



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 98-60  
ОЭИУНК

Г.В. Борисов, Н.К. Вишневский, Е.В. Власов,  
Ю.П. Гуз, Р.И. Джелядин, А.М. Зайцев, В.В. Костюхин,  
С.В. Копиков, Б.Ф. Поляков, Ю.А. Хохлов  
*ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино*  
Г.Г. Сехниаидзе, Э.Г. Цхададзе, Т.А. Ломтадзе  
*Институт физики АН Грузии, Тбилиси*

## ТРЕКОВАЯ СИСТЕМА УСТАНОВКИ ВЕС

Протвино 1998

**Аннотация**

Борисов Г.В. и др. Трековая система установки ВЕС: Препринт ИФВЭ 98-60. – Протвино, 1998. – 23 с., 14 рис., библиогр.: 22.

Описана трековая система установки ВЕС (ИФВЭ, Протвино). Представлены пропорциональные и дрейфовые камеры, а также различные подсистемы, входящие в её состав. Приведены основные характеристики, полученные при эксплуатации системы в составе установки.

**Abstract**

Borisov G. et al. Tracking System of the VES Facility : IHEP Preprint 98-60. – Protvino, 1998. – p. 23, figs. 14, refs.: 22.

A tracking system of the VES facility functioning for a few years at the U-70 accelerator (IHEP, Protvino) is presented. Its proportional and drift chambers and different subsystems are described. Major characteristics of the setup attained during physics runs are presented.

## 1. Общая структура трековой системы

Трековая система разрабатывалась с учётом общих требований, предъявляемых к установке ВЕС: большой угловой акцептанс, способность работать в пучке высокой интенсивности, хорошее угловое разрешение. Она включает установленные до мишени пучковые камеры ( $BPC$ ) и расположенные за мишенью камеры магнитного спектрометра. В состав спектрометра входят следующие группы детекторов:

- головные пропорциональные камеры ( $PC$ );
- пропорциональные камеры в зазоре магнита ( $PCM$ );
- микродрейфовые камеры в зазоре магнита ( $\mu DC$ );
- большие микродрейфовые СГС камеры за магнитом ( $DC$ ).

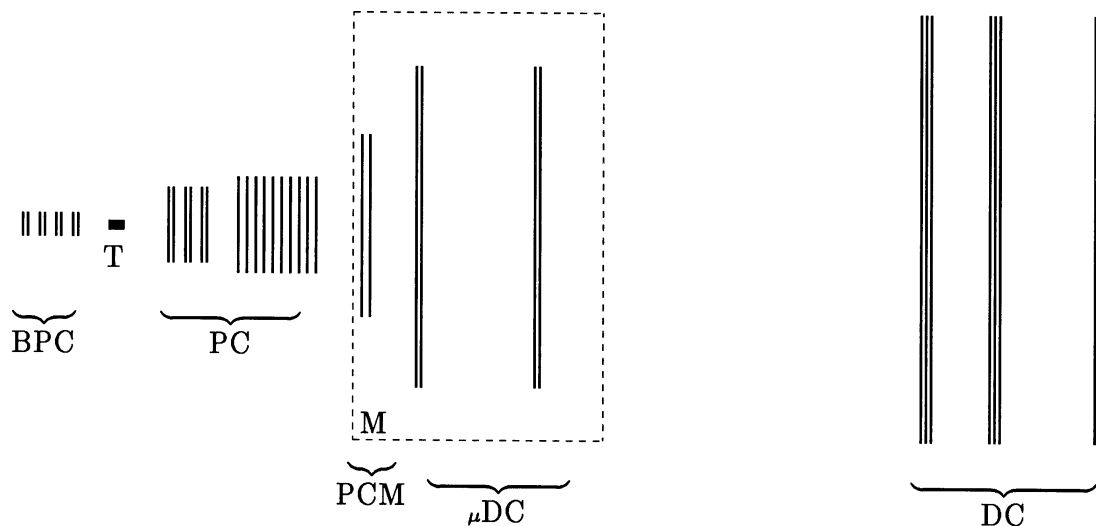


Рис. 1. Общая структура системы трековых детекторов установки ВЕС:  $BPC$  — пучковые камеры;  $PC$  — головные пропорциональные камеры;  $PCM$  — пропорциональные камеры в зазоре магнита;  $\mu DC$  — микродрейфовые камеры в зазоре магнита;  $DC$  — большие микродрейфовые СГС камеры;  $T$  — мишень;  $M$  — полюс магнита.

Система в целом содержит около  $4,8 \cdot 10^3$  каналов пропорциональных камер и  $2,6 \cdot 10^3$  каналов дрейфовых камер. Общая структура системы показана на рис.1. По своему угловому акцептансу она перекрывает апертуру остальных детекторов установки. Большая часть трековой системы расположена вне зазора магнита, в области почти прямолинейных треков, однако в магните также установлены камеры, что облегчает “сшивку” участков треков до и после магнита. Камеры в магните также существенно увеличивают эффективность регистрации частиц с низкой энергией, которые сильно отклоняются магнитом и не попадают в апертуру больших камер (*DC*).

## 2. Пучковые камеры (*BPC*)

Параметры трека пучковой частицы измеряются с помощью четырёх двухплоскостных (*X* и *Y*) камер размером  $64 \times 64$  мм<sup>2</sup>. Эти камеры имеют гексагональную структуру электродов [1], показанную на рис.2. В камерах данной структуры координаты трека могут вдвое уточняться в зависимости от того, сработала ли одна проволочка или две соседних. Зоны срабатывания двух соседних сигнальных проволок обозначены штриховкой.

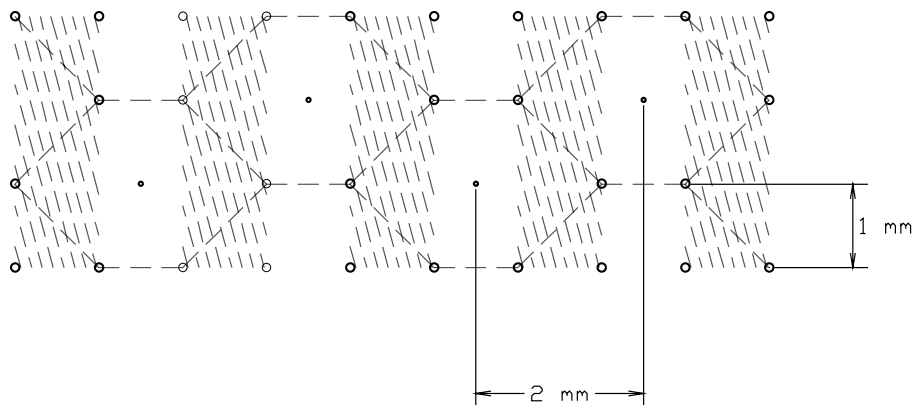


Рис. 2. Структура электродов пучковых камер установки ВЕС. Пунктиром обозначены условные границы гексагональных ячеек, образованных толстыми катодными проволоками. В центре ячеек — тонкие анодные проволоки. Штриховкой показаны зоны срабатывания двух соседних анодов.

Каждая плоскость содержит 32 канала, расстояние между двумя соседними сигнальными проволоками  $S = 2$  мм. По своему пространственному разрешению эти камеры соответствуют камерам традиционной структуры с шагом анодных проволок 1 мм. Наличие потенциальных проволок между анодными улучшает временное разрешение камер. На рис. 3 приведены профиль пучка (а) и распределения по времени дрейфа (б) и множественности (в) в пучковой камере. Временное разрешение камеры ( $FWHM$ )  $\sim 40$  нс; приблизительное равенство числа событий с множественностями 1 и 2 означает, что зоны одиночных и двойных срабатываний имеют одинаковую ширину (рис.2).

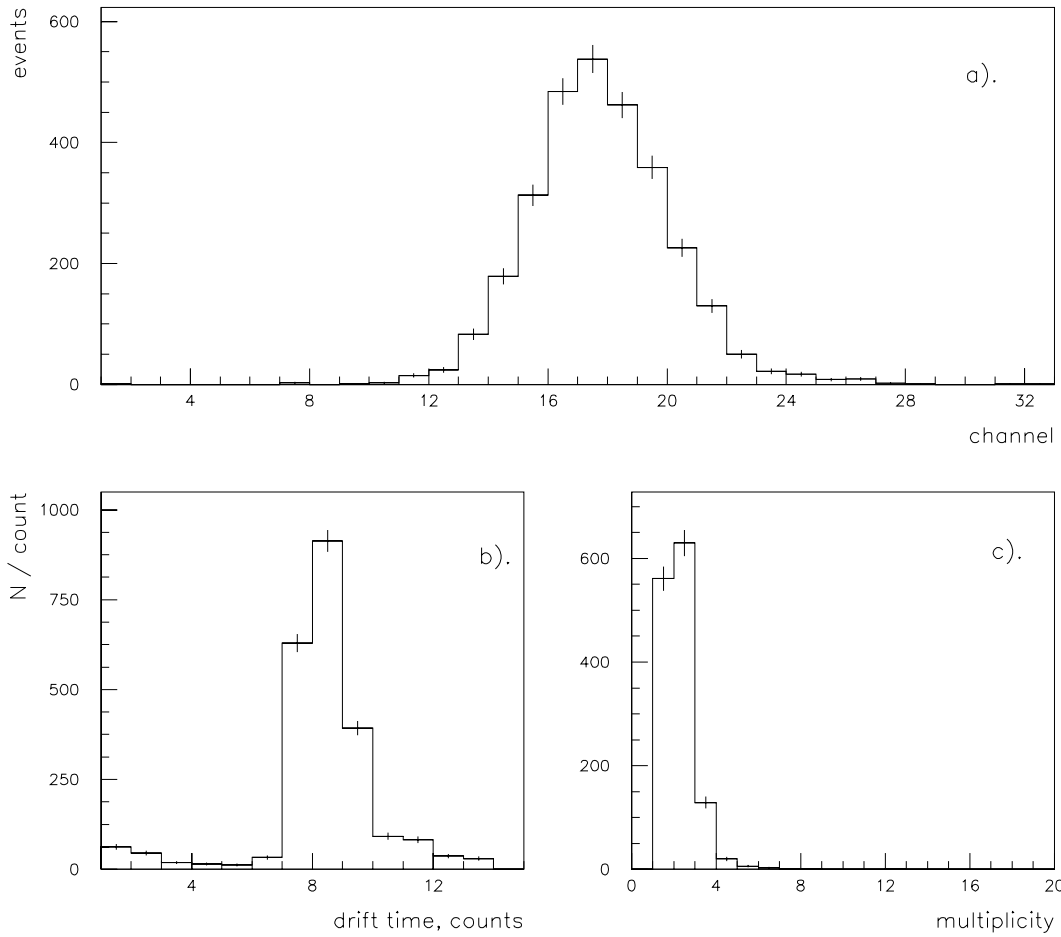
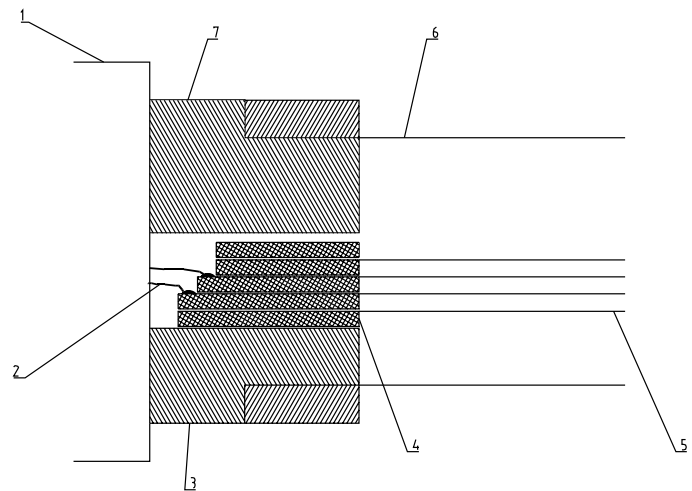


Рис. 3. Характеристики пучковых камер. Профиль пучка (а); временное распределение (б); распределение по множественности (в).

Рис. 4. Конструкция пучковых камер.  
 1 — кассета с усилителями;  
 2 — выводы сигнальных проволок;  
 3 — фланец;  
 4 — печатные платы;  
 5 — проволоки;  
 6 — лавсан;  
 7 — другой фланец.



Конструкция пучковых камер представлена на рис. 4. Камера состоит из двух одинаковых дюралевых фланцев, на одном из них смонтирована X-плоскость, а на другом — Y-плоскость. К этим фланцам в процессе сборки слой за слоем приклеивались печатные платы, на которых распайвались проволочные электроды. Катодные проволочки из бериллиевой бронзы БрБ2, их диаметр 100 мкм. Для сигнальных электродов использовалась позолоченная вольфрамовая проволока диаметром 20 мкм. Натяжение проволоки при распайке катодов составляло 100 Гс, сигнальных проволок — 40 Гс.

### 3. Пропорциональные камеры

В состав данной группы входят пропорциональные камеры с традиционной структурой (рис. 5а). Катодные проволочки из бериллиевой бронзы БрБ2, диаметром  $d_c = 100$  мкм, с натяжением 200 Гс. Анодные проволочки диаметром  $d_a = 20$  мкм натянуты с шагом  $s = 2$  мм. В большинстве камер, если не указано особо, использовались аноды из позолоченного вольфрама, с натяжением около  $T_a = 45$  Гс. Это в несколько (более чем в 2) раз превышает критические натяжения относительно электростатической неустойчивости, определяемые формулой [3]

$$T_{kr} = 2.84 \cdot 10^{-9} \frac{V^2 l^2}{s^2} \left[ \ln \frac{\sinh(\pi L/s)}{\sinh(\pi R/s)} \right]^{-2}, \quad (1)$$

где  $T_{kr}$  — натяжение в граммах;  $V$  — напряжение в киловольтах;  $l, R = d_a/2, s$ , — соответственно длина, радиус и шаг проволок;  $L$  — анод-катодное расстояние.

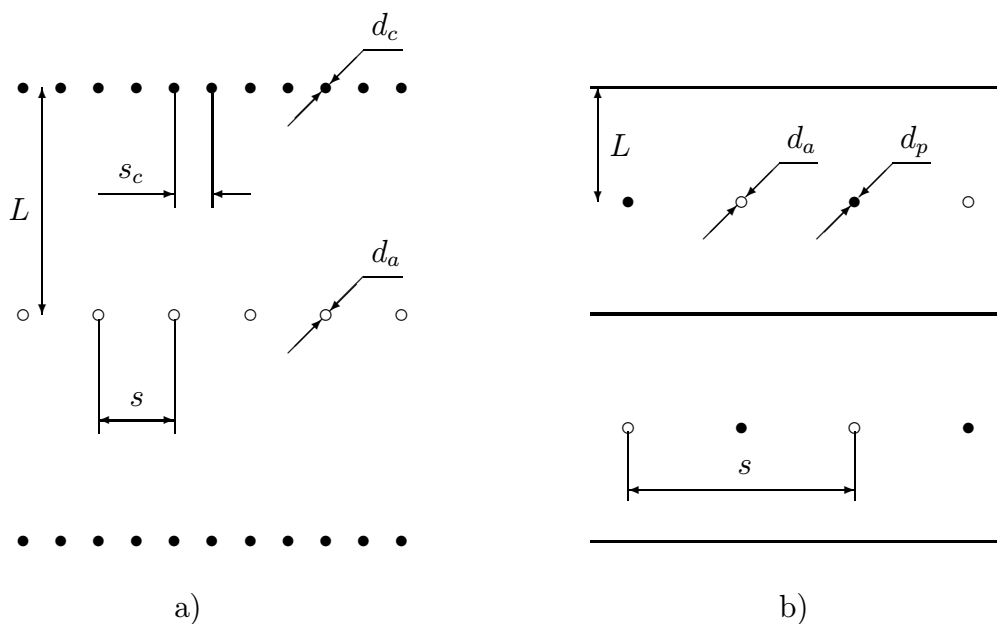


Рис. 5. Структура электродов камер: а) пропорциональных; б) микродрейфовых в магните  $L = 4$  мм;  $s = 6$  мм;  $d_a = 30$  мкм;  $d_p = 100$  мкм.

Деформации рамок камер под действием распределенных сил рассчитывались по методике [4] в приближении малого прогиба (по отношению к поперечным размерам сечения рамок) и пренебрежении сжимающими (растягивающими) усилиями по сравнению с критической нагрузкой рамки. Максимальный прогиб в центре рамки составляет

$$y_{max} = \frac{q_1 a_1^4}{384 \cdot E_1 J_1} \left( 5 - 4 \frac{\alpha \gamma + \beta \delta^3}{\alpha \gamma + \delta} \right), \quad (2)$$

где  $a_i, E_i, J_i$  — соответственно длина, модуль Юнга и момент инерции поперечного сечения вертикальной ( $i = 1$ ) или горизонтальной ( $i = 2$ ) сторон рамки;  $q_i$  — распределенная нагрузка на нее;  $\alpha = E_2/E_1, \beta = q_2/q_1, \gamma = J_2/J_1, \delta = a_2/a_1$ . Для всех типов рассматриваемых пропорциональных камер, кроме камер в магните, прогибы рамок не приводят к существенному изменению натяжения проволок.

Распайка проволочных электродов на печатной плате во всех пропорциональных камерах, а также в микродрейфовых камерах в магните (см. ниже) осуществлялась способом, описанным в [5], с использованием специальной гребенки для задания положения проволок. После припайки положение сигнальных проволок (а для микродрейфовых камер и потенциальных) проверялось и при необходимости корректировалось с помощью оптической линейки до максимально допустимого смещения 100 мкм.

### 3.1. Головные пропорциональные камеры (PC)

Три первые по направлению пучка камеры с размером чувствительной области  $448 \times 384 \text{ мм}^2$  имеют по две плоскости сигнальных электродов со взаимно перпендикулярными проволоками. Камеры аналогичной конструкции применялись на установке ГАМС, они описаны в работе [7]. Для них анод-катодное расстояние  $L = 5 \text{ мм}$ , шаг катодных проволок  $s_c = 1 \text{ мм}$ . Две камеры измеряют X- и Y- координаты трека каждая), а третья повернута на  $15^\circ$  вокруг оси пучка (измеряет координаты U, V) для разрешения неоднозначности при восстановлении множественных треков [6]. Рабочее напряжение этих камер при стандартно используемой на ВЕС газовой смеси (см. ниже) составляло  $\approx 2,9 \text{ кВ}$  при протяженности плато около 400 В.

Далее установлены десять одноплоскостных камер с размером чувствительной области  $576 \times 384 \text{ мм}^2$ . Конструкция этих камер описана в работах [8,9]. Они имеют  $L = 6 \text{ мм}$ , шаг катода  $s_c = 2 \text{ мм}$ . У шести из камер сигнальные проволоки ориентированы вертикально (измеряют координату X трека), у остальных четырех — горизонтально (Y). Порядок их расположения вдоль оси пучка — X Y X Y X Y X Y X X.

X-камера имеет наибольший из рассматриваемых камер прогиб стороны рамки, составляющий в центре около 55 мкм, при том, что удлинение проволоки под нагрузкой составляет около 1,4 мм. Таким образом, относительное снижение натяжения проволоки вследствие прогиба составляет достаточно малую величину около 8%. Поэтому при изготовлении головных камер не предпринималось специальных мер для предотвращения изменения натяжения проволок.

У-камера данного типа при намного меньшем прогибе (около 14 мкм) имеет наибольшее значение  $T_{kr} = 24,6$  Гс (при  $V = 4$  кВ рабочее напряжение этих камер составляло  $\approx 3,7$  кВ). Здесь для намотки сигнальных плоскостей использована более прочная вольфрам-рениевая проволока. Это позволило сделать натяжение сигнальных проволок несколько бóльшим ( $T_{ay} \approx 55$  Гс), обеспечив рекомендованный в [13] запас  $\frac{9}{4}T_{kr}$ , и отказаться от установки поддерживающих линий [9].

### 3.2. Пропорциональные камеры в магните (PCM)

После блока головных камер между полюсами магнита<sup>1</sup> размещены две одноплоскостные пропорциональные камеры с размером чувствительной области около  $1088 \times 530$  мм<sup>2</sup>. Камеры такой конструкции были предложены на установке ФОДС [10].

Камеры развернуты вокруг оси пучка на углы  $\pm 8^\circ$  во взаимно противоположных направлениях. Сигнальные вольфрам-рениевые позолоченные проволоки диаметром 20 мкм натянуты с силой 55 Гс вдоль короткой стороны камеры. Рассчитанный по формуле (2) прогиб анодной рамы в центре для этих камер составляет около 0,27 мм, что дает ослабление натяжения проволок на заметную величину в 22 %. Для предотвращения этого осуществлялась предварительная деформация рамы на расчетную величину с помощью болта с эксцентрической головкой, вворачиваемого в монтажный стол.

Анод-катодный зазор в камере 6 мм. Шаг катодных проволок 2 мм. Из-за большой их длины ( $l \approx 1200$  мм) в конструкции предусмотрены две поддерживающие линии (нейлоновая нить диаметром 0,2 мм), натянутые симметрично относительно оси камеры на расстояниях  $l/3$  от концов проволок перпендикулярно к ним. Как показали испытания камеры при изготовлении, их установка повышает предельно допустимое с точки зрения неустойчивости проволок напряжение на 300–500 В, до  $\sim 4,4$  кВ. Рабочее напряжение камер составляет около 3,9 кВ.

## 4. Микродрейфовые камеры ( $\mu DC$ ) в зазоре магнита

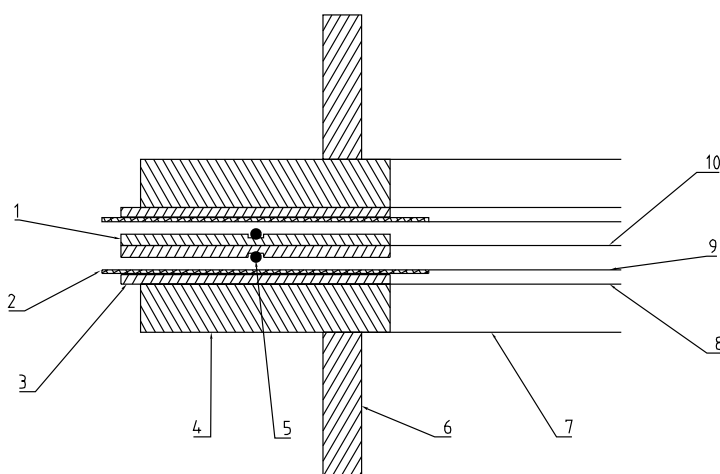
В зазоре магнита установлены две двухплоскостные микродрейфовые камеры, измеряющие X-координату трека. Эти камеры работают в пропорциональном режиме и имеют размеры чувствительной области  $1920 \times 830$  мм<sup>2</sup>. Структура электродов изображена на рис.5б. Шаг анодных проволок в сигнальных плоскостях  $s = 6$  мм, они вольфрамовые диаметром  $d_a = 30$  мкм. Посередине между анодными проволоками установлены потенциальные проволоки диаметром  $d_p = 100$  мкм из бериллиевой бронзы. Расстояние между катодными и анодными плоскостями равно  $L = 4$  мм. Катоды выполнены из лавсана толщиной 100 мкм с нанесённым на него графитовым слоем. Сигнальные проволоки двух плоскостей камеры сдвинуты на полшага друг относительно друга.

<sup>1</sup>Диполь с апертурой между полюсами  $2,5 \times 1$  м<sup>2</sup> и интегралом вертикально направленного поля  $\approx 2,3$  Т·м.



Механическая конструкция этих камер разрабатывалась с учётом требования минимизации потерь чувствительной области между полюсами магнита. С этой целью несущие рамки камер сделаны из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, несмотря на трудность её механической обработки. Поперечный разрез камеры схематически изображён на рис. 6. Толщина внешних рамок 4 составляет 14 мм, размеры окна —  $2090 \times 850$  мм. На одну поверхность внешней рамки 4 приклеивается лавсановый катод 8 и печатные платы 2 для распайки сигнальной плоскости 9, на другую — лавсановое окно 7, ограничивающее газовый объём. К центральной рамке 1 приклеен общий для двух плоскостей камеры катод 10. Ребро жёсткости 6 служит для предотвращения изгиба камеры. Конструкция камеры — разборная, уплотнение осуществляется резиновым шнуром 5 диаметром 2 мм, уложенным в канавку глубиной 1 мм на центральной рамке.

Рис. 6. Конструкция пропорциональных микродрейфовых камер. 1 — центральная рамка; 2 — печатная плата сигнальной плоскости; 3 — подложка; 4 — рамка; 5 — уплотнение; 6 — ребро жёсткости; 7 — окно; 8 — внешняя катодная плоскость; 9 — сигнальная плоскость; 10 — центральная катодная плоскость.



Расчёт конструкции производился по методике, описанной в работах [4,5,13]. Натяжение лавсановых катодов составляет примерно  $150 \text{ кГс/м}$ . При этом изменение анод-катодного расстояния под действием электростатических сил не превышает  $50 \text{ мкм}$ . Лавсановые окна, ограничивающие газовый объём, также имеют небольшое натяжение ( $\approx 20 \text{ кГс/м}$ ) для предотвращения “раздувания” камеры при продуве её газом. Потенциальные проволоки натянуты с силой  $T_p = 200 \text{ Гс}$ . Критическое натяжение сигнальных проволок для данной камеры рассчитывалось без учёта потенциальных, что завышает оценку, оно получилось равным  $T_{kr} = 13 \text{ Гс}$  для  $U = 3 \text{ кВ}$ . Выбранное нами значение натяжения  $T_a = 70 \text{ Гс}$ , вполне безопасное для вольфрамовой проволоки диаметром  $30 \text{ мкм}$ , многократно превышает  $T_{kr}$ .

Верхняя и нижняя (более длинные) стороны рамки имеют ширину всего  $6 \text{ см}$ , поэтому механические деформации, возникающие под действием силы натяжения лавсана и проволок, не являются пренебрежимо малыми. Прогиб в центре длинной стороны равен примерно  $1,7 \text{ мм}$ . Для его компенсации рамки предварительно деформировались с помощью предусмотренных в конструкции камеры технологических поперечных тяг.

Катодные плоскости и окна приклеивались к рамке камеры эпоксидной смолой. Перед склейкой лавсановая плёнка натягивалась до нужного значения  $T$  с помощью внешнего растягивающего устройства. При натяжении добивались отсутствия морщин, а также примерного равенства относительных удлинений сторон куска плёнки. Контроль натяжения производился путём измерения величины прогиба плёнки при помещении известного груза на жёсткую круглую площадку в центре рамки. Прогиб плёнки пропорционален весу груза  $Q$  и обратно пропорционален значению натяжения  $T$ :

$$u_0 = \alpha \cdot \frac{Q}{T}.$$

Коэффициент  $\alpha$  вычислялся с помощью численного решения уравнения Лапласа

$$\Delta u(x, y) = 0$$

с граничными условиями:  $u = 0$  на внутренней границе рамки и  $u = 1$  на границе круглой площадки. Тогда

$$\alpha = \left[ \oint (\vec{\nabla} u(x, y) \cdot \vec{n}) ds \right]^{-1},$$

интеграл берется по замкнутому контуру, содержащему площадку с грузом.

После снятия предварительной деформации поперечный размер в середине рамок изменялся не более чем на 0,1 мм. Это подтверждает корректность процедуры расчётов. Натяжение центрального катода делалось намного меньшим, чем крайних ( $\sim 20$  кГс/м), так как в силу симметрии электростатическое давление на эту плоскость малó (в идеальном случае равно нулю).

Графитовый слой наносился из пульверизатора краской DAG-205 фирмы ACHESON с последующей полировкой. Границы покрытой графитом области во избежание электрического пробоя на сигнальную плоскость были покрыты полоской изолятора (герметик ВГО-1) шириной около 1 см.

При изготовлении этих камер — больших по апертуре и с малым зазором между центральной проволочной плоскостью и плёночным катодом — особое внимание уделялось контролю постоянства этого зазора на всей длине камеры с помощью калиброванных шаблонов. Отклонения его величины из-за неплоскостности стальной рамы камеры, превышающие 200 мкм, устранялись выравниванием рамы путем ее локального нагружения с временным (до фиксации проволок на раме припайкой к плате) приклеиванием “мгновенным” цианокрилатным клеем к несущей раме сборочного стола.

Для предотвращения пробоев и утечек по печатной плате между близко расположенными анодными и потенциальными ламелями ее поверхность покрывалась изолирующей силиконовой резиной.

Рабочее напряжение этих камер при стандартной газовой смеси составляло  $\approx 1,8$  кВ при ширине плато 200–300 В. Камеры показали хорошую надежность работы — за семь лет (1989 ÷ 1996 гг.) их пришлось разбирать для ремонта один раз.

На рис. 7а приведено распределение времен дрейфа, на рис. 7б — отклонение измеренной в камере координаты трека от координаты, восстановленной по остальным камерам. Определенное таким методом пространственное разрешение камеры, усредненное по всем проволокам и включающее вклад различных источников ошибок (электроника, кабели и т.д.),  $\sigma \approx 250$  мкм.

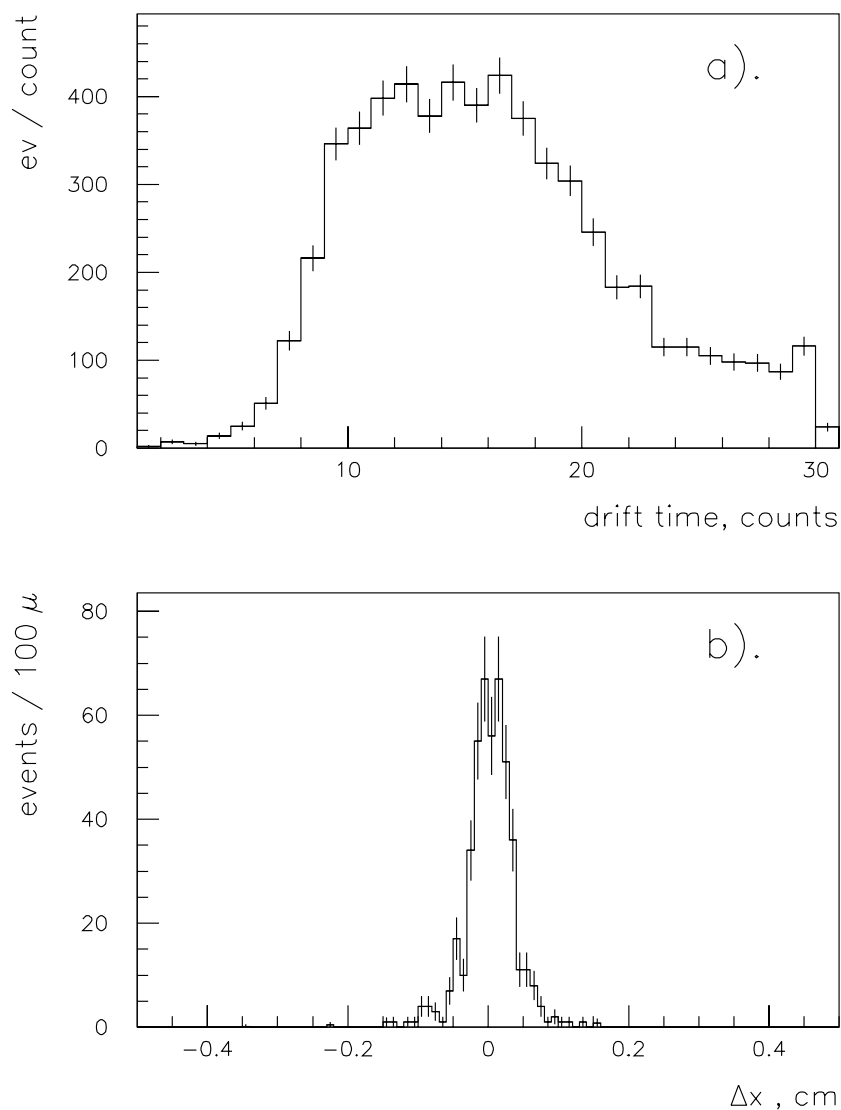


Рис. 7. Распределение времен дрейфа (а) и отклонение измеренной координаты трека от восстановленной по остальным камерам (б) для камер в центре магнита.

## 5. Большие микродрейфовые СГС-камеры (DC)

За черенковским счётчиком  $\check{C}$  установлены три трёхплоскостные микродрейфовые камеры размером  $2,56 \times 1,92$  м<sup>2</sup>, работающие в самогасящемся стримерном режиме. Они были созданы совместно сотрудниками ИФВЭ, ОИЯИ и ИФ АН

Грузии [15,16]. Камера представляет собой пакет из девяти дюралевых рамок. На внешние рамки натянуты лавсановые плёнки, ограничивающие газовый объём; семь внутренних рамок несут четыре катодных и три сигнальных электрода. Все электроды набраны из Cu-Be проволоки диаметром 100 мкм. На катодных плоскостях проволоки припаяны с шагом  $s_c = 2$  мм, с натяжением 100 Гс. Две сигнальные плоскости измеряют координаты X- и Y-трека, а проволоки на третьей (так называемой W-плоскости) повернуты на  $37^\circ$  относительно горизонтальной оси для “сшивки” сегментов треков в двух проекциях (X и Y) и разрешения право-левой неопределенности. Сигнальные X- и Y-электроды имеют соответственно по 160 и 120 анодных проволок с шагом 16 мм. W-электрод содержит 160 анодных проволок с шагом 19,2 мм. Посередине между анодными проволоками сигнальных плоскостей установлены потенциальные проволоки. Натяжение проволок в сигнальных плоскостях составляло 200 Гс.

Механическая конструкция камеры подробно описана в работе [15]. Основная проблема состоит в том, что рамка камеры, которая в случае межэлектродного расстояния 8 мм не может быть толще 6–7 мм, не в состоянии нести нагрузку со стороны натянутых проволок. Эта проблема решена следующим образом. Рамки сделаны довольно узкими (10 см) и после распайки проволок сильно деформируются, натяжение проволок уменьшается. Затем рамки стягиваются в пакет, собранная камера укрепляется на внешних стальных фермах и с помощью упругих тяг растягивается таким образом, что проволоки приобретают нормальное натяжение.

Так как удельная загрузочная способность СГС-камер невелика [14], в районе прохождения пучка создана нечувствительная зона (пассивный beam-killer). Для этого к катодным плоскостям приклеены кусочки пластика соответствующего размера. Рабочее напряжение на катодах и потенциальных электродах камер находится в диапазоне 3,6–3,8 кВ.

Измерения при испытаниях камер показали координатное разрешение в диапазоне 180–250 мкм в зависимости от наклона трека. На рис. 8 показаны характерные для работы в сеансе распределения времени дрейфа (а) и разности между координатой, измеренной в W-плоскости, и координатой, ожидаемой в W-плоскости, которая вычисляется по измерениям в X- и Y-плоскостях (б). Усредненная координатная точность этих камер, таким образом, составляет  $\sigma \approx 250$  мкм.

## 6. Газовое обеспечение

Для всех камер, работающих в пропорциональном режиме, обычно использовалась газовая смесь из аргона и паров метилала (диметоксиметан  $(\text{OCH}_3)_2\text{CH}_2$ ). Для этой смеси характерны низкое рабочее напряжение при заданном пороге электроники (или газовом усилении) и широкое плато [11], а также слабые эффекты старения.

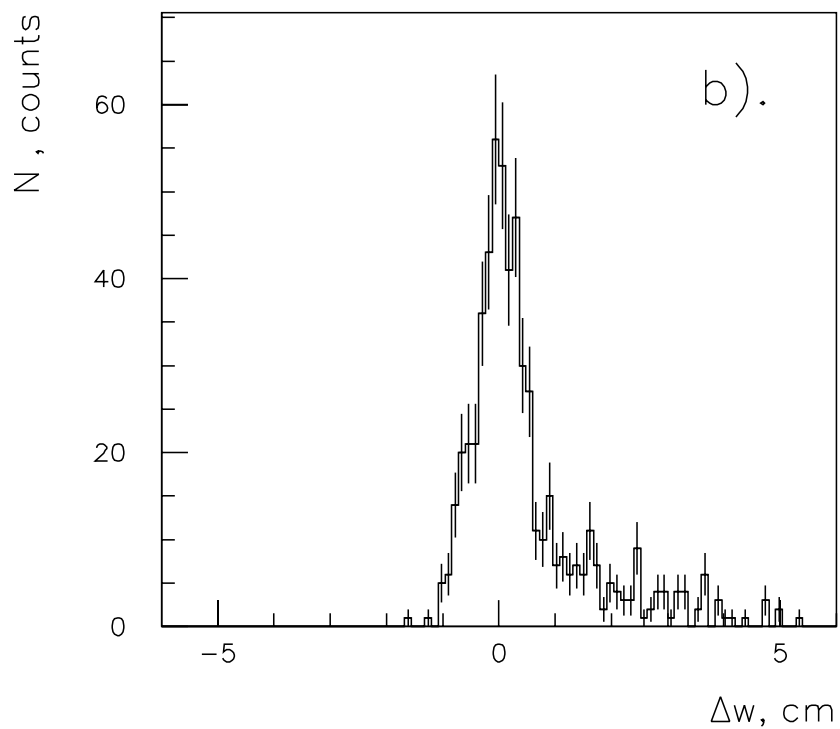
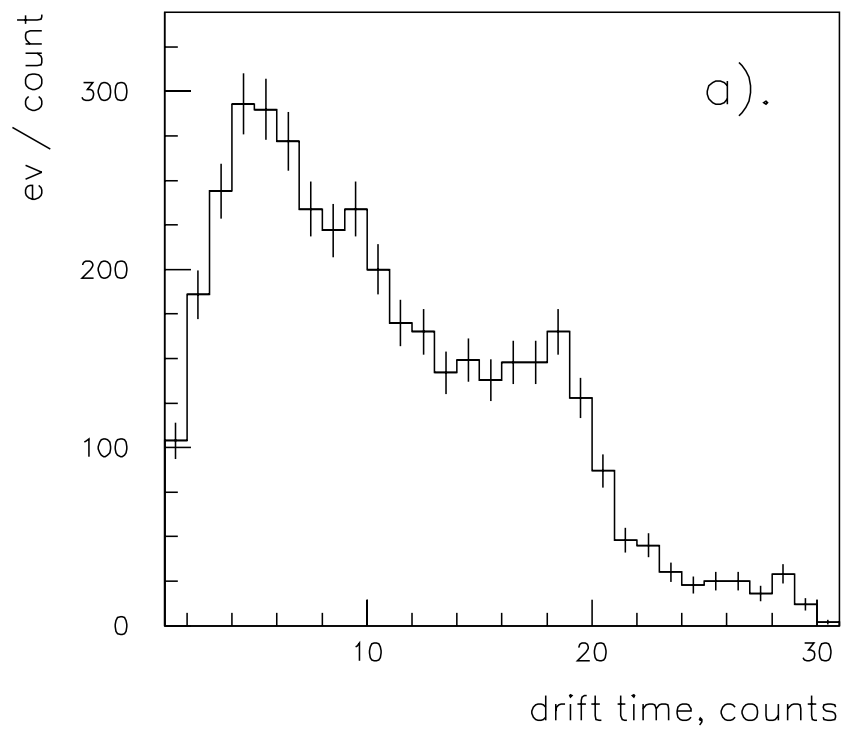


Рис. 8. Временное распределение сигналов с проволоки (а); разность между координатой, измеренной в  $W$ -плоскости, и координатой, ожидаемой в  $W$ -плоскости, по измерениям в  $X$ - и  $Y$ -плоскостях (б) в микродрейфовых СГС камерах.

Аргон подается из магистрали, подключенной к общему для нескольких установок резервуару. В качестве резервного источника возможно использование баллонов. Для приготовления смеси аргон пропускается через барботажный объём с метилалем, температура которого поддерживается равной  $10^{\circ}\text{C}$ , где насыщается его парами. Концентрация метилала в смеси примерно 20%. Расход тепла на испарение метилала ( $40 \text{ кДж/моль}$ ) довольно велик, что может ухудшать стабилизацию температуры и, в частности, приводить к зависимости концентрации метилала от расхода газа. Во избежание этого применялась двухуровневая система стабилизации температуры:

1. Сосуд с метилалем был помещён в холодильник, в котором с помощью разработанной в ОЭА ИФВЭ системы ТП-2 поддерживалась температура  $(10,0 \pm 0,2)^{\circ}\text{C}$ .
2. Элементы второго стабилизатора температуры — нагреватель мощностью около 50 Вт и контактный термометр с уставкой  $10,5^{\circ}\text{C}$  — были помещены прямо в объём метилала. Таким образом стабилизируется температура именно жидкости, а не только стенок сосуда.

Рабочее напряжение отдельной камеры постоянно при изменении суммарного потока газа через систему в диапазоне 10—100 л/час. Продув камер приготовленной смесью осуществляется при атмосферном давлении по нескольким (4–5) линиям с типичным объемом детекторов на одной линии 15–30 л. Суммарный расход этой смеси при работе всех камер в обычном режиме составлял 60 – 70 л/час.

Газовая система позволяет использовать в этих камерах и другие смеси (например,  $\text{Ar} + i\text{C}_4\text{H}_{10}$ ). Для микродрейфовых СГС-камер использовалась газовая смесь  $\text{Ar} + \text{C}_2\text{H}_4 + \text{метилал}$  в объёмном соотношении 3:2:1 [14]. Расход этой смеси в рабочем режиме составлял 50 л/час на каждую из трёх камер.

Для задания и контроля состава при смешивании нескольких компонентов в газообразной фазе используются масляные и поплавковые (так называемые “ротаметры”) расходомеры. Наряду с ними на ВЕС были применены электронные регуляторы расхода газа РРГ-9 [12]. Их преимуществами являются: задание и контроль расхода посредством электрических потенциалов; широкий диапазон расходов (1:50); стабилизация расхода в широком диапазоне входного и выходного давлений, что позволяет обойтись без применения прецизионных редукторов давления. Специально разработанная электронная схема вырабатывает сигнал при отклонении расхода какого-либо компонента больше допустимого.

Выводные газопроводы камер, проходя через масляные затворы, заканчиваются в коллекторе с присоединенным к нему разрезающим насосом, выбрасывающим газ в вытяжной трубопровод. Для предотвращения “схлопывания” камер из-за чрезмерного разрежения коллектор сообщается с атмосферой зала через натекаТЕЛЬ.

## 7. Электроника

На первых трех головных камерах использовались 32-канальные усилители-формирователи УП-32 [17], разработанные в ОЭА ИФВЭ, с порогом срабатывания около 1,5 мкА. На всех остальных камерах, работающих в пропорциональном режиме, были установлены также разработанные в ОЭА ИФВЭ 16-канальные предусилители-формирователи УПД-16 [18]. Они усиливают сигнал с анодных проволочек и при превышении порога срабатывания ( $\approx 1,5$  мкА) формируют на выходе парафазный импульс в уровнях ЭСЛ длительностью примерно 80 нс. Кроме этого, все выходные сигналы усилителя объединены в логическую функцию ИЛИ и после преобразования в уровни NIM поданы на его дополнительный выход.

Сигналы ИЛИ с части усилителей использованы для выработки сигнала охранной системы на  $\gamma$ -кванты, вылетающие из мишени под слишком большими углами. Для этого периферическая область нескольких головных камер (двух X и двух Y), выходящая за пределы углового аксептанса гамма-детектора, перекрыта конвертерами из свинцовых пластин толщиной 15 мм. Сигналы от соответствующих усилителей, в свою очередь, объединяются по ИЛИ в специальном блоке, размещенном непосредственно около усилителей. Оттуда полученный сигнал запрета по короткому кабелю поступает в триггерную электронику 1-го уровня.

Для устойчивой против возбуждения работы системы из нескольких сотен многоканальных низкочастотных усилителей потребовалось принять специальные меры по улучшению заземления металлизированного покрытия печатных плат. С этой же целью увеличено количество шунтирующих высокочастотных конденсаторов между шинами питания и “земли” платы — до одного на каждые 2 – 3 корпуса микросхем. Камеры с длинными сигнальными проволоками, чувствительными к внешним радиоизлучениям (например, ускоряющих станций У-70), заэкранированы с помощью алюминизированной лавсановой пленки.

Большая амплитуда сигнала дрейфовых камер, работающих в СГС-режиме, позволяет применить для них более простые усилители СА-16 с порогом  $\sim 200$  мкА, каждый из 16 каналов которых фактически представляет собой включенную стандартным образом микросхему КР597СА1. Эти усилители также формируют на выходе сигнал длительностью  $\sim 80$  нс.

Импульсы с усилителей всех трех типов, задержанные в телефонном кабеле длиной 75 м (см. ниже), поступают в приёмную электронику, выполненную в стандарте МИСС и установленную в домике экспериментаторов. Сигналы с дрейфовых камер принимаются 32-канальными регистрами ЛЭ-37 [19], имеющими 32 временных отсчёта. Цена отсчёта задается внешним тактовым генератором; для микродрейфовых камер в зазоре магнита это  $\approx 5$  нс, а для СГС камер —  $\approx 8,5$  нс. Сигналы с пропорциональных камер принимаются в аналогичные регистры ЛЭ-15, которые в отличие от ЛЭ-37 имеют по 64 канала с 16 отсчётами; цена отсчёта  $\approx 17$  нс. Применяемые модули способны регистрировать множественные срабатывания одного канала.

Измерение времени прихода сигнала для пропорциональных камер является полезным для настройки и контроля работы электроники и детектора. Кроме того, при максимальном времени дрейфа в детекторе много меньшем, чем полная шкала измерения (60–80 нс в сравнении с  $\sim 270$  нс), регистр служит цифровой задержкой, что позволило для части камер уменьшить длину телефонного кабеля до 40 м.

Для отбрасывания событий с более чем одной частицей в пучке в пределах разрешающего времени на двух плоскостях пучковых камер организован триггер на множественность срабатывания с кластеризацией соседних каналов. Для этого используются приёмные регистры ЛЭ-39 и решающий блок ЛЭ-43 [20].

Для контроля работоспособности каналов электроники на всех дрейфовых и пропорциональных камерах были установлены тестовые системы, управляемые аппаратными компьютерами Э-60 [20,21]. По сигналу компьютера посылался импульс на тестовые входы УПД-16, либо на группы входов УП-32 и СА-16 с другого конца анодных проволок. Принятый регистрами сигнал считывался Э-60. Таким образом контролировалась работоспособность всего тракта электроники “предусилитель + кабель + регистр”, а также правильность соединения разъемов.

## 8. Низковольтное и высоковольтное питание

Суммарное потребление усилителей камер по питанию  $-6$  В составляет более 300 А, по  $+6$  В — более 100 А. Источники низковольтного питания типа БНН-152 собраны в одной стойке, расположенной вне зоны пучка. Это облегчает доступ к источникам для их контроля и замены. Для компенсации падения напряжения на питающих кабелях обратная связь в регуляторе источника осуществлена по напряжению, снимаемому непосредственно с питающих разъемов камер. Для снижения электромагнитных наводок выводы нулевого потенциала БНН-152 развязаны с их корпусами и соединяются с “землей” усилителей только на самих печатных платах.

Высоковольтное питание всей трековой системы осуществляется от одного каркаса модульной микропроцессорной многоканальной системы CAEN SY-127 [22], управляемого с терминала. Отметим некоторые особенности системы и преимущества, которые она предоставляет:

— при превышении заданной величины потребляемого тока источник переходит в режим ограничения тока на заданный интервал времени, после чего напряжение снимается;

— возможно задание в широких пределах скорости изменения выходного напряжения, что особенно важно при работе с большими камерами;

— возможен переход по внешнему сигналу с одного напряжения на другое, что было использовано для подъема и снижения напряжения синхронно с циклом ускорителя в целях повышения устойчивости работы камер в условиях высокой загрузки и снижения эффектов старения;

— обеспечивается точность и повторяемость задания напряжений, а также удобство обращения к нужному каналу для контроля и изменения его состояния или характеристик.



## 9. Контроль функционирования при наборе данных

Помимо автономной проверки электронного тракта используемых детекторов с помощью аппаратных компьютеров, при работе в сеансе контролируется “в линию” состояние отдельных камер и трековой системы в целом [21]. Для этого анализируется часть принимаемых физических событий.

Для каждой измерительной плоскости трековых детекторов строится набор из трех гистограмм:

1. Частота срабатывания каждого из каналов (“провода”), дающая информацию о профиле пучка частиц, о функционировании охранной системы и о неработающих каналах.
2. Временной спектр зарегистрированных сигналов, дающий информацию как о характеристиках самого детектора, так и о специфических неисправностях электроники усиления и сбора данных, таких как самовозбуждение усилителей или неравномерность оцифровки ВЦП “чет-нечет”.
3. Множественность срабатывания, дающая представление о функционировании камеры, о распределении событий по числу треков (в частности, зависимость от настройки триггера) и о специфических неисправностях электроники сбора данных таких, как необнуление данных в автономных контроллерах регистров камер.

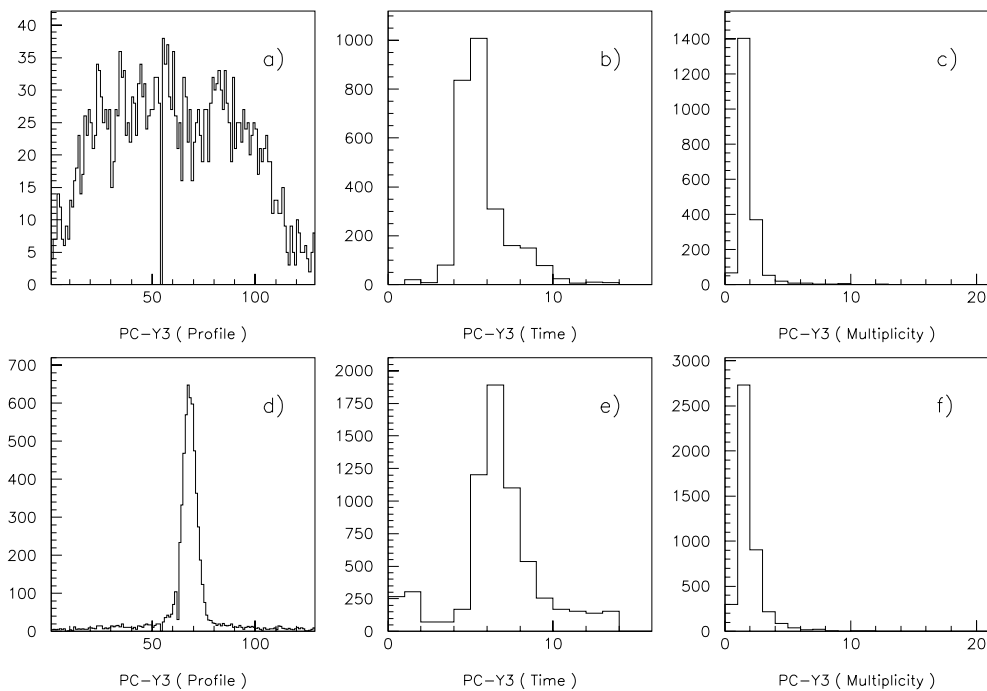


Рис. 9. Профиль пучка (а), распределения по времени срабатывания (б) и множественности (в) для пропорциональной камеры в мюонном пучке. (г),(д),(е) — то же в интенсивном пионном пучке.

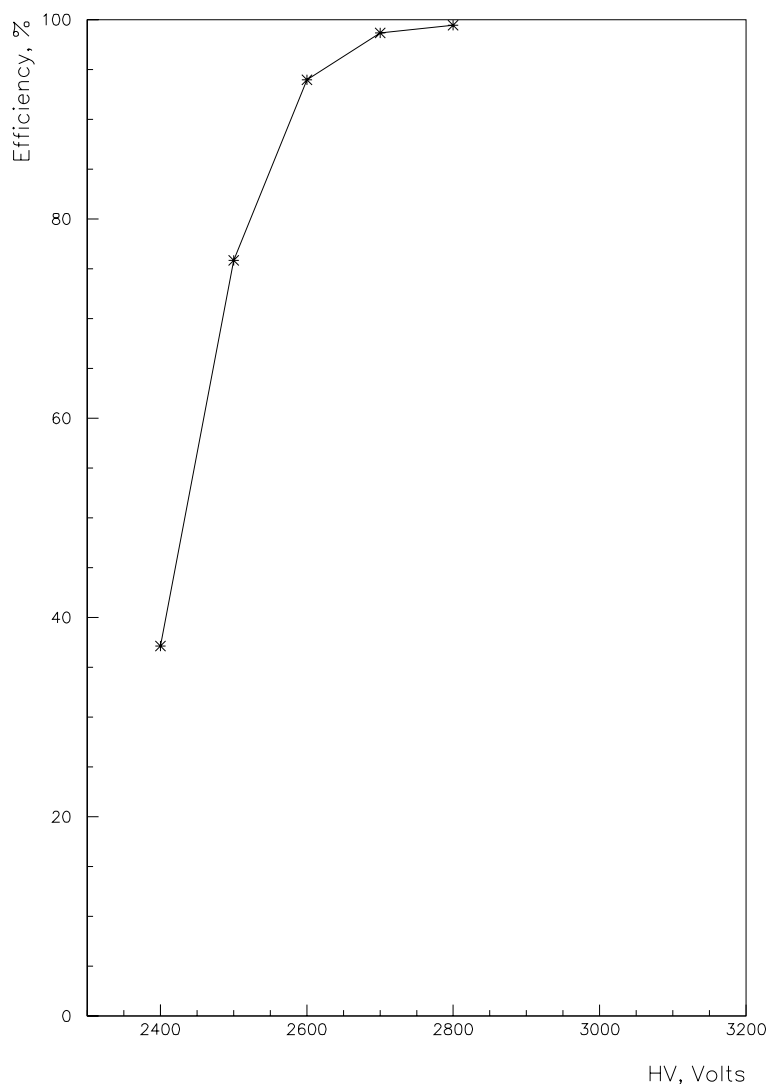


Рис. 10. Зависимость эффективности камеры от высокого напряжения на катоде.

На рис. 9 показаны профиль пучка, временное распределение и распределение по множественности для одной из пропорциональных камер перед магнитом, измеренные при их настройке в различных пучках частиц. Верхний ряд рисунков получен в широком<sup>2</sup> низкоинтенсивном пучке мюонов, нижний — в узком пионном пучке высокой интенсивности ( $\sim 1,5$  млн./с). Во втором случае во временном спектре появляется подложка, связанная с сигналом от другой, близкой по времени, пучковой частицы, а также, возможно, от частицы гало пучка (см. “крылья” на профиле пучка). Этим же обусловлено повышение средней множественности.

Настроечная кривая эффективности пропорциональной камеры в зависимости от высокого напряжения показана на рис. 10. Типичная усреднённая эффективность в физическом сеансе составляла около 90 %.

При наборе статистики программа визуализации выводит для просмотра на дисплей “электронный снимок” события, на котором в условном виде отображаются сигналы всех детекторов установки. Элементы установки изображаются в масштабе. Таким образом оценивается функционирование установки в целом и трековой системы как ее части. Дежурный физик, помимо прочего, контролирует “сшивку” сегментов треков в разных частях установки, их “привязку” к сигналам в сцинтилляционном годоскопе и ливням в калориметре, множественность треков.

<sup>2</sup>Наблюдаемая ширина пучка определялась в данном случае размерами запускающих сцинтилляционных счетчиков.

## 10. Общие характеристики трековой системы

Трековая система в составе установки ВЕС работала в сеансах, проведенных в течение нескольких (около 8) лет, при типичной интенсивности пионного пучка 1–1,5 млн./сек. Интегральный поток за это время оценивается в  $10^{13}$  частиц. При стандартном режиме эксплуатации система показала стабильную работу.

При использовании в одном из сеансов в качестве гасителя в газовой смеси изобутана вместо метилала наблюдался существенный и быстрый эффект старения камер. Образование осадений на катодных и анодных проволоках привело к необходимости ремонта камер после сеанса.

Характеристики трековой системы в целом, достигнутые при наборе физических данных на установке ВЕС, приведены ниже. Система эффективно регистрирует треки вторичных заряженных частиц в широком диапазоне импульсов (выше  $\sim 0,4$  ГэВ/с) и углов вылета из мишени (до  $\sim 150$  мрад в вертикальной и  $\sim 200$  мрад в горизонтальной плоскостях).

Геометрическая эффективность регистрации событий типичной реакции — дифракционного образования пионом на ядре трех заряженных пионов — показана на рис. 11. Она определена методом Монте-Карло с использованием компьютерной модели установки ВЕС и реальных данных. В области малых масс (до  $\sim 1,5$  ГэВ/с<sup>2</sup>) аксептанс примерно в равной мере определяется триггерным сцинтилляционным годоскопом и аксептансом трековой системы, а при больших массах — практически полностью последним.

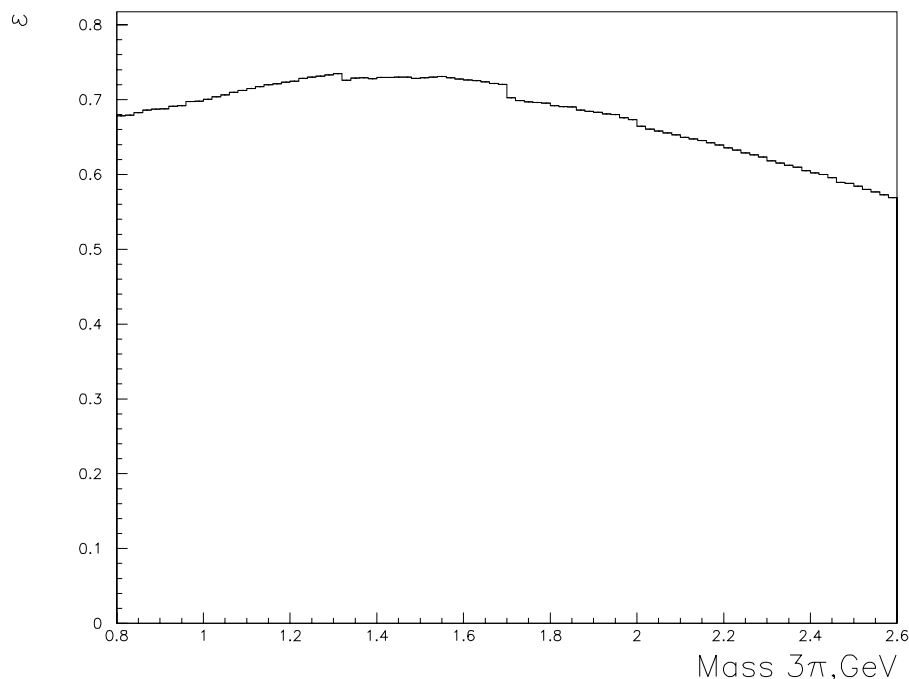


Рис. 11. Геометрическая эффективность (аксептанс) регистрации дифракционного рождения системы  $\pi^+\pi^-\pi^-$  при равномерном распределении пионов по фазовому объему.

Для оценки аппаратного разрешения установки при регистрации систем заряженных частиц использовалась простая модель, учитывающая вклады основных составляющих в погрешность измерения параметров отдельного трека. Эти вклады и их параметризации таковы:

— угловое разрешение системы головных камер<sup>3</sup> в горизонтальной и вертикальной плоскостях

$$\sigma(\theta_{xz}) = \sigma(\theta_{yz}) = 0,3 \text{ мрад};$$

— импульсное разрешение магнитного спектрометра в горизонтальной плоскости

$$\sigma(p_{xz}) \text{ (ГэВ/с)} = 4 \cdot 10^{-4} \cdot p_{xz}^2 \text{ (ГэВ}^2/\text{с}^2);$$

— ошибка в пространственном угле из-за многократного рассеяния в мишени

$$\sigma(\theta) \text{ (мрад)} = 0,0136 \cdot \sqrt{X}/p \text{ (ГэВ/с)},$$

где  $X$  — длина трека в веществе в единицах радиационной длины,  $X \sim 0,1$ ;

— импульсная ошибка из-за многократного рассеяния в веществе магнитного спектрометра (около 0,1 радиационной длины, в основном стенки многоканального черенковского счетчика)

$$\sigma(p_{xz}) = 6,3 \cdot 10^{-3} \cdot p_{xz}.$$

В приведённых выражениях  $\sigma$  — дисперсия гауссовского распределения.

Применимость модели иллюстрируется следующим примером разрешения по двухчастичной эффективной массе. На рис. 12а показан спектр масс  $K^+K^-$  в событиях реакции  $\pi^-p \rightarrow nK^+K^-\pi^+\pi^-$  при импульсе пучка 37 ГэВ/с. Наблюдаемый пик  $\phi$ -мезона имеет ширину на полувысоте  $\Gamma = (8,8 \pm 1,5) \text{ МэВ/с}^2$ .

Для моделирования разрешения установки в этих измерениях параметры треков экспериментально зарегистрированных каонов были случайно разыграны с вышеприведёнными среднеквадратичными отклонениями от их измеренных значений. С использованием полученных таким образом векторов импульсов определена величина эффективной массы.

Эта процедура приводит к уширению узкого ( $1 \text{ МэВ/с}^2$ ) пика, вырезанного из массового спектра в рассматриваемой области, до  $\sigma = 1,7 \text{ МэВ/с}^2$ , а брейт-вигнеровского пика с табличной шириной  $\phi$ -мезона ( $\Gamma = 4,4 \text{ МэВ/с}^2$ ) — до  $\Gamma = 7,5 \text{ МэВ/с}^2$ , что совместимо в пределах ошибок с экспериментально измеренной шириной. В данном случае разрешение определяется примерно в равной мере угловым разрешением ( $\sigma \approx 0,9 \text{ МэВ/с}^2$ ) и многократным рассеянием в мишени ( $\sigma \approx 1,2 \text{ МэВ/с}^2$ ).

Абсолютная точность восстановления массы характеризуется измеренным положением пика  $M = (1019,7 \pm 0,5) \text{ МэВ/с}^2$  и его сравнением с табличной  $M_\phi = 1019,41 \text{ МэВ/с}^2$ . Примером восстановления массы в многочастичной моде и при большем энерговыделении в распаде является наблюдение сигнала от распада  $f_1(1285) \rightarrow \pi^+\pi^+\pi^-\pi^-$  в 4-частичном спектре масс 5-трековых событий ( $3 \pi^- 2 \pi^+$ ) — см. рис. 12б). Его фитирование дает значение эффективной массы  $M(f_1) = (1279,5 \pm 1,5) \text{ МэВ/с}^2$  (ср. с табличной  $(1282,2 \pm 0,7) \text{ МэВ/с}^2$ ).

<sup>3</sup>Для пучковой части  $\sigma(\theta) \approx 0,12 \text{ мрад}$ .

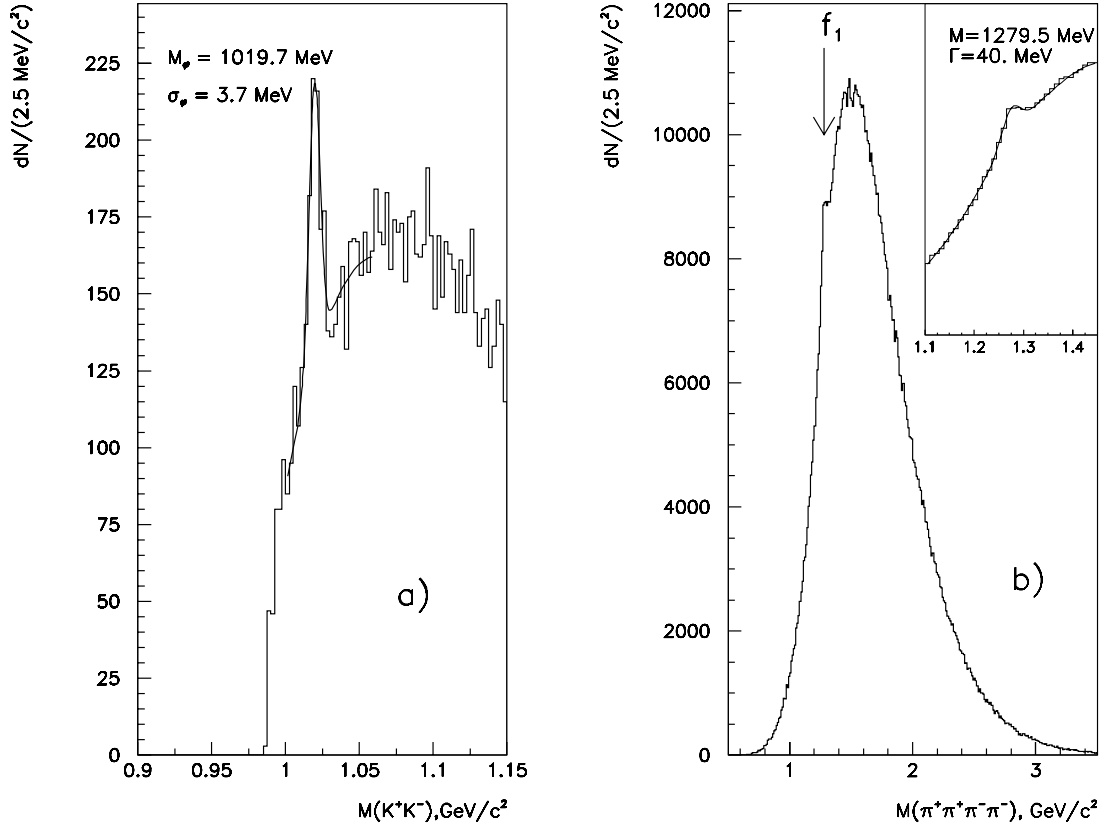


Рис. 12. (а) Спектр эффективных масс  $K^+K^-$  в событиях реакции перезарядки  $\pi^-p \rightarrow nK^+K^-\pi^+\pi^-$ . (б) Спектр эффективных масс  $\pi^+\pi^+\pi^-\pi^-$  в дифракционной реакции  $\pi^-A \rightarrow A(2\pi^+)(3\pi^-)$ .

Для аппаратного гауссового разрешения в этой области масс получается значение  $\sigma \approx 9 \text{ МэВ}/c^2$ . При этом наибольший вклад ( $\approx 7,2 \text{ МэВ}/c^2$ ) дает многократное рассеяние в веществе мишени. Следующий по значимости вклад — рассеяние в спектрометре, около  $3,4 \text{ МэВ}/c^2$ .

Наблюдаемая ширина  $\Gamma = (40 \pm 10) \text{ МэВ}/c^2$  может быть получена свёрткой функции Брейт-Вигнера с табличным значением  $\Gamma(f_1) = 25 \text{ МэВ}/c^2$  и аппаратного разрешения. Большая систематическая ошибка в измерении ширины обусловлена наличием под пиком  $f_1$  быстрорастущего фона и вклада от распада  $f_2(1270) \rightarrow 4\pi^\pm$ .

Усреднённое по спектру масс  $2\pi^+3\pi^-$  разрешение по полному поперечному импульсу в обеих плоскостях ( $xz$  и  $yz$ ), определяющее (в области малых передач) разрешение по квадрату переданного импульса, согласно описанной модели составляет  $\sigma(p_x^t) \approx \sigma(p_y^t) \approx 13 \text{ МэВ}/c$ , причём вклад многократного рассеяния в мишени около  $10 \text{ МэВ}/c$ .

Еще один из процессов, потенциально подходящих для измерения аппаратных эффектов, — распад пучкового  $K^-$ -мезона на 3 заряженных  $\pi$ -мезона. В частности, наблюдаемое “ $t$ ”-распределение (рис. 13) полностью обусловлено этими эффектами, так как действительной передачи импульса не происходит.

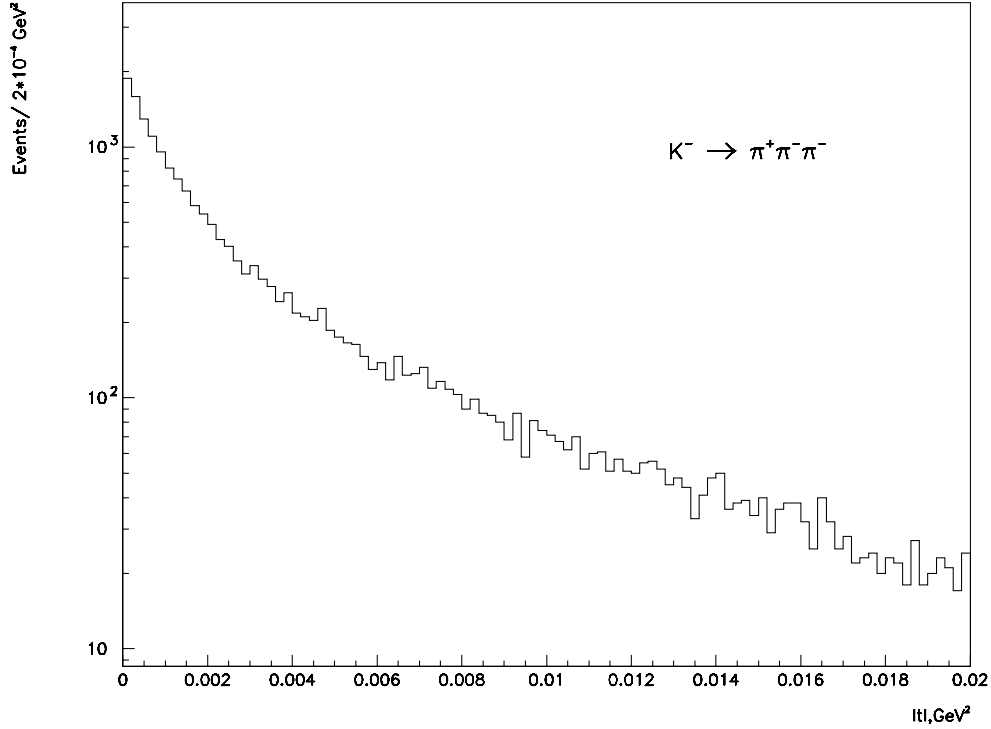


Рис. 13. Распределение по  $|t|$  для событий распада пучкового  $K^-$  - мезона в  $\pi^+\pi^-\pi^-$ .

События рассматриваемого процесса имеют специфический характер: все продукты распада испускаются из-за малости энергосвечения в очень узком конусе вокруг оси интенсивного пучка. При регистрации и реконструкции таких событий возможно проявление различных свойств детекторов и эффектов, приводящих к ухудшению характеристик системы. Среди них дискретность измерений координат треков, локальная неэффективность и деградация одно- и двухтрекового разрешения в “горячей” зоне детекторов, несовершенство алгоритмов разделения и восстановления близких треков.

Вследствие неполноты используемой здесь модели, не учитывающей эти эффекты, для данного процесса аппаратная ошибка по результатам моделирования оказывается сильно заниженной по сравнению с экспериментальными данными.

На рис. 14а,б гистограммами с ошибками показаны наблюдаемые распределения по массе и горизонтальной проекции поперечного импульса трех  $\pi$ -мезонов. Сплошные гистограммы показывают для сравнения смоделированные распределения. Экспериментальный пик  $K^-$ -мезона в спектре масс (рис. 14а) шире моделируемого в 2 раза ( $\sigma \approx 8,5$  МэВ/ $c^2$  против  $4,3$  МэВ/ $c^2$ ), а его максимум находится на  $498$  МэВ/ $c^2$ . Смоделированное распределение по  $p_x^t$  (рис. 14б) имеет  $\sigma = 12$  МэВ/ $c$ . Экспериментальное распределение описывается суммой двух гауссовых функций с дисперсиями  $\sigma_1 = 22$  МэВ/ $c$  и  $\sigma_2 = 54$  МэВ/ $c$  с относительными вкладами соответственно 45 и 55%.

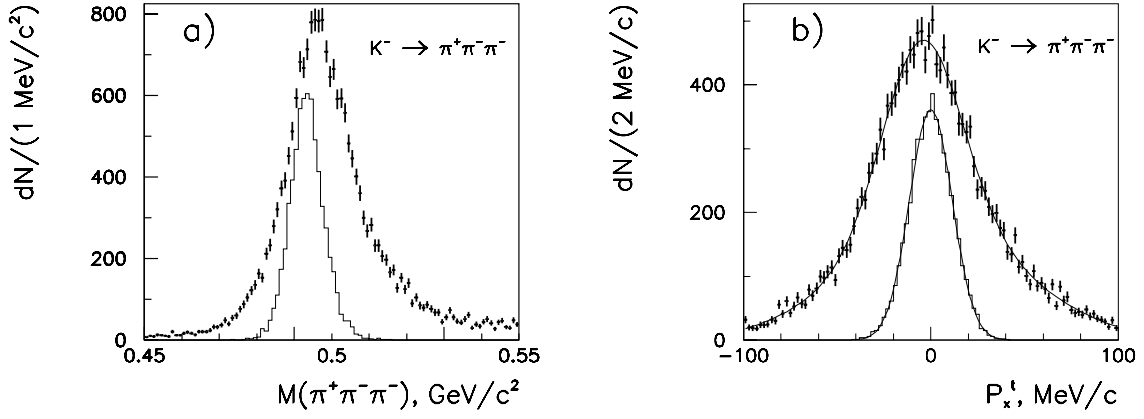


Рис. 14. Распределения по  $M_{3\pi}$  (а) и  $P_x^t$  (б) для событий распада пучкового  $K^-$  - мезона в  $\pi^+\pi^-\pi^-$ . Гистограммы с ошибками — экспериментальные данные. Сплошные гистограммы — смоделированные данные. Сплошные кривые — результаты подгонки.

## Заключение

На основе пропорциональных и дрейфовых камер создана трековая система установки ВЕС, насчитывающая в сумме более 7 тыс. электронных каналов съёма информации и включающая в себя, помимо собственно трековых детекторов, все необходимые для их эксплуатации подсистемы и программное обеспечение.

Система регистрирует треки вторичных заряженных частиц в области углов вылета до  $\sim 150$  мрад в вертикальной и  $\sim 200$  мрад в горизонтальной плоскостях, а также пучковой частицы. Угловое разрешение в вертикальной и горизонтальной плоскостях составляет: для пучковой части системы 0,12 мрад, для спектрометрической части 0,3 мрад. Импульсное разрешение магнитного спектрометра (в горизонтальной плоскости)  $\sigma(p_{xz})$  (ГэВ/с)  $\approx 4 \cdot 10^{-4} \cdot p_{xz}^2$  (ГэВ<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>).

Трековая система эксплуатировалась в физических сеансах на установке ВЕС при типичной интенсивности пучка 1–1,5 млн./сек и показала удовлетворительную работу на протяжении около 8 лет.

Достигнутое разрешение установки по эффективной массе с учётом многократного рассеяния составляет  $\sigma \approx 1,7$  МэВ/с<sup>2</sup> для системы  $K^+K^-$  в области массы  $\phi$ -мезона и  $\sigma \approx 9$  МэВ/с<sup>2</sup> для системы  $2\pi^+2\pi^-$  в области массы  $f_1$ -мезона. Разрешение по поперечному импульсу дифракционно образуемой системы  $2\pi^+3\pi^-$  оценивается в 13 МэВ/с.

В заключение авторы выражают благодарность сотрудникам ИФВЭ Е.Н. Чернову, А.Я. Васину, В.И. Кашееву, А.Ф. Епифаненкову, И.Ю. Смотровой, В.Л. Никитиной, А.Г. Константиновой, внёсшим большой вклад в создание и эксплуатацию трековой системы установки ВЕС, а также В.Ф. Константинову, И.А. Качаеву и В.А. Дорофееву за полезные обсуждения и замечания.

Эта работа была выполнена при поддержке фондов РФФИ (грант 98-02-16392) и РФФИ-ИНТАС (грант 95-0267).

## Список литературы

- [1] Викторов В.А., Куршецов В.Ф. — Препринт ИФВЭ 82-07, Серпухов, 1982.
- [2] Bouclier R. et. al. A Modular Multidrift Vertex Detector. CERN-EP/85-169;  
Bouclier R. et. al. Recent Developments of the Multidrift Tube. CERN-EP/89-45.
- [3] Review of Particle Physics. // Phys. Rev. D **54** (1996) 145.
- [4] Колачев Г.М. — Препринт ИЯФ 79-150, 1979.
- [5] Андреев В.А. и др. — Препринт ЛИЯФ 1128, Ленинград, 1985.
- [6] Sauli F. — Preprint CERN 77-09
- [7] Ерин С.В. и др. — Препринт ИФВЭ 88-102, Серпухов, 1988;  
Ерин С.В. и др. — Препринт ИФВЭ 88-103, Серпухов, 1988.
- [8] Викторов В.А. Система многопроволочных пропорциональных камер и её применение в экспериментальной установке "Лептон-Ф" для исследования редких эксклюзивных процессов. Диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, Серпухов, 1984.
- [9] Викторов В.А., Головкин С.В. — Препринт ИФВЭ 80-7, Серпухов, 1980.
- [10] Абрамов В.В. и др. — Препринт ИФВЭ 83-16, Серпухов, 1983.
- [11] Деревщиков А.А. и др. — Препринт ИФВЭ 89-99, Протвино, 1990.  
Антипов Ю.М. и др. — Препринт ИФВЭ 87-25, Серпухов, 1987.
- [12] Гостик А.Л., Ровенский Л.З. // Электронная промышленность. 1989, т.8, с.82.
- [13] Алексеев Г.Д. и др. // ПТЭ. 1978, т.46, с.47.
- [14] Алексеев Г.Д., Круглов В.В., Хазинс Д.М. // ЭЧАЯ. 1982, т.13 вып.3, с.703.
- [15] Хазинс Д.М. Обнаружение, исследование и применение самогасящегося стримерного разряда в проволочных детекторах частиц. Диссертация на соискание учёной степени доктора физико-математических наук, Дубна, 1985.
- [16] Выскочил С. и др. Дрейфовые СГС камеры размером  $2,5 \times 1,9 \text{ м}^2$ . Международный симпозиум по координатным детекторам в физике высоких энергий, Дубна, 1987, с. 202-204.
- [17] Антипов Ю.М. и др. — Препринт ИФВЭ 77-85, Серпухов, 1977.
- [18] Бушнин Ю.Б., Коноплянников А.К. — Препринт ИФВЭ 92-105, Протвино, 1992.



- [19] Бушнин Ю.Б. и др. — Препринт ИФВЭ 88-48, Серпухов, 1988.
- [20] Битюков С.И. и др. — Препринт ИФВЭ 94-101, Протвино, 1994.
- [21] Битюков С.И. и др. — Препринт ИФВЭ 95-77, Протвино, 1995.
- [22] CAEN SY-127, User Manual, 1986.

*Рукопись поступила 8 сентября 1998 г.*

Г.В.Борисов и др.  
Трековая система установки ВЕС.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы  $\text{\LaTeX}$ .  
Редактор Н.В.Ежела. Технический редактор Н.В.Орлова.

---

Подписано к печати 16.09.98. Формат  $60 \times 84/8$ .      Офсетная печать.  
Печ.л. 2,87.    Уч.-изд.л. 2,2.    Тираж 150.    Заказ 291.    Индекс 3649.  
ЛР №020498 17.04.97.

---

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий  
142284, Протвино Московской обл.

