, затронуты в соответствующих разделах. Программа моделирования методом Монте-Карло (МС) установки и процессов под названием *bec* основана на пакете Geant-4 [21].

Основная схема при моделировании интересующей эксклюзивной реакции такова: на вход программы подаются события нужного состава частиц с кинематикой согласно заданным распределениям по всем переменным. Роль встроенных генераторов Geant заключается в моделировании вторичных взаимодействий (распадов) начального ансамбля частиц.

Для розыгрыша пучковой частицы используются непосредственно измерения пучка, точка взаимодействия разыгрывается в пределах мишени по затухающей согласно длине ядерного взаимодействия экспоненте, частица мишени считается неподвижной. Для распада пучкового каона разыгрывается вершина распада на ограниченной базе согласно распадной длине. Распределения по кинематическим переменным для вторичных частиц фрагментации или распада пучковой частицы являются результатом анализа, например парциально-волнового (ПВА), либо берутся из теоретической (феноменологической) модели процесса. Импульс частицы отдачи определяется ее массой и кинематикой системы частиц фрагментации пучка.

Смоделированные программой *bec* события с информацией о срабатываниях детекторов обрабатываются программой реконструкции *off* (см. далее) как реальные. Сохранение в выходных данных, наряду с результатами реконструкции, информации об исходном (на входе *bec*) событии дает возможность изучения эффективности и разрешения.

В эксперименте ВЕС реализован модельный учет фона от событий наложения (*pile-up*). Для этого в процессе набора статистики наряду с событиями от физических триггеров регистрируются события по запуску от генератора, т.е. квазислучайные относительно прохождения частиц. При дальнейшей обработке эти события с триггерной меткой *PULSER* группируются отдельно. Программа *bec* на этапе формирования модельного выходного события зачитывает событие из этой группы *pile-up* и по определенным правилам, зависящим от типа электроники, добавляет хиты из него к хитам, произведенным Geant. Таким образом, модельные события приобретают фоновые хиты детекторов на уровне, соответствующем интенсивности пучка при наборе реальных данных.

7. Канал 4Д и пучковая часть установки

Конечная часть выводного канала частиц одновременно является пучковой частью установки, включающей пропорциональные камеры (ПК), сцинтилляционные и черенковские счетчики. Основные элементы показаны на рис. 4.

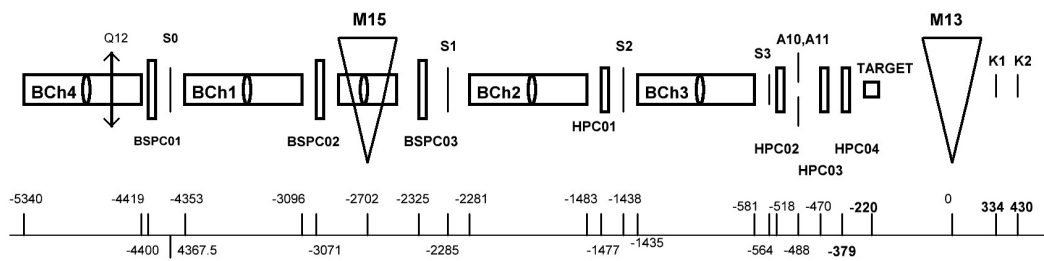


Рис. 4. Схема размещения аппаратуры пучковой части установки, начиная с последнего квадрупольа Q12, с координатами (в см) вдоль трассы пучка. Развертка, не в масштабе.

7.1. Канал 4Д

Устройство канала 4 дано в [22]. Канал позволяет формировать и выводить на установку пучки различных частиц, импульсов и интенсивностей.

Для программы исследований в реакциях мезон-ядерных взаимодействий основным на ветке канала «Д» является пучок вторичных отрицательно заряженных частиц, получаемый с использованием внутренней мишени ВМ-27. Типичные характеристики пучка: импульс от 20 до 40 ГэВ¹, разброс импульса $\sigma_p/p \approx 1\%$, состав пучка: более 96% пионы, около 2% каоны, остальное антипротоны, электроны и мюоны. Интенсивность пучка при нормальной работе $\sim 2 \cdot 10^6$ /с достигается при наведении на ВМ-27 около $8 \cdot 10^{11}$ протонов/с с энергией 50 ГэВ и ограничена несколькими основными факторами.

Во-первых, это пропуски событий пуассоновского (при условии «дебанчирования» пучка У-70) потока. При среднем уровне неблокированного триггера $\sim 10^5$ /с мертвое время примерно сравнивается с живым, так что скорость набора событий как функция интенсивности приближается к насыщению. Во-вторых, загрузка детекторов и события наложения приводят к снижению полезного выхода из принятых событий. Наконец, интегральное наведение первичного пучка на ВМ-27 ограничено допустимой мощностью радиационной дозы в контрольных точках экспериментального зала.

Эпизодически в исследовательских целях производился также вывод из У-70 с использованием изогнутых кристаллов первичных пучков протонов и ядер углерода.

Для формирования и транспортировки пучка служат магнитооптические элементы (МОЭ) и коллиматоры. Типично задействованы дублет и триплет квадрупольных линз, три поворотных диполя и три коллиматора. Номинальная ось пучка на входе в установку отклонена в горизонтальной плоскости ХZ на угол +13 мрад. Для формирования электронного пучка применяется дополнительный «очищающий» диполь в непосредственной близости от ВМ-27, с установленным на его выходной апертуре свинцовым конвертором распадных гамма - квантов. Низкоинтенсивный мюонный пучок от распадов мезонов получается закрытием одного или двух пучковых затворов.

Для независимого от системы контроля токов МОЭ [23] точного отслеживания вариаций поля в поворотных магнитах канала М7, М15 и в магните установки М13 используются магнитометры.

7.2. Пучковые сцинтилляционные счетчики

Основу пучкового телескопа составляют три сцинтилляционных счетчика² в форме дисков: по ходу пучка S1 и S2 диаметром 10 см и толщиной 5 мм, S3 диаметром 4 см и толщиной 2 мм, все с фотоэлектронными умножителями ФЭУ-85. Их дополняет квадратный 25×25 см² счетчик А10-11 толщиной 2.5 мм с центральным отверстием $D = 4$ см с двумя ФЭУ-85 на противоположных гранях во избежание мертвых зон по светосбору. ФЭУ снабжены резистивными делителями напряжения с подпиткой

¹здесь и далее используется натуральная система единиц

²все сцинтилляторы на ВЕС – на основе полистирола, производства ИФВЭ

4-х последних динодов от отдельных источников питания.

Эти счетчики служат для выработки компонент триггера $BEAM = S1 \cdot S2 \cdot S3 \cdot (A10 + A11)$ с типичным разреживанием $K_{BEAM} = 1000$ и $HALO = S1 \cdot (A10 + A11)$ с $K_{HALO} = 2000$. Для обеспечения как можно более ранней выработки триггерных решений сигналы от S1 и S2, наиболее удаленных от триггерной электроники, передаются по «быстрым» (задержка ≈ 3.8 нс/м) коаксиальным кабелям с полувоздушной изоляцией.

События $HALO$, с довольно широким облучением детекторов, в т.ч. мюонами, могут использоваться в задачах калибровки. Дополнительно зарезервирована (не используется в сеансах) возможность подключения на триггерный вход S_μ вспомогательного счетчика.

События триггера $BEAM$ важны для измерения сечения реакций, методика которого изложена в [24]. Они также используются для получения не смещенной (с точностью до малых эффектов разрешения) выборки пучковых треков для целей моделирования и для измерения эффективности других компонент триггера, в которые входит $BEAM$ (см. далее). В этих применениях не требуется знание (средней) эффективности счетчиков, оцениваемой не ниже 97%.

Оцифровка сигналов S1...3 и других во внутренних ВЦП MPDP-44 используется при настройке задержек и мониторинговании сигналов. Параллельное измерение во внешних многохитовых ВЦП срабатываний счетчиков в широком окне (> 300 нс в обе стороны от триггера) используется для мониторингования уровня событий наложения, а при дальнейшей реконструкции данных – для детектирования этих событий.

Счета счетчиков MPDP-44 за цикл используются при настройке и мониторинговании всех компонент триггера. Совпадения $S12 = S1 \cdot S2$ (неблокированные сигналом BUSY) заведены на интенсиметр MPDP-44 для мониторингования временной развертки сброса. Его длительность, определяемая программно в линию как интервал с не менее 90% счета за сброс, служит мерой живого времени³. Пособытийные показания счета N_{S12} используются на этапе реконструкции событий для вычисления мгновенной интенсивности пучка: $I_{beam}^i = (N_{S12}^i - N_{S12}^{i-1}) / (t_i - t_{i-1})$, где t_i – временной штамп i -го события от ССД с квантом 200 нс. Зависимость эффективности измерения события от I_{beam} учитывается при измерении сечения.

На оси отклоненного пучка после основного магнита установки размещены два сцинтилляционных счетчика K1,2 (от beam Killer) диаметром 7 см, толщиной 3 мм, для выработки триггера на выбывание пучковой частицы из-за взаимодействия: $MWG = BEAM \cdot (K1 + K2)$, $K_{MWG} = 2...256$. Счетчики K1 и K2 (а также S3) снабжены сервоприводами (СПШ, «Сервотехника») для точного позиционирования по вертикали и горизонтали. Программное управление позволяет автоматизировать поиск и воспроизведение их оптимальных положений на пучке, как прямом, так и отклоненном магнитом.

Для уменьшения количества вещества ФЭУ счетчиков K1,2 вынесены за пределы апертуры размещенных в этой части спектрометра трековых детекторов DT1...4 (см. далее). При этом использованы длинные (≈ 1 м) воздушные световоды из тон-

³мертвое время определяется по измеряемой MPDP-44 длительности BUSY

костенной пластиковой трубы с отражающей внутренней поверхностью. Отклик на минимально ионизирующую частицу (*m.i.p.*) для двух счетчиков составляет в среднем 5 и 3.5 фотоэлектронов (ф.э.). Измеренная с использованием штатных формирователей при типичных загрузках эффективность счетчиков составляет около 98% и 97%.

Использование в триггере двух счетчиков позволяет снизить связанную с пуассоновской статистикой неэффективность, приводящую к триггерованию нежелательными событиями, до пренебрежимого уровня. Результирующая неизбирательность MWG оценивается по отношению счетов N_{MWG}/N_{BEAM} (с учетом коэффициентов K_{TRIG}) при отсутствии мишени и составляет около 3.5%. Основной вклад дают взаимодействия в веществе на пути пучка после мишени, в основном в МЧС.

Неэффективность MWG , т.е. доля отбракованных хороших событий, определяется по данным из триггера $BEAM$ как отношение числа событий изучаемой реакции с наличием в ВЦП синхронных с триггером сигналов K1, K2 к полному числу событий реакции. В случае недостаточной статистической обеспеченности используется моделирование реакции.

В модели материал всех *Sci*-счетчиков задан как активная среда с генерированием отклика на энерговыделение. ФЭУ и световоды из пассивного пластика не моделируются.

Актуальные положения счетчиков в плоскости XY при известных Z -координатах находятся из двумерных распределений по координатам реконструированных треков вторичных частиц в событиях триггера $BEAM$ при условии (не)срабатывания соответствующего счетчика. Точность метода оценивается в ≤ 2 мм.

Неопределенности в геометрии и эффективности счетчиков K1,2 могут влиять на результаты анализа событий в триггерах MWG и $MAIN$. Во избежание этого в анализе применяется т.н. «fiducial» обрезание - требование отсутствия в событии реконструированных треков, проходящих через соответствующие круговые области, увеличенные до 80 мм.

7.3. Пучковые черенковские счетчики

Для идентификации частиц пучка используются 3 или 4 газовых черенковских счетчика (BCh1...4) однотипной конструкции: труба из дюралюминия с внутренним диаметром 18 см и длиной от 8 до 12.5 м закрыта с обоих концов герметичными светоизолирующими мембранами из PET пленки. Внутри трубы на ее выходном конце установлено под углом 45° зеркало. От зеркала свет через выходное окно в боковой поверхности трубы с герметично установленной кварцевой линзой попадает на входное окно ФЭУ в детектирующей головке счетчика. Используются ФЭУ различных типов с близким рабочим напряжением: 56AVP, XP2020, XP2020Q. Основное питание от высокопоточного высоковольтного ИП подается через резистивные делители. Подпитка последних динодов выполнена от отдельного ИП с помощью импульсного диодного выпрямителя. Для улучшения светосбора в самом длинном из счетчиков BCh1 внутри алюминиевой трубы размещена вставка из алюминизированной PET - пленки.

Счетчики используются в пороговом режиме. Состав и давление газа зависит от

задачи. Для идентификации частиц с импульсом около 29 ГэВ используется воздух с пороговыми давлениями для π , K , $\bar{p}$ соответственно около 0.04, 0.5 и 1.9 атм. Два счетчика откачиваются до давления ≈ 0.4 атм, еще один или два – до 0.9 атм. Количественная избыточность счетчиков повышает надежность идентификации, в первую очередь пион-каонной, как более важной. В экспозициях, где наряду с π/K требуется идентификация электронов (при игнорировании $\bar{p}$), два счетчика заполняются гелием до 0.30 атм (пионный порог 0.33 атм). Их сигналы объединяются программным «ИЛИ» для повышения эффективности регистрации слабого излучения.

Сигналы со счетчиков после линейного усилителя-формирователя длительности оцифровываются в ADC-32АТС – 12-ти-битных аналого-цифровых преобразователях выборочного типа (ВАЦП) с 16-ю выборками частотой 40 МГц ([6]). Алгоритм обработки «осциллограммы» ([7]) на этапе реконструкции событий позволяет восстанавливать в окне оцифровки до 5-ти импульсов на предмет наличия среди них связанного с триггером. Это существенно повышает эффективность идентификации каонов и антипротонов, в противном случае теряемых из-за черенковского излучения в событиях наложения. Процедура пучковой идентификации учитывает информацию со всех ВСЧ. В случае противоречивости показаний частица считается неидентифицированной («unknown»). Суммарный результат в долях типично такой: π – 0.962, K – 0.0146, $\bar{p}$ – 0.00176, unk – 0.0214.

Помимо считывания в ВАЦП, ВСЧ1 с быстрым кабелем и давлением воздуха выше пионного порога участвует в триггере $KBEAM = BEAM \cdot \overline{BSCh1}$, с $K_{KBEAM} = 20$, для использования аналогично случаю $BEAM$ в задачах с каонным пучком. Ввиду относительно высокого порога формирователя примерно половина событий $KBEAM$ оказывается с пионным пучком. В дальнейшем они отбраковываются при идентификации.

7.4. Пучковые трековые детекторы и спектрометр пучка

В промежутках между трубами черенковских счетчиков и магнита М15 (см. ниже) размещены пучковые пропорциональные камеры (ПК) двух конструкций. Они и все другие ПК установки используют в качестве рабочей смеси аргон – диметоксиметан в объёмной пропорции $Ar:C_3H_8O_2 = 75:25$. Подача всех компонент, используемых в газовых трековых детекторах, осуществляется с использованием электронных регуляторов расхода газа (РРГ-12, «Элточприбор») и жидкости («Bronkhorst»).

Первой по ходу пучка установлена группа из 3-х одно-координатных камер BSРC (Beam Spectrometer Proportional Chambers) с апертурой около 25×25 см² и сигнальными плоскостями типа Х по измеряемой координате, с шагом проволок 2 мм. BSРC считывается накамерными 32-канальными модулями собственной разработки TDC-32MWC [27]. Их отличительной чертой является интеграция на одной плате усилителей-формирователей (УФ) на дискретных элементах и ВЦП. Рабочее напряжение камер 3.1 кВ.

Две камеры BSРC расположены перед М15, а третья – сразу после него. Вместе с М15 они составляют основу спектрометра пучка. Магнит типа СП-7 [25] имеет длину по полюсам 6 м, зазор 20 см. Он поворачивает пучок в горизонтальной плоскости

XZ на угол 22.5 мрад, что при доступной для установки камер базе в основном и определяет разрешение спектрометра. Вторым фактором является многократное рассеяние в веществе спектрометра. Для его уменьшения по оси M15 размещена вакуумируемая дюралюминиевая труба.

При импульсе 29 ГэВ нужный угол поворота в M15 обеспечивается током **380 А**, примерно в середине проектного диапазона. Область прохождения пучка ± 80 мм от оси магнита по горизонтали существенно меньше ширины полюсов 500 мм. Поле здесь на большей части длины магнита с высокой степенью точности однородно. Вследствие этого для задачи спектрометрии не требуется знание карты поля, достаточно интеграла его главной компоненты. Однако в отсутствие детальных измерений поля он известен с недостаточной точностью. Калибровка проводится выравниванием двух средних величин по набору событий при постоянном поле: импульса пучка и суммарного импульса распадных частиц в процессе $K^- \rightarrow 3\pi^\pm$ по измерениям в основном спектрометре установки (см. далее). При реконструкции импульса на большом промежутке времени вносятся поправки на вариации поля M15, типично на уровне $\leq 1\%$.

Ниже последней по пучку BSPC рассредоточена группа из 4-х двухкоординатных (XY) камер НРС (Hexagonal PC) [26] с повышенной плотностью и гексагональной геометрией расположения проволок.

Камеры снабжены накамерной электроникой на основе вновь разработанного на ВЕС комплекта, описанного в [10]. Ввиду особой конструкции НРС переходная плата ПП-1 не используется, сигналы с проволок подаются на УФ по традиционным витым парам коротких проводов. Сформированные парафазные сигналы в уровнях LVDS с 4-х УФ поступают на переходную плату ПП-2 с модулем ВЦП TDC-96MWC по плоским кабелям длиной около 30 см. Порог УФ НРС, управляемый из TDC-96MWC через ПП-2, типично устанавливается около 2.5 мкА. Рабочее напряжение камер при этом составляет 1.1 кВ.

Группа НРС служит главным образом для точного восстановления траектории частицы пучка непосредственно на входе в основную часть установки. При отсутствии наклонных камер в пучковой части проекции трека в плоскостях XZ и YZ не связываются, поэтому в событии однозначно реконструируется (раздел 12) не более одного пучкового трека. События с неоднозначностью реконструкции пучка отбраковываются. Эффективность реконструкции пучка около 95%.

Для повышения эффективности и точности измерений последняя BSPC также используется для восстановления трека, а две первые НРС – для измерения импульса.

Всего трековые детекторы пучковой части насчитывают 11 плоскостей, более 600 каналов измерений. Импульсное разрешение пучкового спектрометра составляет около 0.8%. Угловая точность восстановления пучкового трека – около 0.12 мрад.

8. Мишенная часть

Основная часть измерений на ВЕС выполнена с мишенью из ^9Be толщиной 40 мм, что составляет около 10% от длин ядерного взаимодействия и радиационной. Использовались также мишени из графита 30 мм, полиэтилена 60 мм, свинца 3.39

мм и другие. Все они имеют форму цилиндра диаметром 45 мм, что близко к поперечному размеру пучка в месте ее размещения при $Z \approx -220$ см. Мишень вставляется в сквозное отверстие в держателе - поглотителе – алюминиевой квадратной призме размерами $X \times Y \times Z = 12 \times 12 \times 15 \text{ см}^3$ (рис.5). Со стороны входа пучка и до глубины, на которой размещается мишень, отверстие цилиндрическое, а далее переходит в расширяющийся усеченный конус. Раскрытие конуса достаточно для пропуска продуктов фрагментации пучка в апертуру спектрометра установки.

К держателю с 4-х боковых сторон прилегает двухслойная вето-система, образуя «домик» с внешними размерами (по активной части) около $30 \times 30 \times 39 \text{ см}^3$. Она служит для подавления событий с заряженными частицами и гамма-квантами – продуктами взаимодействия в кинематической области фрагментации мишени, выходящими под большими углами. Внутренний слой системы составляют 8 прямоугольных в плане *Sci*-счетчиков с чувствительной областью $21 \times 19.5 \text{ см}^2$ (без учета световодов) толщиной 23 мм, уложенных в два ряда по оси Z, внешний – 8 таких же по площади счетчиков типа «сэндвич» из 5-ти пар слоев свинец–сцинтиллятор (оба по 5 мм) в легком алюминиевом корпусе.

Мишень в держателе находится по глубине примерно на стыке двух рядов счетчиков, так что один ряд перекрывает грубо переднюю, а другой заднюю полусферу области фрагментации мишени. Держатель - поглотитель подавляет нежелательные срабатывания внутренних счетчиков вето от низкоэнергичных протонов отдачи и дельта-электронов.

Выходное окно домика сформировано двумя дополнительными передними сэндвичами, установленными перпендикулярно направлению пучка с раздвижкой на ≈ 10 см по горизонтали, и двумя свинцовыми конверторами между ними, раздвинутыми на ≈ 8 см по вертикали. Сэндвичи высотой 20 см и шириной 12 см имеют 7 пар слоев. Толщина конвертора 20 мм. Передние счетчики и конверторы закрывают в проекционной геометрии щели в телесном угле между боковыми сэндвичами и апертурой ЭМК, улучшая «герметичность» установки для гамма-квантов из области мишени. Роль конверторов заключается в вызове срабатываний от конверсионных электронов (позитронов) на периферии головных трековых детекторов спектрометра с их последующим учетом при анализе событий. Вето-домик показан на рис. 6

Все вето-счетчики снабжены ФЭУ-85 с резистивными делителями и внешней подпиткой последних динодов. От слабого (~ 20 Гс) рассеянного поля основного магнита установки ФЭУ защищает двойной экран из стали и пермаллоя.

Измеренный до сборки счетчиков в домик отклик на нормальное пересечение счетчика мюоном (*m.i.p.*-сигнал) составляет в среднем ~ 20 (50) ф.э. для сэндвичей (сцинтилляторов).

Сигналы счетчиков поступают в ADC-32АТС. Помимо этого, логическая сумма *VETO* сигналов двух передних «сэндвичей» и 8-ми *Sci*-счетчиков участвует в триггере $MAIN = MWG \cdot \overline{VETO}$. Пороги дискриминаторов в 5–10 раз меньше сигнала *m.i.p.*, что соответствует 2...5 ф.э.

Счетчики с весьма высокой чувствительностью к энерговыделению (< 1 МэВ) находятся в зоне интенсивного облучения смешанного состава со сложным энергетическим спектром с немонотонной зависимостью отклика. Спектры излучения от мишени деформированы наличием держателя-поглотителя. Соответствующие ам-

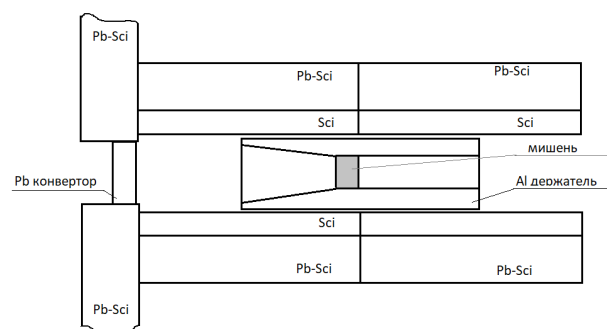


Рис. 5. Схема мишенной части ВЕС в разрезе. Пучок входит справа.

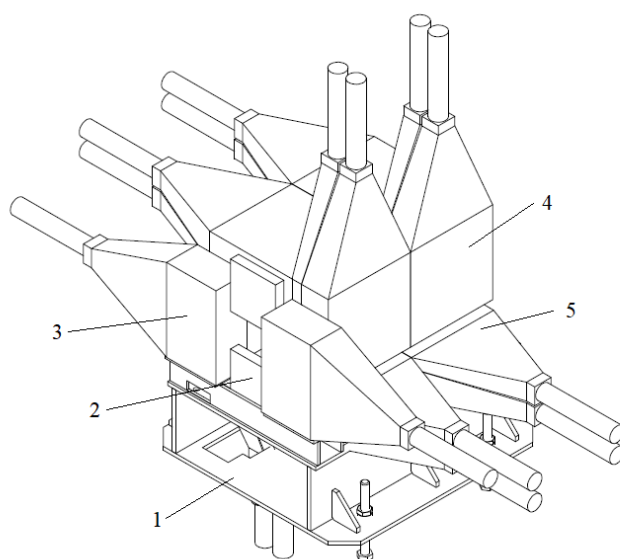


Рис. 6. Вид на мишенный «домик» со стороны выхода пучка: (1) подставка, (2) конвертор, (3) передний «сэндвич», (4) боковой «сэндвич» внешнего слоя, (5) боковой *Sci*-счетчик внутреннего слоя.

плитудные спектры не содержат явно выраженных структур.

Для калибровки энергетической шкалы счетчиков служат пики различной степени выраженности в специально построенных спектрах 2-х видов. Один – от прохождения околопучковых частиц в триггере *HALO*. Второй – преимущественно от космических мюонов в триггере *COSMIC*, который является логической суммой двойных совпадений сигналов противоположно размещенных триггерных вето-счетчиков. В отличие от частиц *HALO*, космические мюоны имеют нетривиальное угловое распределение, модифицирующее амплитудные спектры. Кроме того, для набора их значимой статистики требуется время, сравнимое с длительностью всего сеанса. Для непрерывного быстрого мониторингирования работоспособности счетчики снабжены светодиодами.

Интенсивность импульсов с отдельного счетчика при прохождении пучка достигает $(2-3) \cdot 10^5/\text{с}$. Большинство срабатываний вызваны непосредственно попаданием в счетчик частиц гало или вторичных частиц от взаимодействий и привязаны к ним по времени. Наряду с прямыми есть задержанные срабатывания, обусловленные наличием пучка. Вероятные источники – активация материалов мишенной части и медленные диффузно распространяющиеся нейтроны, наблюдаемые в экспериментальном зале на масштабе более секунд после вывода частиц из ускорителя. Не исключены также послеимпульсы ФЭУ.

Использование ВАЦП позволяет отделить сигналы, ассоциированные по времени с интересующим событием, от фоновых сигналов в событиях наложения и задержанных сигналов разного происхождения. Вклад фоновых срабатываний в триггере определяется длительностью сформированных сигналов при выработке логических функций, типично 20 нс.

Модель мишенной части установки входит в состав общей модели установки. Заданы геометрия и материалы мишени, держателя, вето-счетчиков (без световодов и ФЭУ) и конверторов. Излучение и распространение фотонов сцинтилляции, как и отклик ФЭУ, не моделируются, а учитываются линейными коэффициентами пересчета энерговыделения в сцинтилляторе в отклик данного счетчика. Введена нелинейность отклика при высокой плотности ионизационных потерь в виде закона Биркса с коэффициентом $k_B = 8.3 \cdot 10^{-3} \text{ г} \cdot \text{МэВ}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$, несколько меньшим полученных в [28] для других марок пластических сцинтилляторов. Кроме того, разыгрываются флуктуации числа фотоэлектронов $N_{p.e.}$. Отклик ВАЦП получается симуляцией оцифровки импульса заданной формы с амплитудой $A_{pulse} \propto N_{p.e.}$. На последнем этапе моделирования отклика добавляется фон событий наложения.

Таким образом, потеря части событий из-за наложений, срабатывания вето на отдачу и на энергичные δ -электроны учитывается в модельном вычислении эффективности для данного процесса. Что касается процессов с фрагментацией мишени, то будучи по назначению вето-системы подавленными в основном триггере, они могут составлять фон к изучаемой реакции.

Роль вето-системы проиллюстрируем на примере дифракционного образования системы $3\pi^\pm$. На рис. 7 показаны спектры событий в триггере *MWG* по квадрату недостающей массы $MM2 = (\hat{P}_{3\pi} - \hat{P}_{beam} - \hat{P}_{target})^2$, где $\hat{P}$ – 4-импульсы частиц (систем), при различных требованиях на активность вето-системы из 18-ти счетчиков. Гауссово - подобный спектр при отсутствии срабатываний соответствует нуклону

отдачи с учетом разрешения, которое определяется характеристиками пучкового и основного спектрометра (см. соответствующий раздел). Появление в спектре плеча при требовании срабатывания 2-х и более счетчиков является свидетельством реакции с возбуждением нуклона в состояния $N^*(1420)$ и другие, с испусканием распадных нуклона и пиона(-ов) с низкой энергией в вето-систему:

$$\pi^- N \rightarrow N^* 3\pi^\pm, \quad N^* \rightarrow N\pi_{soft}(\pi_{soft} \dots)$$

На рис. 8 продемонстрирована работа вето в триггере. Отношение $R = N_{3\pi}^{MAIN} / (N_{3\pi}^{MWG} \cdot K_{MWG})$ количества событий системы $3\pi^\pm$ при $MM2 \sim M_N^2$ за счет фоновых срабатываний вето несколько меньше единицы и падает в области $MM2 > M_{N^*}^2$ до уровня, зависящего от эффективности подавления вето-системой реакции с N^* и отношения ее сечения к сечению реакции без возбуждения нуклона.

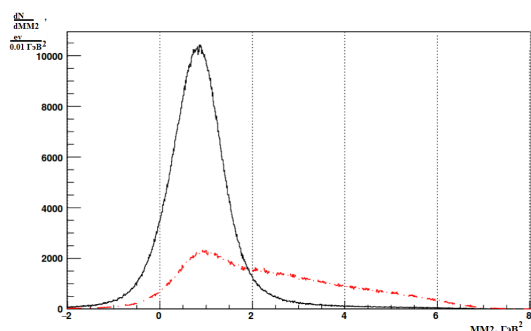


Рис. 7. Распределение по квадрату недостающей массы для системы $3\pi^\pm$ в триггере MWG при множественности M срабатываний вето-системы: $M=0$ (черная сплошная гистограмма) и $M>1$ (красная пунктирная).

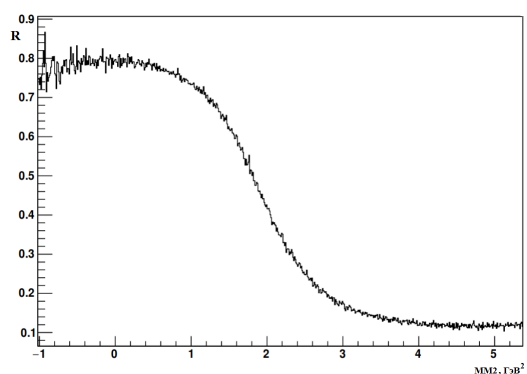


Рис. 8. Отношение количества событий системы $3\pi^\pm$ в триггерах $MAIN$ и MWG (с учетом коэффициента разреживания) как функция квадрата недостающей массы.

9. Основной спектрометр

Для измерения 3-импульсов и знака предположительно единичного заряда вторичных частиц служит магнитный спектрометр в составе магнита и трековой системы из детекторов разного типа, размещенных перед магнитом, в его зазоре и после него.

9.1. Спектрометрический магнит

Магнит спектрометра установки ВЕС, т.н. М13, представляет собой диполь с железным ярмом и межполюсным воздушным зазором 1 м. Ширина полюсов поперек пучка около 2 м, длина по пучку 1.5 м. Масса ярма около 200 т. При рабочей полярности отрицательно заряженные частицы отклоняются в отрицательном направлении, к У-70. Для уменьшения рассеянных полей магнита на его входе (выходе)

установлены с зазором около 60 мм два (три) железных экрана толщиной 50 мм с центральным отверстием по апертуре магнита.

Верхняя и нижняя обмотки магнита суммарной массой около 22 т изготовлены из медной трубы сечением $30 \times 30 \text{ мм}^2$ с круглым отверстием 12 мм для протока охлаждающей воды. В обмотке 162 последовательно соединенных по току витка, конструктивно выполненных в виде 9-ти т.н. галет, каждая из 2-х ветвей по 9 витков. Ветви подсоединяются к трубопроводу параллельно через изолирующие шланги, каждая снабжена на выходе 2-х-ступенчатым («предупреждение» и «авария») электроконтактным термометром и реле давления. Суммарное сопротивление двух обмоток составляет 83 мОм.

При проектном токе обмоток магнита 5 кА основная вертикальная компонента поля в центре зазора составляет 1.222 Тл. При этом значении тока с использованием 3-х координатного датчика Холла была измерена 3-х-мерная карта поля с шагами по X,Y,Z соответственно 4, 4 и 2 см, всего в $60 \times 23 \times 254 = 350520$ узлах. Также была измерена зависимость поля в центре от тока. Датчик был откалиброван по ЯМР измерителю.

При рабочем токе 4 кА поле в центре составляет 1.087 Тл, интеграл поля ~ 2.1 Тл·м (соответствующий поперечный импульс около 0.6 ГэВ). При этом потребляемая мощность ~ 1.3 МВт, расход воды около 10 л/с при перепаде давления около 10 атм, разница температур воды на входе и выходе около 15°C .

Для тока 4 кА был проведен расчет поля методом конечных элементов с использованием программы ANSYS. Модель магнита состоит из ярма, полюса, полюсного наконечника, экранов, подложек, воздушных зазоров, двух обмоток. Условия на бесконечности для поля учитывались с помощью «бесконечных» элементов, построенных на внешней границе воздушного объема конечноэлементной модели. Предполагалось, что все детали, кроме двух латунных подложек, изготовлены из стали 10, и в расчетах использовалась соответствующая таблица нелинейной зависимости магнитной проницаемости от величины магнитной индукции поля. Для сравнения были также выполнены расчеты с использованием в модели сталей ARMCO и Ст3. За основу при построении геометрической модели магнита была взята конструкторская документация, дополненная (уточненная) подробными натурными измерениями геометрии. В результате в уточненной модели отсутствуют присущие проекту плоскости симметрии, число конечных элементов сетки достигло предела расчетных возможностей на тот момент в 1200000.

Проверочный расчет на 5кА показал удовлетворительное согласие с измерениями в пределах 0.5% в отдельных точках значимого для трекинга поля. Исходя из применения магнита как спектрометрического, более адекватной оценкой соответствия модели представляются интегралы поля. Их можно выразить через т.н. эффективные длины магнита. Векторная эффективная длина магнита определяется как

$$\vec{L}(X, Y) = \frac{1}{B_0} \int_{-\infty}^{+\infty} \vec{B}(X, Y, Z) dZ$$

где B_0 – значение поля в центре магнита, и вычисляется как дискретная сумма по узлам измерительной сетки. Так, вычисленная длина $L_{calc}(0, 0) = 190.9$ см (интеграл поля $2.33 \text{ Тл} \cdot \text{м}$) для основной компоненты поля B_Y отличается от измеренной $L_{meas}(0, 0)$ на 0.1%.

Еще один практичный интегральный критерий сравнения двух карт поля - величина расхождения траекторий частиц в этих полях. Для измеренного и расчетного полей были численно смоделированы по 100000 траекторий частиц, «выпущенных» из точки в центре положения мишени в апертуру магнита под разными углами и с разными импульсами. Расстояние в поперечной плоскости ХУ при разных значениях Z в пределах спектрометра между двумя траекториями одной и той же частицы в большинстве случаев не превышает 200 мкм, что ниже разрешения трековых детекторов.

9.2. Трековая система спектрометра

Структура трековой системы в целом соответствует описанию в [1], но часть камер и практически вся электроника модернизированы или полностью заменены. Основные данные сведены в табл. 3.

Сразу после мишенного «домика» установлена подвижная платформа для головных ПК, в рабочем положении придвинутая почти к полюсам магнита. Первыми следуют три двухкоординатные камеры, аналогичные по конструкции описанным в [29] и условно именуемые RED. Пары плоскостей в них по измеряемой координате соответственно типов ХУ, ХУ, UV (наклонены на 15° от вертикали и горизонтали). Сигналы усиливаются УФ на основе ранней версии ИС ОКА-1М разработки НЦ ФЧВЭ БГУ (г. Минск) Эта группа – единственная часть трековой системы, считываемая в МИСС, а именно в ВЦП ЛЭ-78. Рабочее напряжение камер 2.9 кВ.

Пять следующих двухкоординатных камер на платформе, называемые РС 40х60, типа ХУ, при сохранении их конструктива и места установки как в [1], подверглись глубокой модернизации [10]. Они используют комплекты накамерной электроники с порогом УФ около 4 мкА на рабочем напряжении 3.2 кВ.

После головных ПК, в зазоре магнита, установлены две двухплоскостные однокординатные (Х типа) дрейфовые камеры (ДК) с малым дрейфовым зазором, называемые по материалу несущих рамок INOX. Эти камеры снабжены накамерными модулями TDC-32MWC, как в BSPC. ДК работают на той же газовой смеси, что и все ПК, при напряжении 1.75 кВ как на катодах, так и на полевых проволоках.

Наиболее существенно в сравнении с первоначальной версией [1] была модифицирована система широкоапертурных камер в конце спектрометра. Здесь установлены четыре 2-х-координатные станции дрейфовых трубок (DT).

Три первые, DT1...3 из ПЭТ-трубок внешним диаметром 30 мм с измеряемыми координатами соответственно ХУ, UU' (повернуты на $\pm 15^\circ$ от вертикали), ХУ и апертурой (грубо) $2.4 \times 2 \text{ м}^2$, представлены в [31]. В центре двух центральных трубок каждого слоя на длине 60 мм устроена нечувствительная область (Dead Zone) для пропуска интенсивного пучка без газового усиления. На рис.9 показана камера типа ХУ в процессе сборки. Видны торцы Y-трубок до установки концевых плат. Красным прямоугольником в центре камеры помечена нечувствительная область.

Последняя станция DT4 [32] (рис. 10) типа ХУ имеет активную площадь в форме креста с размерами более $2 \times 2 \text{ м}^2$ и предназначена для усиления возможностей по 2-х-трековому разрешению в центральной зоне этой части трековой системы. С этой целью она изготовлена из ПЭТ - трубок внутренним диаметром 15 мм, которые

Камера	Коорд. (угол)	Число сигн. проволок; шаг (мм); диаметр (мкм)	Тип элементной базы УФ и порог; ВЦП	Газ. смесь; раб.напр., кВ
HPC 1-4	X (0°)	32, 2 (в 2-х слоях); 20	ИС ОКА-2ВС, 2.5 мкА; TDC-96MWC	Ar:C ₃ H ₈ O ₂ 1.1
	Y (90°)	32; 2 (в 2-х слоях); 20		
BSPC 1-3	X	128; 2; 20	Дискретный, 1 мкА; интегрирован с TDC- 32MWC	Ar:C ₃ H ₈ O ₂ 3.1
PC RED 1	X	160; 2; 20	ИС ОКА-1М, 1.5 мкА; ЛЭ-78	Ar:C ₃ H ₈ O ₂ 2.9
	Y	144; 2; 20		
PC RED 2	X	160; 2; 20		
	Y	128; 2; 20		
PC RED 3	U (15°)	224; 2; 20		
	V (105°)	192; 2; 20		
PC 40x60 1-5	X	288; 2; 30	ИС ОКА-2ВС, 3. мкА; TDC-96MWC	Ar:C ₃ H ₈ O ₂ 3.2
	Y	192; 2; 30		
INOX 1,2	X	два слоя по 320; 6; 30	Дискретный, 1 мкА; интегрирован с TDC- 32MWC	Ar:C ₃ H ₈ O ₂ 1.75
DT1,3	X	три слоя по 80; 30.035; 50	Дискретный (AD- 8DT), 1 – 1.5 мкА; TDC-48DT	Ar:CH ₄ 2.8
	Y	три слоя по 64; 30.035; 50		
DT2	U, U' (±15°)	три слоя по 88; 30.035; 50		
DT4	X, Y	три слоя по 48; 15.46; 50	Дискретный (AD- 8DT), 1 – 1.5 мкА; TDC-48DT	Ar:CH ₄ 2.3

Таблица 3. Сводная таблица по трековым детекторам, включая пучковые.

благодаря их кратно лучшей нагрузочности не требуют устройства ДЗ. Наличие ДТ4 дает возможность, в частности, с приемлемой точностью измерять треки прямого и упруго рассеянного пучка. Уменьшение диаметра трубок при их большой длине вызвало существенное снижение жесткости трубок и узлов конструкции, что потребовало от разработчиков и эксплуатантов дополнительных конструкторских и технологических решений.

Все ДТ укомплектованы размещенными на концевых платах 8-ми-канальными УФ на дискретных компонентах собственной разработки AD-8DT (рис. 11) и на-камерными 48-канальными ВЦП ТДЦ-48ДТ [33]. Применение во всех ДТ аргон - метановой смеси $Ar:CH_4 = 75:25$ с близкой к насыщению повышенной скоростью дрейфа дает почти линейную $r(t)$ -зависимость «время – расстояние», с максимальным временем дрейфа в трубках 30 мм менее 250 нс (рис.12).



Рис. 9. Камера из трубок 30 мм.

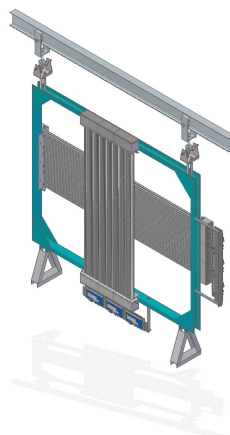


Рис. 10. Общий вид ДТ4 с технологическими опорами и несущей балкой.

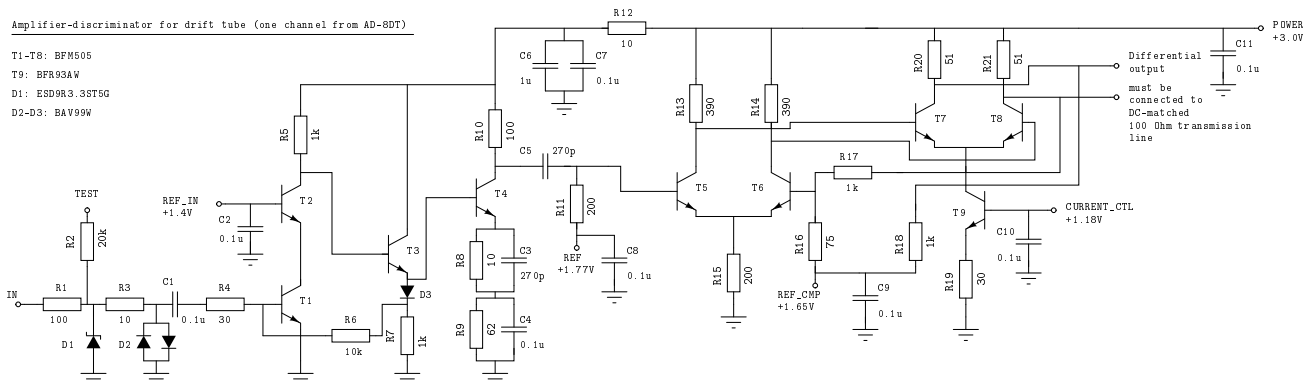


Рис. 11. Принципиальная электрическая схема одного канала усилителя для ДТ.

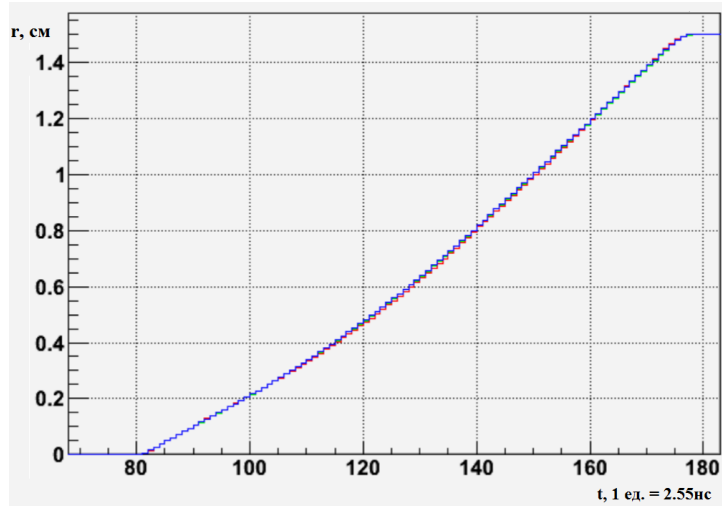


Рис. 12. Дрейфовое расстояние в DT в зависимости от времени (в единицах ВЦП).

Непосредственно перед DT1 установлен свинцовый конвертор толщиной 20 мм. Он представляет собой две вертикальные полосы, перекрывающие справа и слева периферию DT1 и оставляя открытым центр чувствительной области, около 1.9 м в ширину. Перед DT3 установлен второй конвертор такой же толщины в форме прямоугольника $\approx 2.6 \times 1.9 \text{ м}^2$ с 8-ми угольным отверстием, апертура которого проекционно соответствует ЭМК (см. далее). Большие конверторы установлены с той же целью предотвращения «утечек» гамма-квантов, как и малый конвертор в области мишени.

Необходимые для реконструкции треков (см. раздел 12) геометрические параметры трековых детекторов происходят из 3-х источников: конструкторская документация, натурные (геодезические) измерения и программное выравнивание (*alignment*).

В процедуре выравнивания положения двух измерительных плоскостей в системе координат установки фиксируются из геодезических измерений. Параметры остальных плоскостей трековых детекторов, одна за другой, определяются методом подгонки с использованием массива событий с прямыми (при нулевом токе M13) треками, в том числе от пучковых мюонов и от взаимодействий в мишени. В общем случае подгоночных параметров три: положение по оси Z, положение по измеряемой координате (перпендикулярно проволокам) и угол, на который эта ось координат отклонена от оси X.

Для пучковых детекторов из-за малых поперечных размеров и углов расходимости пучка определяется только сдвиг перпендикулярно проволокам, остальное фиксируется из геодезических измерений. Для многослойных детекторов DT подгонка выполняется с наложением связей на жестко определяемые конструкцией расстояния между слоями и их взаимное смещение на пол-шага.

В измерениях при нулевом токе в пучковом магните M15 для программного выравнивания камер BSPC в качестве триггерного используется счетчик S0 – единственный до этого магнита.

Отметим, что положения не-трековых детекторов (элементов) установки – сцин-

тиляционных счетчиков, ЭМК, Ch-28, мишени, конверторов – уточняются в дальнейшем по анализу событий с реконструированными треками, то есть относительно трековой системы. При этом результаты реконструкции ввиду большой апертуры M13 и хорошей однородности поля в ее значительной части не чувствительны к малым смещениям (сдвигам и поворотам) всей установки как целого относительно «абсолютной» системы координат, связанной с этим магнитом.

Для нахождения (псевдо)эффективности и разрешения всех трековых детекторов используется программная процедура (*effres*) на основе подхода, общеупотребительного при условии достаточной переопределенности трековых измерений: восстанавливаются треки частиц без использования изучаемого детектора, эффективность считается как вероятность (подходящего по времени и месту) срабатывания в нем на трек, разрешение характеризуется распределением расстояний срабатываний от трека. При достаточности статистики производится построение двумерных карт этих величин – для каждой проволоки и с разбиением вдоль нее на несколько областей. Полученные карты используются в программе *bcs* для эффективного моделирования срабатываний детекторов без описания механизмов. Разрешения также используются в реконструкции треков для задания окон при их поиске и характеристизации качества трека (методом χ^2).

Усредненное по детектору и по времени координатное разрешение всех ДТ оценивается в $\sigma \approx 0.4 - 0.5$ мм. Оно включает ряд источников: собственное разрешение трубок, точность крупноузловой сборки, перепад давления при продуве детектора, временные вариации внешних температуры и давления, дискретность оцифровки, а также эффекты измерительной процедуры.

Суммарно в 44-х слоях трековых детекторов магнитного спектрометра ВЕС насчитывается более 6.3 тысяч измерительных каналов. Результирующее угловое разрешение спектрометра составляет около 0.3 мрад в двух основных плоскостях (XZ , YZ). Импульсное разрешение, полученное в модели, показано на рис. 13. Оно составляет около 0.5% при 3 ГэВ и 1.2% при 25 ГэВ. В простейшей модели магнитного спектрометра разрешение параметризуется в виде $(\sigma_p/p)^2 = a \cdot p^2 + b^2$, где первый член отвечает разрешению по углу поворота трека, а второй - вкладу многократного рассеяния. На графике для иллюстрации наложена эта параметризация с $a = 1.5 \cdot 10^{-7} \text{ ГэВ}^{-2}$, $b^2 = 2 \cdot 10^{-5}$.

Типичное разрешение по координатам вершины взаимодействия, определяемой как точка наилучшего сближения треков, включая пучковый, составляет $\sigma(V_{X,Y}) \approx 1$ мм, $\sigma(V_Z) \approx 1$ см, за исключением событий с одним вторичным треком под малым углом.

10. Многоканальный черенковский счетчик

Детектор с обозначением Ch28 предназначен для идентификации частиц в много-частичных состояниях и имеет 28 регистрирующих каналов. Зеркала из полиметилметакрилата с алюминиевым напылением, номинально сферические, двух размеров с радиусами 1 и 2 м и прямоугольные в плане с размерами соответственно $15 \times 29 \text{ см}^2$ и $30 \times 53 \text{ см}^2$. Малые установлены в центральной части, большие на периферии. Зеркала повернуты относительно горизонтальных осей (примерно X) на углы $\pm 45^\circ$, для

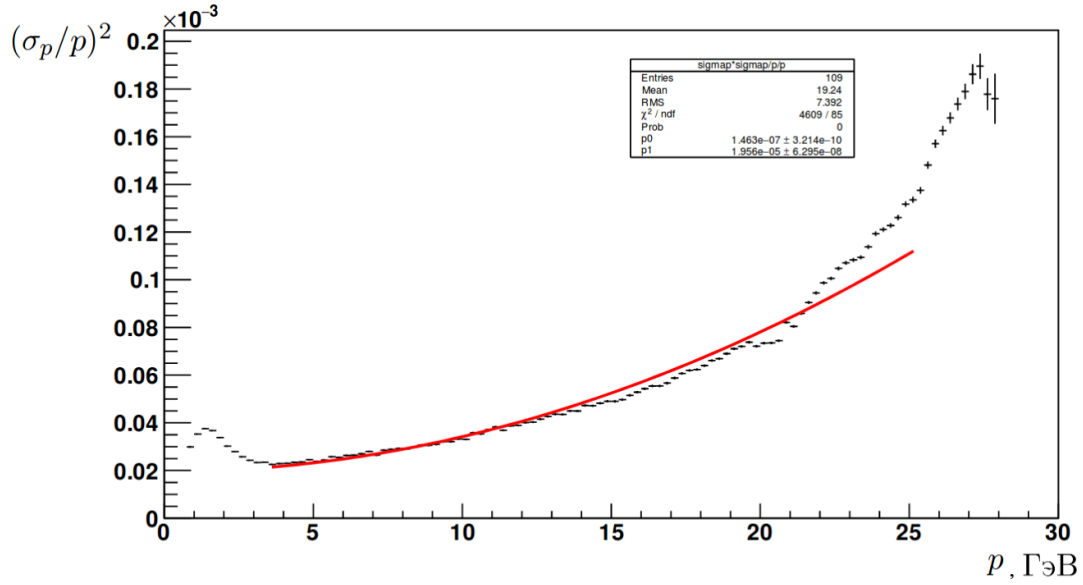


Рис. 13. Импульсное разрешение спектрометра, полученное моделированием. Гладкая кривая – функция $(\sigma_p/p)^2 = 1.5 \cdot 10^{-7} \text{ ГэВ}^{-2} \cdot p^2 + 2 \cdot 10^{-5}$.

направления света на ФЭУ, расположенные в два ряда сверху и снизу объема Ch28. Сигналы с ФЭУ после усилителей поступают на амплитудный анализ. Узкая часть радиатора Ch28 с апертурой несколько меньше чем у магнита вдвинута в межполюсной зазор. Объем детектора около 8 м^3 заполнен фреоном-22 при атмосферном давлении, соответствующий пороговый импульс для пионов около 3.5 ГэВ.

Для мониторингирования детектора имеются светоизлучающие диоды, запускаемые по триггеру *LED*.

Самая востребованная задача – пион-каонная идентификация. В основном используется пороговый метод: тестируется наличие сигнала выше некоторого порога в АЦП канала(-ов) с зеркалом(-ами) в вероятной области излучения с треков. Результат сопоставляется с модельными предсказаниями при различных гипотезах о сортах частиц.

В общем случае картина срабатываний и проверяемая гипотеза охватывает все n_{ch} заряженные частицы события, так как области их излучения могут перекрываться, а гранулярность Ch28 не достаточна для восстановления соответствующих колец. При k сортов частиц полное число гипотез $N_{hyp} = k^{n_{ch}}$. Часть из них могут отвечать одинаковому по составу состоянию с точностью до перестановки частиц. Набор гипотез может быть ограничен на основе физических предположений. Если самая достоверная из гипотез не имеет достаточного преимущества над конкурирующими, событие считается неидентифицированным. Типичные случаи – не попадание какого-либо трека в радиатор Ch28; импульс ниже 3.5 ГэВ. Параметр идентификации α вводится как отношение правдоподобия гипотез. Значение параметра определяет баланс между ее эффективностью и чистотой – долей ложно идентифицированных событий в наборе выделенных.

На рис. 14 показаны экспериментальная и модельная эффективности идентифи-

кации пиона в реакции $\pi^- N \rightarrow N X^- (= \pi^-) 2\pi^0$ как функция его импульса. Экспериментальный график получен исходя из пренебрежительно малой примеси каонов в событиях данной топологии при данных энергиях пучкового пиона.

На рис. 15 показана эффективность идентификации каона в процессе $\pi^- N \rightarrow N, a_2^-(1320) \rightarrow N, K^- K^0 \rightarrow N, K^- 2\pi^0$ как функция α . Эффективность в эксперименте измерена с помощью «мечения» заряженного каона по сигналу $K^0 \rightarrow 2\pi^0$.

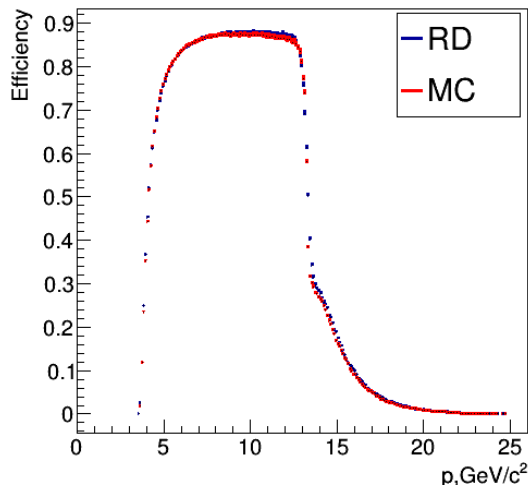


Рис. 14. Эффективность идентификации заряженного пиона в системе $\pi^- 2\pi^0$ в зависимости от его импульса в эксперименте (синим) и в модели (красным).

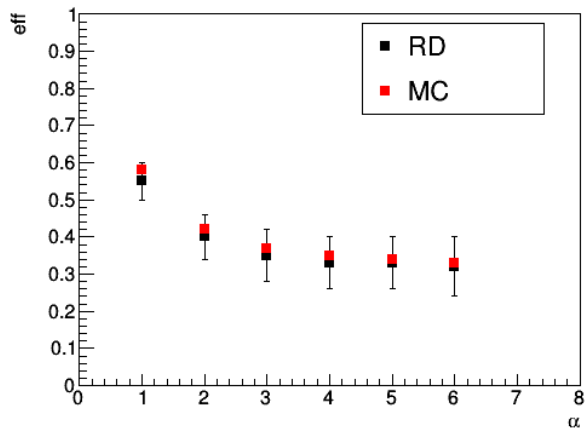


Рис. 15. Эффективность идентификации каона в процессе эксклюзивного образования $a_2^-(1320) \rightarrow K^- K^0 \rightarrow K^- 2\pi^0$ в зависимости от параметра идентификации α в эксперименте (черным) и в модели (красным).

Детальное описание устройства МЧС, его моделирования и использования в идентификации дано в [3]. Ниже приведены произведенные улучшения.

Использование для оцифровки сигналов ВАЦП ADC-32АТС вместо ИАЦП ЛЭ-71 позволило улучшить подавление фоновых импульсов наложений, эффективно описываемых в аналитической модели МЧС параметром шума ϵ . Аналогично модели вето-счетчиков, в программе *bcs* отклик ВАЦП в МЧС на основное событие моделируются по заданной форме импульса, к нему добавляется фон наложений.

Благодаря пособытийному вычитанию пьедесталов в ВАЦП также уточнены распределения одноэлектронных импульсов (р.о.и.) ФЭУ, используемые для моделирования откликов МЧС.

Наряду с трудоемкими нерегулярными измерениями показателя преломления с использованием интерферометра ЛИР-1 внедрено непрерывное автоматизированное измерение состава бинарной смеси «фреон–воздух» по резонансной частоте звука ([20]). При компенсирующей утечку подаче фреона через РРГ-12 на уровне около 10 л/ч достигнута многосуточная стабилизация примеси воздуха в смеси на уровне 4.5–5.5%.

11. Электромагнитный калориметр

ЭМК ВЕС собран из 1551-го счетчика двух поперечных размеров типа «шашлык» – свинец-сцинтиллятор со спектросмещающими волокнами. Укладка счетчиков в плане представляет собой неправильный 8-ми-угольник (прямоугольник со срезанными углами). Конструкция счетчиков и всего ЭМК, система высоковольтного питания ФЭУ и другие подсистемы, процедура калибровки ЭМК на электронном пучке подробно описаны в [2].

Для уменьшения объема данных с ЭМК на аппаратном уровне отбрасываются показания, не превышающие пьедестальное значение на заданный порог в 4 отсчёта АЦП, при типичном среднеквадратичном шуме 1-2 отсчёта. Поканальные пьедесталы многократно измеряются вне фазы вывода пучка аппаратным компьютером через контроллер сектора, усредняются и заносятся в систему амплитудного анализа раз в цикл.

Энергетическое разрешение измерялось на пучке электронов в широком диапазоне энергий подгонкой спектров гауссовой функцией (рис.16). Есть основания полагать, что центральные значения энергии пучка были систематически смещены. В силу этого обстоятельства не приводится принятая параметризация $\sigma_E/E = a/\sqrt{E} \oplus b$. Тем не менее, сами величины относительного разрешения, такие как 3.5% при $E \approx 5$ ГэВ и 2.7% при $E \approx 10$ ГэВ, являются хорошей оценкой сверху, так как не учтен вклад энергетического разброса пучка.

Гауссовское координатное разрешение в области малых счетчиков, полученное в модели для нормального падения гамма-квантов на фронтальную плоскость ЭМК, следует параметризации $\sigma_X = (4.6/\sqrt{E(\text{ГэВ})} \oplus 2.3)$ мм (рис. 17). Для больших счетчиков среднеквадратичное отклонение существенно не гауссова распределения описывается как $\sigma_X = (8.7/\sqrt{E(\text{ГэВ})} \oplus 7.3)$ мм.

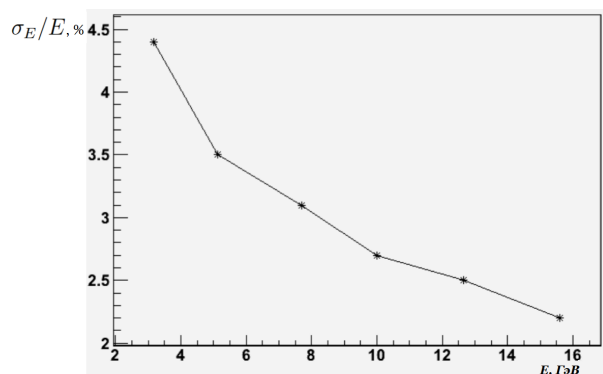


Рис. 16. Зависимость энергетического разрешения ЭМК от энергии электронного пучка.

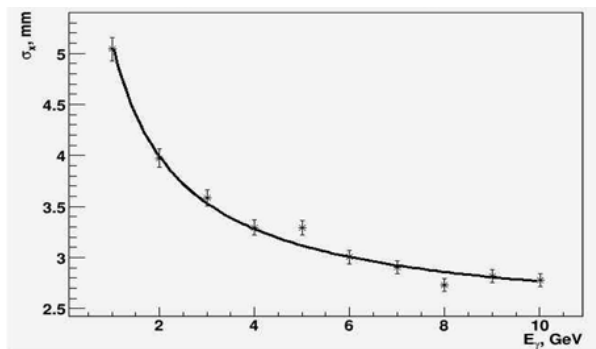


Рис. 17. Модельная зависимость координатного разрешения ЭМК в области малых счетчиков от энергии гамма-кванта, падающего нормально к поверхности ЭМК.

Модель ЭМК включает:

1. описание счетчика в виде структуры, период которой состоит из активного слоя

- Sci и пассивного, усредненно учитывающего вклад остальных элементов конструкции (веществ) - свинца, бумаги, волокна, стальных спиц, воздуха;
2. единое для всех счетчиков линейное преобразование энергосвечения в активном слое в интенсивность излучения. Процессы сцинтилляции, транспорта фотонов, переизлучения не моделируются;
 3. единый для всех счетчиков параметризованный учет затухания света (в долях) в зависимости от расстояния слоя до ФЭУ;
 4. линейное преобразование суммарного количества света на ФЭУ в среднее число фотоэлектронов $\langle N_{p.e.} \rangle$, по одному общему коэффициенту для больших и малых счетчиков;
 5. розыгрыш флуктуаций числа фотоэлектронов и линейное преобразование фактического $N_{p.e.}$ в отклик A_{raw} . Произведение коэффициентов всех линейных преобразований имеет смысл калибровочного коэффициента данного счетчика и устанавливается согласно электронной или π^0 -калибровке (см. раздел 12);
 6. учет шума: аддитивная добавка к A_{raw} гауссова шума, соответствующего размытию пьедестальных значений, или (альтернативно) добавление шума событий наложения;
 7. дискретизация отклика 12-ти битного ИАЦП с учетом аппаратных порогов снизу и сверху.

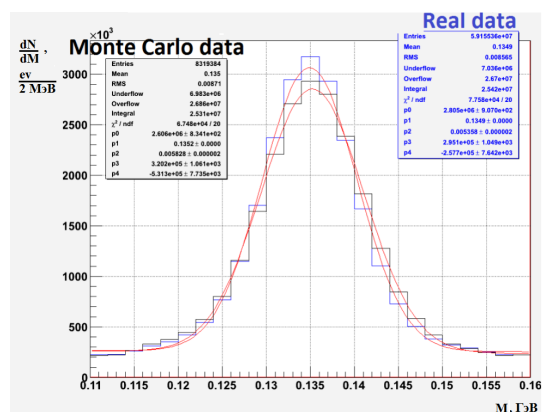


Рис. 18. Распределение событий $\pi^-2\pi^0$ по инвариантной массе двух гамма-квантов в модели (черным) и в эксперименте (синим).

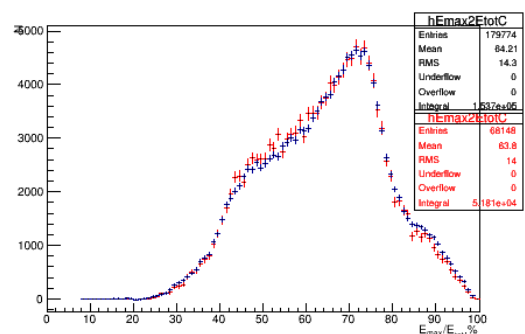


Рис. 19. Распределения по доле энергии гамма-кванта из событий $\pi^-2\pi^0$, выделенной в центральном счетчике ливня: модель (красным) и реальные данные (синим).

На рис. 18 и 19 показаны распределения модельных и экспериментальных событий системы $\pi^-2\pi^0$ соответственно по инвариантной массе двух гамма-квантов и по доле энергии гамма-кванта, выделенной в центральном счетчике ливня.

Немаловажным обстоятельством для измерений процессов с гамма-квантами на ВЕС является сравнительно малое количество вещества на их пути до ЭМК, сосредоточенного в основном в мишени и в МЧС – менее 15% радиационной длины.

12. Реконструкция событий

Тема реконструкции событий ввиду важности и объемности заслуживает отдельной публикации. В данном разделе представлены самые важные аспекты реконструкции.

Под реконструкцией события понимается процесс восстановления кинематики частиц события на основе данных с детекторов. Источником данных может быть ССД (реальные данные) или программа моделирования. В большей части реконструкция выполняется на вычислительном кластере ИФВЭ [34], дисковое пространство которого подразделяется на файловую систему afs с резервным копированием и систему lustre без резервного копирования, предназначенную для данных. Для задач хранения и реконструкции данных группа ВЕС типично использует около 100 процессоров, около 1 Гб afs и около 100 терабайт lustre.

На первоначально накопленных (или смоделированных) данных выполняется начальный цикл, или прогон («production»), реконструкции. Для прогона сырые данные из ленточной системы castor (см. раздел 4) копируются на lustre. Формат сырых данных двоичный, с фиксированной длиной записи, обновляется при появлении новых детекторов или электроники ССД. Основной документацией формата является функция, которая его читает. Прогон для всех физических сеансов установки ВЕС занимает несколько месяцев. По мере совершенствования программ и/или уточнения параметров установки выполняются повторные прогоны с наращиванием их порядкового номера. Так, при первом прогоне реконструкции используются коэффициенты калибровки ЭМК на электронах, что позволяет достаточно качественно выделить события образования систем с π^0 , таких как $\pi^-\pi^0$, $\pi^-2\pi^0$. На ансамбле таких событий для каждого счетчика j , в который попал один из распадных γ -квантов, заполняется гистограмма $M_{2\gamma}$ и определяется поправочный калибровочный коэффициент: $K_j = M_j/M_{\pi^0}$, где M_j – положение пика от распада π^0 из гауссовой подгонки. Такая π^0 -калибровка является более точной, чем электронная, и используется при следующих прогонах реконструкции.

Основная программа реконструкции называется off. Кроме нее, есть набор служебных программ: электронной калибровки ЭМК, выравнивания трековых детекторов (раздел 9.2), просмотра данных («dump») события, графического представления события и другие. Часть из них представляют собой особым образом сконфигурированный реконструктор. Вычислительная часть написана на языках c, c++, fortran, программная обвязка на bash, perl, lisp, python.

Выходные события off записываются в dst-файлы, от традиционного Data Summary Tape. В эксперименте ВЕС в качестве dst используется вновь разработанный формат [35] – подобие базы данных на основе реляционной алгебры [36, 37]. Файл с данными представляет собой поток сериализованных таблиц для последовательных событий. Поскольку такое представление является избыточным, поток данных сжимается. Для этого используются стандартные компрессоры: zlib [38], xz [39], brotli [40].

Основным преимуществом такого способа хранения значительного объема данных является простота расширения и хорошая документированность, а также прямая и обратная совместимость. При расширении формата новые данные можно ана-

лизировать старыми программами, игнорируя новые таблицы. И наоборот, старые данные можно анализировать новыми программами, учтя отсутствие некоторых таблиц. Основным недостатком является вычислительная сложность, в основном сосредоточенная в компрессоре. Однако в суммарном времени реконструкции время работы компрессора составляет не более 20%.

Реконструктор использует описание установки в форме так называемой *geodb*. *Geodb* представляет собой структуру директорий (папок), по одной на детектор, в каждой из которых лежит фиксированный набор файлов на диалекте языка *lisp* [41] *Scheme*. В файлах могут находиться калибровочные константы, карты соответствия электронных адресов ССД и чувствительных элементов детекторов (проводочек, ФЭУ), а также функции на языке *Scheme*. Здесь используется тот факт, что на языках группы *lisp* программа не отличается от данных. Любая программа ВЕС с встроенным интерпретатором языка *Scheme guile* [42] может получить доступ к данным, хранящимся в *geodb*. Примеры таких программ – *bes*, использующей *geodb* для создания модели установки, и *onl-hist*, использующий карту адресов ССД. Отдельная версия *geodb* создается для каждого сеанса или его части с достаточно постоянной конфигурацией оборудования. Также новая версия создаётся для нового прогона реконструкции, возможно и несколько версий внутри прогона при промежуточном изменении программ или констант.

Есть данные, которые описывают установку, но хранение которых в формате *geodb* нецелесообразно. Обычно это двоичные данные, данные большого объёма, времязависимые данные. К ним относятся: карта магнитного поля, параметризация формы ливня в ЭМК, калибровочные коэффициенты ЭМК, поправочные коэффициенты для пучкового спектрометра, параметризованные функции для подгонки сигналов ВАЦП. Эти данные хранятся в отдельных файлах, указание на которые содержится в конфигурационном сценарном файле. В начале работы *off* зачитывает эти файлы и *geodb*.

Пособытийная реконструкция в *off* построена в виде конвейера процессоров, с передачей формирующегося события от одного к другому. Процессор представляет собой функцию на языке *C/C++* с определенным интерфейсом входа и выхода. Набор, последовательность, а также некоторые параметры процессоров в исполняемом файле *off* задаются в конфигурационных файлах в двух возможных видах. Исходный файл с расширением имени *.scm* написан на языке *Scheme*. Возможности языка высокого уровня позволяют автоматизировать различные рутинные задачи, например описание и обработка похожих детекторов. Далее сложный для чтения код на *Scheme* преобразуется с использованием *guile* в более простой формат с расширением *.scm.cfg*, несколько похожий на *make*. Именно он в основном и используется программой *off*. Поскольку процессоров и параметров много, то для упрощения работы по их корректной сборке написан препроцессор на языке *Perl*. Препроцессор модифицирует текст процессора и обеспечивает: выдачу диагностических сообщений, гистограммирование, загрузку данных из конфигурационного файла, согласование параметров процессоров и поддержку таблицы известных процессоров.

Типичная схема нормальной реконструкции события примерно такая:

- Чтение события в формате *dst* или в формате данных установки; формирование списка хитов

- Кластеризация хитов в трековых детекторах
- Поиск прямых проекций пучкового трека в плоскостях XZ , YZ
- Создание пучкового трека, измерение импульса пучка.
- Обработка сигналов пучковых черенковских счетчиков и счетчиков вето-системы
- Поиск прямых проекций треков вторичных частиц в плоскостях XZ , YZ в головных ПК
- Создание треков вторичных частиц из проекций в головных ПК и хитов в INOX и DT, вычисление их направлений, импульсов, зарядов
- Нахождение первичной и вторичных вершин
- Обработка сигналов ЭМК, нахождение кластеров, их классификация как шумовых, адронных (по ассоциации с треками) либо от гамма-квантов.
- Обработка сигналов большого черенковского счетчика
- Запись события в формате dst

Выходное событие содержит не только результаты реконструкции (вершины, 3-импульсы и пр.), но и набор исходных хитов. Это позволяет при необходимости повторить реконструкцию, а также графически изобразить событие. Если событие смоделированное, то дополнительно сохраняются входная кинематика события и МС структуры. Это дает возможность сопоставления исходного и реконструированного событий.

Схема программного обеспечения и потоков данных установки ВЕС

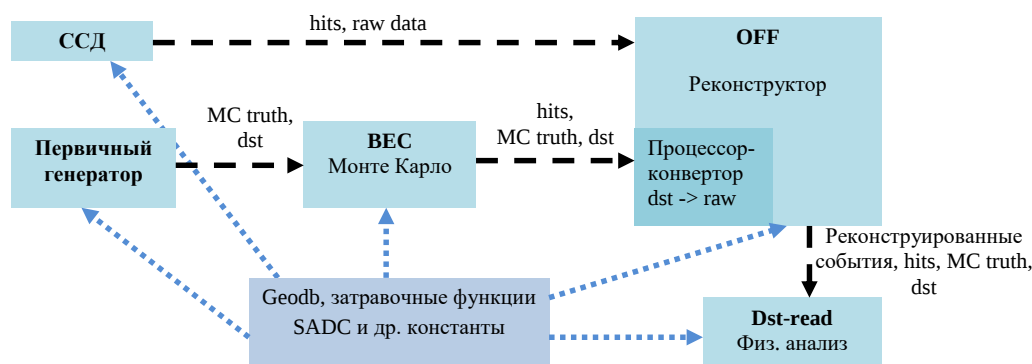


Рис. 20. Структурная схема ПО и потоков данных в эксперименте ВЕС.

Общая схема *off-line* обработки данных в эксперименте ВЕС представлена на рис. 20.

12.1. Реконструкция треков

Под реконструкцией трека понимается восстановление траектории заряженной частицы в установке, определение и параметризация импульса. Реконструкция включает несколько этапов.

Поиск прямых проекций трека на плоскость выполняется методом Хафа [43] с кластеризацией. Реализация метода Хафа в программе бес имеет особенности. Поскольку угол между треком и пучком невелик, естественно параметризовать трек в плоскости XZ в виде $x(z) = az + b$, где константы a, b подлежат определению (аналогично в YZ). Далее используется известная дуальность между понятиями «точка» и «прямая» в геометрии плоскости. Для всех пар хитов, которые используются для описания проекции трека, строятся проходящие через них прямые. Параметры a, b всех этих прямых представляют собой точки в двумерном пространстве параметров, а сгущения точек соответствуют трекам в физическом пространстве.

Для поиска сгущения используется кластеризация близких точек слиянием. Исходно каждая точка в пространстве параметров есть кластер. Выполняется цикл по всем парам точек. Достаточно близкие точки сливаются. Пересчитываются попарные расстояния между точками. Если близких не осталось, конец алгоритма. Эффективной мерой близости при кластеризации оказалась вероятность. Объединяются множества хитов, соответствующим двум кластерам в пространстве параметров, и выполняется подгонка прямой методом χ^2 с требованием на вероятность подгонки выше порога, типично 10^{-3} .

Обычно в алгоритмах кластеризации точка в итоге входит ровно в один кластер. В трековой реконструкции ВЕС это не так – хит в трековом детекторе может принадлежать нескольким трекам. Если возможно несколько вариантов слияния данного кластера с другими, все они допустимы. Также обычно в подобных алгоритмах в каждом цикле выполняется слияние самых близких кластеров, после чего все попарные расстояния пересчитываются. Это вычислительно дорого. В off используется гораздо более быстрый и почти такой же эффективный «жадный» алгоритм. Здесь в каждом цикле объединяются все пары кластеров, расстояние между которыми меньше некоторой границы. В качестве компенсации эту границу сначала можно несколько ужесточить, а затем на каждом цикле поднимать до заданного предела.

Далее из кластеров строятся проекции прямых отрезков треков в плоскостях XZ, YZ, отдельно для пучкового и вторичных треков. Для использования выбираются наилучшие кластера по определенным критериям. Если на данной итерации выполнен ряд условий – минимальное (3–4) количество используемых хитов, допустимое количество (обычно 3) неиспользованных хитов, приемлемый χ^2 – проекция принимается. Ассоциированные с ней хиты отмечаются как использованные, и следующим кластерам войти в кандидат в трек будет сложнее. Когда неиспользованные хиты кончатся, проекции треков построены.

Плоские проекции нужно связать в пространственный трек. В установке ВЕС нет пучковых наклонных камер для связывания проекций, поэтому пучковых треков в событии не больше одного. Для вторичных треков связывание проекций выполняется на этапе поиска “кривых” треков, см. далее.

Для краткости будем называть траектории вторичных частиц, проходящие от

области мишени через головные пропорциональные камеры и магнит M13 с камерами INOX в область DT, вплоть до гамма-детектора, кривыми треками. Алгоритм поиска кривых треков также основан на методе Хафа и кластеризации. В общем случае метод Хафа пригоден для поиска в множестве точек любых кривых, которые параметризуются небольшим числом параметров. Трек может быть описан 5-ю параметрами $(a_x, b_x, a_y, b_y, q/p_{xz})$, где (a_x, b_x) и (a_y, b_y) имеют тот же смысл, что и при поиске проекций, последний параметр описывает импульс частицы с зарядом q^4 . В обобщенном методе Хафа предлагается считать точками в пространстве параметров сколь угодно короткие куски треков, которые могут быть параметризованы, а затем объединять эти куски в более длинные фрагменты треков.

В общем случае для описания фрагмента трека достаточно пары проекций XZ, YZ в головных ПК и трех хитов X, Y, U/V далее по треку, затем эти фрагменты можно кластеризовать. Вычисление импульса трека по проекции в головной части установки и хиту в оконечной части требует выполнения процедуры оптимизации и многократной протяжки трека через магнитное поле. Протяжка трека через магнитное поле на 5-10 м в длину с требуемой поперечной точностью порядка 0.1 мм выполняется методом Рунге – Кутты – Нистрема [44] с примерно 50–100 шагами. Это в десятки тысяч раз медленнее, чем подгонка набора точек прямой по явной формуле, как при поиске проекций. Поэтому для поиска треков необходим другой, максимально эффективный алгоритм.

Трек строится 3-х мерным, так как это необходимо для протяжки трека через поле M13. Однако плоскости XZ и YZ рассматриваются отдельно, поскольку отклонение трека от прямой в плоскости YZ не более 2–3 см даже для импульса 3–5 ГэВ, и его можно рассматривать как поправку. Проекция XZ описывается всего 3-мя параметрами $(a_x, b_x, q/p_{xz})$. Размерность пространства параметров для кластеризации ещё меньше: трек, попадающий в плоскость детектора, полностью характеризуется своей координатой X. Одномерная кластеризация выполняется с помощью сортировки и имеет сложность $O(n \ln n)$, где n есть число хитов в детекторе. Это очень существенный выигрыш по сравнению с многомерной (даже двумерной) кластеризацией, имеющей сложность $O(n^3)$. Алгоритм на этой основе является вычислительно доступным.

Трек строится от начала установки к концу. На первом этапе используются пары проекций XZ, YZ в головных ПК и кластера хитов в INOX01. При полном переборе по этим трём типам объектов получается значительное количество кандидатов в треки. Слишком плохие по χ^2 кандидаты отбраковываются. Строится первая траектория трека через магнитное поле M13, определяется заряд и приблизительно импульс трека. Связь между плоскостями XZ и YZ на установке ВЕС слабая, она обеспечивается хитами в немногочисленных UV плоскостях только в самом начале установки, на PCRED, и в самом конце, на DC02. Поэтому при создании трека эта связь желательна, но не требуется.

Далее по тому же принципу трек протягивается до плоскостей INOX02. Каждый кандидат в треки сопоставляется с каждым кластером хитов в INOX02. Если сопоставление с каким-то кластером успешно, траектория и оценка импульса уточ-

⁴Полагаем $|q| = 1$

няются; если подходящего кластера для кандидата в треки нет, кандидат в треки отбрасывается. Если координата трека на INOX02 в апертуру M13 не попадает, короткий кандидат в треки построен.

Проблема лево-правых неоднозначностей в дрейфовых детекторах в методе Хафа разрешается просто и естественно. Каждый хит в дрейфовом детекторе записывается дважды, с дрейфовым расстоянием обоих знаков. Оба таких псевдохита используются в кластеризации, но в один кластер входить не могут. Оба они могут быть ассоциированы с треками, разными, но статус «ассоциированный» у них общий.

12.2. Реконструкция вершин

При реконструкции вершин производится глобальная χ^2 - подгонка события с использованием ранее найденных параметров всех треков с их ковариациями. Её результатом являются: количество вершин в событии, их координаты и матрицы ковариаций, ассоциации вершин с треками, а также (опционально) поправки к параметрам треков, являющиеся следствием наложенных связей.

В ходе реконструкции перебираются все возможные гипотезы относительно количества вершин и их ассоциаций с треками при условиях:

- первичной вершиной, с количеством треков не менее двух, объявляется та единственная, в которую попал пучок, а при его отсутствии – с наименьшей Z - координатой;
- остальные вершины – вторичные вида «вилки» V^0 , т.е. представляющие распад нейтральной частицы на две противоположно заряженные частицы. В этом подходе, в частности, распад заряженного пиона не порождает вторичной вершины. Вторичные вершины не могут порождать третичные и так далее вершины. Отрезок, соединяющий первичную и вторичную вершины, направлен по суммарному импульсу частиц «вилки» и имеет длину $L > K\sigma_L$, где σ_L – ошибка измерения L . Коэффициент K определяет, с одной стороны, эффективность поиска вторичной вершины, с другой стороны – вероятность ложного расщепления первичной вершины. Текущее значение $K = 8$ выбрано с использованием реальных данных и моделирования образования системы 3-х заряженных пионов и распадов $K^0 \rightarrow 2\pi^\pm$. Существующие функции для работы с dst позволяют поменять коэффициент, отменить трековые поправки, а также наложить дополнительное условие на Z -координату вершины (например, в середине тонкой мишени).

Если в событии больше 7 треков или 1 трек, глобальная подгонка не производится и каждому треку назначается вершина на нём при $Z_{\text{vertex}} = Z_{\text{target}}$. В общем процессе реконструкции найденные γ - кванты считаются исходящими из первичной вершины, а в событиях без вторичных треков, но с пучком – из назначенной.

13. Общие характеристики эксперимента ВЕС

Проиллюстрируем интегральные характеристики эксперимента ВЕС, включая аппаратные эффекты и вклад реконструкции. Рис. 21 показывает пример работы реконструктора в конфигурации просмотра событий на примере события с 5-ю

треками заряженных частиц, одной первичной и двумя вторичными вершинами.

Для этого класса событий на рис. 22 показано двумерное распределение по инвариантной массе пионов $M(\pi^+\pi^-)$, относящихся к одной вторичной вершины, а на рис. 23 – суммарный импульс пяти пионов для событий из круговой области с центром в точке $M_1(\pi^+\pi^-) = M_2(\pi^+\pi^-) = M(K^0)$. Таким образом, демонстрируется выделение эксклюзивного процесса $\pi^- N \rightarrow N' K_s^0(\rightarrow \pi^+\pi^-)K_s^0(\rightarrow \pi^+\pi^-)\pi^-$.

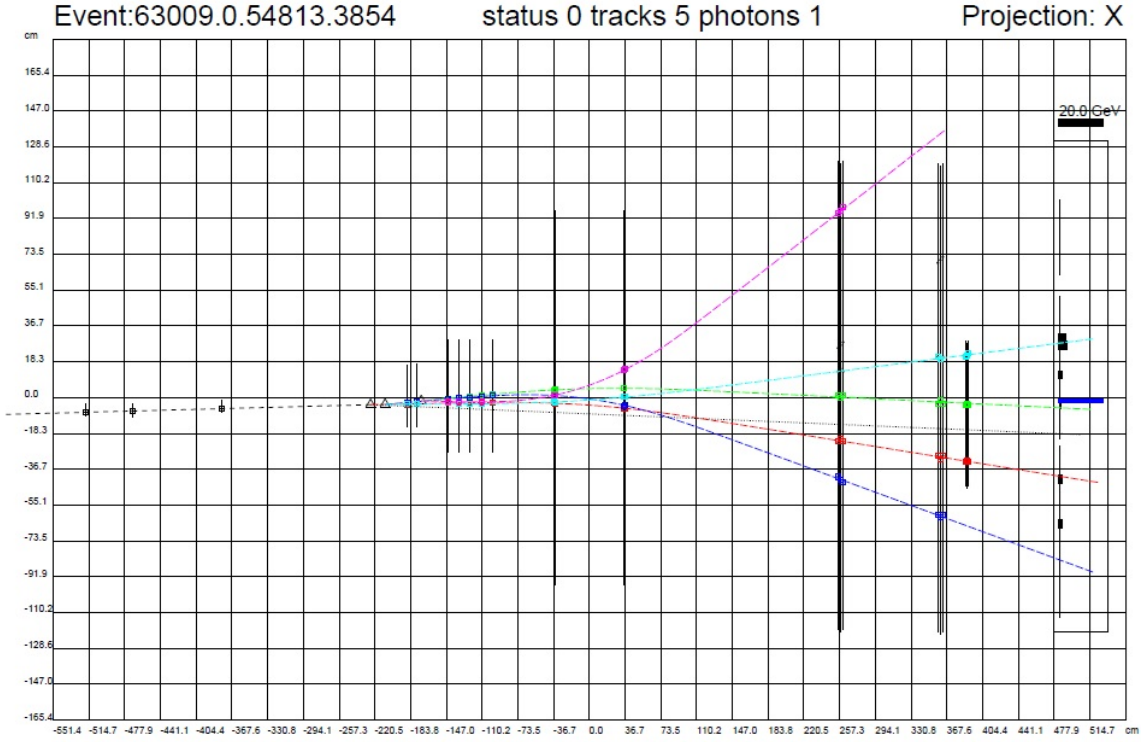


Рис. 21. Пример представления в проекции X реконструированного события с пятью треками (пунктирные цветные линии) и тремя вершинами (треугольники). Квадраты – срабатывания («хиты») трековых детекторов. Высота столбиков в ЭМК пропорциональна энергии.

Аналогично рис. 24 и 25 демонстрируют выделение эксклюзивной системы с гамма-квантами и идентификацией заряженных каонов: $\pi^- p \rightarrow n \omega(\rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0)\phi(1020)(\rightarrow K^+K^-)$.

Результатирующую абсолютную точность характеризуют массы резонансов при гауссовой подгонке узких сигналов, приведенные в табл. 4, в сравнении с известными значениями [45]. Вторым числом приведены дисперсии, определяемые разрешением, а для резонансов ω и ϕ – еще и значимой собственной шириной. Наблюдаемые ширины сигналов хорошо воспроизводятся в модели.

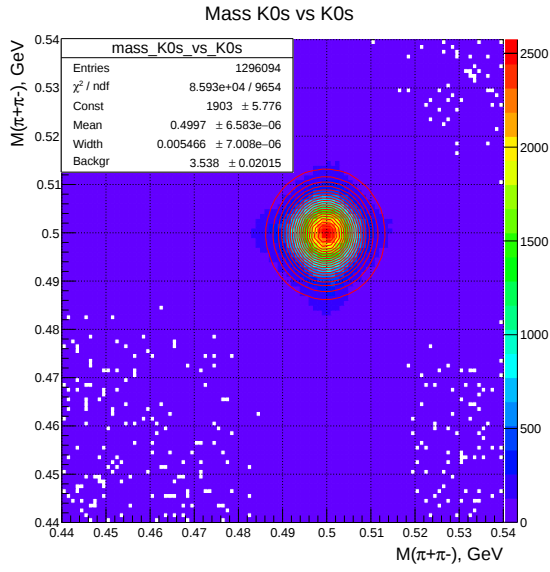


Рис. 22. Двумерный спектр масс $\pi^+\pi^-$ в событиях с 5-ю треками и двумя вторичными вершинами.

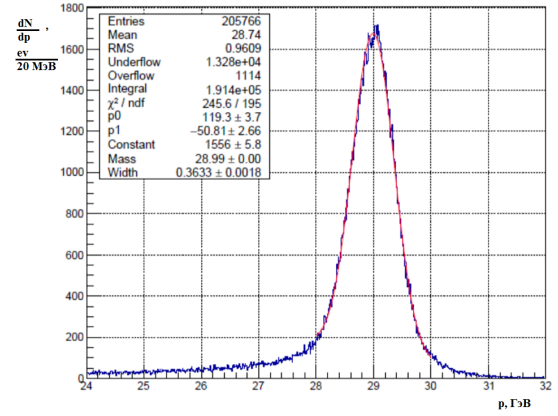


Рис. 23. Распределение событий по суммарному импульсу системы $K_s^0 K_s^0 \pi^-$.

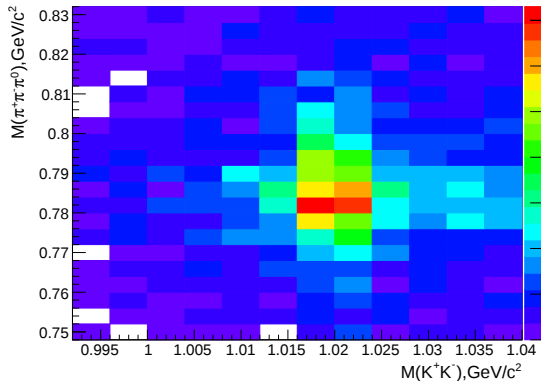


Рис. 24. Двумерный спектр масс $\pi^+\pi^-\pi^0$ и K^+K^- в системе 5-ти мезонов.

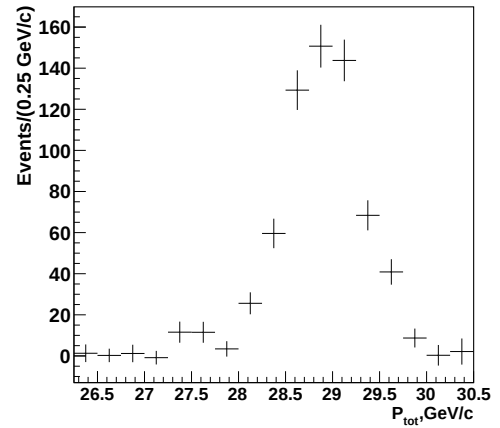


Рис. 25. Распределение событий по суммарному импульсу системы $\omega\phi$.

	сигнал	измеренные М и σ (МэВ)	примечание
Магнитный спектрометр	$K^- \rightarrow 3\pi^\pm$	495.3 6.2	$M(K^-) = 493.7$ МэВ модель: $M(K^- \rightarrow 3\pi^\pm) = 494.6$ МэВ
	$K^0 \rightarrow 2\pi^\pm$	496.2 6.1	$M(K^0) = 497.6$ МэВ
	$\phi \rightarrow 2K^\pm$	1019.9 3.2	$M(\phi) = 1019.5$ МэВ $\Gamma(\phi) = 4.3$ МэВ
Калориметрия	$\pi^0 \rightarrow 2\gamma$	134.9 5.8	С калибровкой на $M(\pi^0)$
	$\eta \rightarrow 2\gamma$	546.9 14.9	$M(\eta) = 547.9$ МэВ
	$\eta' \rightarrow 2\gamma$	960.6 24.4	$M(\eta') = 957.8$ МэВ
Спектрометр и калориметрия	$K^- \rightarrow \pi^- 2\pi^0$	493.6 4.3	С 1С-подгонкой на $M(\pi^0)$
	$K^- \rightarrow \pi^- \pi^0$	491.6 12.0	
	$\eta \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$	548.0 8.4	
	$\omega \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$	783.6 14.8	$M(\omega) = 782.7$ МэВ $\Gamma(\omega) = 8.5$ МэВ
	$\eta' \rightarrow \pi^+ \pi^- \eta$ ($\eta \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$)	957.9 10.6	
	$\eta' \rightarrow \pi^+ \pi^- \eta$ ($\eta \rightarrow 2\gamma$)	956.4 17.5	

Таблица 4. Массы и дисперсии при гауссовой подгонке узких сигналов в спектрометре и ЭМК ВЕС.

14. Благодарности

Авторы благодарны всем сотрудникам ОЭФ разных лет, не вошедшим в авторский коллектив данной работы, но внёсшим большой вклад в создание и эксплуатацию установки ВЕС за десятилетия её существования.

Авторы благодарят дирекцию ИФВЭ за поддержку эксперимента ВЕС, руководство и коллективы подразделений: ОУК, ОП и ОЭУ У-70 за обеспечение работы ускорительного комплекса и выводного канала, ОЭА и ОЭЦЭ за участие в развитии электроники установки, ОМВТ за обеспечение вычислительной инфраструктуры и техническую поддержку, КО и ЦОП за конструкторские разработки и изготовление оборудования, КЦ, ОГМ и ОГЭ за обеспечение инженерной инфраструктуры установки, КС за участие в снабжении установки оборудованием и материалами.

Список литературы

- [1] Г.В. Борисов и др.: Трековая система установки ВЕС. Препринт ИФВЭ 98-60, Протвино (1998). <http://web.ihep.su/library/pubs/prep1998/ps/98-60.pdf>
- [2] Dorofeev, V.A., Ivashin, A.V., Kalendarev, V.V., Katchaev, I.A., Konstantinov, V.F., Matveev, V.D., Polyakov, B.F., Sugonyaev, V.P., Kholodenko, M.S., Khokhlov, Y.A.: A new electromagnetic calorimeter for the updated VES setup. *Instrum. Exp. Tech.* **59**(5), 658–665 (2016)
- [3] Kholodenko, M.S.: Particle identification with the Cherenkov detector in the VES experiment. *JINST* **15**(07), 07024 (2020).
- [4] А.В. Ивагин, В.Д. Матвеев, Ю.А. Хохлов: Модернизированная система сбора данных установки ВЕС. Технические аспекты. Препринт ИФВЭ 2010-10, Протвино (2010). <http://web.ihep.su/library/pubs/prep2010/ps/2010-10.pdf>
- [5] Д.А.Васильев, А.В.Екимов, А.В.Лутчев, А.А.Новосёлов, В.Н.Федорченко, Ю.А.Хохлов, Система контроля установки ВЕС. Препринт ИФВЭ 2013-2, Протвино (2013). <http://web.ihep.su/library/pubs/prep2013/ps/2013-2.pdf>
- [6] Е.В. Волков, А.В. Ивагин, В.В. Календарёв, В.Д. Матвеев, В.П. Сугоняев, Ю.А. Хохлов, А.А. Шумаков Автономный модуль амплитудно-цифрового преобразования ADC-32АТС с оцифровкой формы импульса. Препринт ИФВЭ 2017- 8, Протвино (2017). <http://web.ihep.su/library/pubs/prep2017/ps/2017-8.pdf>
- [7] Д.Р. Еремеев, А.В. Ивагин, В.Д. Матвеев, М.О. Михасенко, В.П. Сугоняев, Ю.А. Хохлов Применение модуля ADC-32АТС с оцифровкой формы импульса на установке ВЕС. Препринт ИФВЭ 2019-2, Протвино (2019). <http://web.ihep.su/library/pubs/prep2019/ps/2019-2.pdf>
- [8] Е.В. Волков и др. Система управления перемещением электромагнитного калориметра установки ВЕС. Препринт ИФВЭ 2012-18, Протвино (2012).

- [9] А.В.Ивашин, В.Д.Матвеев, Ю.А.Хохлов. Электронный модуль обработки сигналов TDC-96MWC и его использование на установке ВЕС. Препринт ИФВЭ 2024-1, Протвино (2024). <http://web.ihep.su/library/pubs/prep2024/ps/2024-1.pdf>.
- [10] Д.Р.Еремеев и др. Модернизированные пропорциональные камеры установки ВЕС. Препринт ИФВЭ 2024-3, Протвино (2024).
- [11] V.A. Dorofeev et al., Study of a near-threshold scalar resonance in the $\omega\phi$ system in pion-Be interaction at momentum of 29 GeV. Eur. Phys. J. A (2024) 60:105 <https://doi.org/10.1140/epja/s10050-024-01307-5>
- [12] Ю.Б. Бушнин и др. Быстродействующая система регистрирующей и триггерной электроники для экспериментальных исследований в ИФВЭ. Препринт ИФВЭ 88-47, Серпухов (1988)
- [13] М.М.Солдатов, В.Д. Матвеев. Частное сообщение. ЛЭ-68М. Автономный контроллер МИСС. Техническое описание.
- [14] Н.А. Шаланда, М.М. Солдатов, В.А. Сенько. Регистрация информации с проводочных камер и годоскопов на физических установках ИФВЭ. Препринт ИФВЭ 2014 - 13. Протвино (2014)
- [15] В.А. Сенько, М.М. Солдатов, В.И. Якимчук. 96-канальный модуль МИСС преобразования «заряд-цифра» для калориметров физики высоких энергий. Препринт ИФВЭ 2012-19. Протвино (2012)
- [16] В.Д. Матвеев, А.П. Филин, Е.Д. Юрченко (НИ ТГУ, Томск, Россия), В.И. Якимчук. Контроллеры для подключения систем сбора данных экспериментальных установок ИФВЭ к компьютеру через шину USB. Препринт ИФВЭ 2018 - 7. Протвино (2018).
- [17] E. Cano (CERN), S. Murray (CERN), D.F. Kruse (CERN), V. Kotlyar (Serpukhov, IHEP), D. Côme (CERN and LNCMP, Toulouse). The new CERN tape software - getting ready for total performance. J.Phys.Conf.Ser. 664 (2015) 4, 042007
- [18] Д.А. Васильев и др. Преобразователь интерфейсов АС-4. Препринт ИФВЭ 2011-2. Протвино (2011)
- [19] В.Н. Алферов и др. Система измерения магнитного поля установки СВД-2. Приборы и техника эксперимента, 2019, № 3, стр. 157–159.
- [20] Алферов В.Н., Васильев Д.А.: Широкодиапазонный акустический анализатор двухкомпонентной газовой смеси. Приборы и техника эксперимента, 2025, № 1, с. 143–146
- [21] J. Allison et al., Recent Developments in Geant4. Nucl. Instrum. Meth. A 835 (2016) 186-225, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.06.125>
J. Allison et al., Geant4 Developments and Applications. IEEE Trans. Nucl. Sci. 53 (2006) 270-278, <https://doi.org/10.1109/TNS.2006.869826>

- S. Agostinelli et al., Geant4 - A Simulation Toolkit. Nucl. Instrum. Meth. A 506 (2003) 250-303, [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(03\)01368-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01368-8)
- [22] К.И. Губриенко и др. Пучки вторичных частиц на протонном синхротроне с энергией 70 ГэВ. Препринт ИФВЭ ОП 69-77, Серпухов (1969).
- [23] В.Н. Алфёров и др. Система управления источниками питания магнитооптических элементов каналов частиц. Множественный доступ и представление данных. Препринт ИФВЭ 2011 - 3, Протвино (2011).
- [24] Шумаков А. А. Методика измерения сечений реакций в эксперименте ВЕС. ЭЧАЯ. 2025. Т. 56, вып. 3
- [25] А.В. Алексеев и др. Магнитные характеристики отклоняющих электромагнитов и квадрупольных линз для формирования пучков частиц на протонном синхротроне ИФВЭ. Препринт ИФВЭ 68-62, Серпухов (1968).
- [26] В.А. Викторов, В.Ф. Куршецов. Препринт ИФВЭ 82-07, Серпухов (1982)
- [27] А.В. Ивашин. TDC-32MWC. Частное сообщение.
- [28] R.L. Craun and D.L. Smith: Analyses of response data for several organic scintillators. NIM 80 (1970) 239-244
- [29] С.В. Ерин и др. Препринт ИФВЭ 88-102, Серпухов (1988) С.В. Ерин и др. Препринт ИФВЭ 88-103, Серпухов (1988)
- [30] В.А. Викторов, С.В. Головкин. Препринт ИФВЭ 83-16, Серпухов (1983)
- [31] N.I.Bozhko, A.A.Borisov, A.S.Kozhin, and R.M.Fakhrutdinov. Tracking chambers made of mylar drift tubes for experiments at the accelerator complex of the National Research Center “Kurchatov Institute” - IHEP. Physics of Atomic Nuclei, 2018, Vol.81, No 9, pp.1312-1317.
- [32] N.I.Bozhko, A.A.Borisov, A.S.Kozhin, and R.M.Fakhrutdinov. Drift chambers made of mylar tubes with diameter of 15 mm and length of up to 2.5 m. Physics of Atomic Nuclei, 2019, Vol.82, No 9, pp.1311-1316.
- [33] А.В. Ивашин. Модуль TDC-48DT. <http://pcbech.ihep.su/~ivashin/tdc-48dt-doc.pdf> (внутренняя документация)
- [34] V. Kotliar, V. Gusev, V. Kukhtenkov, N. Savin. WLCG Tier-2 Computing Center at NRC “Kurchatov Institute”—IHEP: 20 Years of Operation. Phys. Part. Nuclei 55, 321–325 (2024). <https://doi.org/10.1134/S1063779624030523>
- [35] А.В. Ивашин. Предложение по формату DST для эксперимента ВЕС. <http://pcbech.ihep.su/~ivashin/dst-1.14.pdf> (внутренняя документация)
- [36] К.Дж. Дейт «Введение в системы баз данных», 7-е издание, изд. «Вильямс», 2001

- [37] Д. Мейер «Теория реляционных баз данных», изд. «Мир», 1987
- [38] <https://zlib.net/>
- [39] <http://tukaani.org/xz/>
- [40] <https://github.com/google/brotli>
- [41] <https://www.scheme.org/>
- [42] <https://www.gnu.org/software/guile/>
- [43] Duda, R. O. and P. E. Hart, Use of the Hough Transformation to Detect Lines and Curves in Pictures. Comm. ACM, vol. 15, pp. 11–15 (1972)
- [44] Dormand, J. R., Prince, P. J. New Runge–Kutta Algorithms for Numerical Simulation in Dynamical Astronomy. Celestial Mechanics. **18** (3): 223–232 (1978).
- [45] S. Navas, *et al.* (Particle Data Group): Review of Particle Physics. Phys. Rev. D **110**, no.3, 030001 (2024)

Рукопись поступила 22 августа 2025 г.

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

Борисов А.А. и др.
Установка ВЕС.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы **L^AT_EX**.

Подписано к печати 25.08.2025 Формат $60 \times 84/16$. Цифровая печать.
Печ.л. 3. Уч.-изд.л. 4,4. Тираж 65. Заказ 4. Индекс 3649.

НИИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ
142281, Московская область, г. Протвино, пл. Науки, 1

www.ihep.ru; библиотека <http://web.ihep.su/library/pubs/all-w.htm>

Индекс 3649

П Р Е П Р И Н Т 2025–4,
НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, 2025
