

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

---

У-169

13-89-679

**ЧАЛЫШЕВ**  
Вячеслав Владимирович

УДК 539.1.074.2

**СОЗДАНИЕ СИСТЕМЫ БОЛЬШИХ ДРЕЙФОВЫХ КАМЕР  
ДЛЯ МЮОННОГО СПЕКТРОМЕТРА  
УСТАНОВКИ "НЕЙТРИННЫЙ ДЕТЕКТОР"**

**Специальность: 01.04.01 - экспериментальная физика**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Дубна 1989

Работа выполнена в Общезинститутском научно-методическом отделении Объединенного института ядерных исследований.

Научные руководители:

доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник

ГОЛУТВИН  
Игорь Анатольевич

кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник

БАРАБАШ  
Леонид Сергеевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,  
профессор

ЗАНЕВСКИЙ  
Дрий Вацлавович

кандидат физико-математических наук,  
младший научный сотрудник

БЕЛЯЕВ  
Игорь Михайлович

Ведущее научно-исследовательское учреждение:  
Институт физики высоких энергий,

Протвино

Защита диссертации состоится "\_\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1989 г.  
в \_\_\_\_\_ часов на заседании Специализированного Совета  
Д-047.01.02 при Лаборатории высоких энергий Объединенного института  
ядерных исследований, г.Дубна, Московской обл.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.

Автореферат разослан "\_\_\_\_" \_\_\_\_\_ 198 г.

Ученый секретарь

Специализированного Совета

М.Ф. ЛИХАЧЕВ

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность

Важнейшее место в научных программах ускорительных центров занимают экспериментальные исследования в пучках нейтрино и антинейтрино высоких энергий. На сооружаемом в настоящее время в Серпухове Ускорительно-накопительном комплексе также будет выполняться широкая программа нейтринных исследований.

Прогресс в этой области физики элементарных частиц во многом определяется методическим обеспечением экспериментальных исследований и, в первую очередь, - развитием техники координатных детекторов.

В настоящее время в нейтринном пучке ИФВЭ в режиме набора экспериментальных данных работает одна из крупнейших установок - "Нейтринный детектор" сотрудничества Берлин - Будапешт - Дубна - Серпухов. Имеющаяся в составе установки физическую аппаратуру с некоторыми дополнениями предполагается использовать для проведения программы по нейтринным исследованиям на УНК.

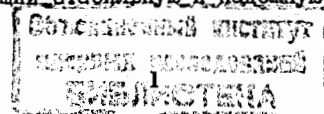
Цель работы - создание координатных детекторов для установки "Нейтринный детектор" адекватно удовлетворяющих проектным требованиям и проведение методических исследований характеристик детекторов:

- с радиоактивным источником;
- в пучке заряженных частиц нейтринного канала для детекторов мюонного спектрометра.

Научная новизна. В диссертационной работе приведены результаты экспериментальных исследований характеристик больших дрейфовых камер, находящихся в составе мюонного спектрометра установки "Нейтринный детектор".

Представлена новая конструкция большой дрейфовой камеры, изготовленной на основе отечественных сотовых панелей.

Предположен и реализован на установке "Нейтринный детектор" импульсный режим высоковольтного питания электродов больших дрейфовых камер, обеспечивающий стабильную и надежную работу последних.



**Практическая ценность.** На основе предложенной конструкции созданы большие дрейфовые камеры, использованные в качестве координатных детекторов на установке "Нейтринный детектор". Предполагается использование этих детекторов в нейтринных экспериментах на УНК.

Импульсное питание электродов дрейфовых камер может быть использовано как способ улучшения характеристик других газовых детекторов.

Автор защищает:

#### 1. Практические результаты:

- согласно проектным требованиям разработаны и созданы большие дрейфовые камеры;
- созданные дрейфовые камеры установлены и запущены в качестве координатных детекторов установки "Нейтринный детектор";
- внедрено импульсное высоковольтное питание как способ улучшения характеристик дрейфовых камер.

#### 2. Методические результаты:

- экспериментальные исследования характеристик пропорциональных камер с катодным считыванием и прототипов дрейфовых камер;
- экспериментальные исследования характеристик серийных дрейфовых камер для различных газовых смесей и различных способов высоковольтного питания электродов - постоянным и импульсным.

**Апробация работы.** Результаты, положенные в основу диссертации, докладывались на научных семинарах ОНМО, на рабочих совещаниях по нейтринному детектору, на заседаниях секций Ученого совета ОИЯИ, представлялись на XII Международной конференции по физике нейтрино и астрофизике (Япония, Сендай, 1986).

**Публикации.** В диссертации обобщены результаты работ, выполненных автором в 1980-1989 гг. в ОНМО, ЛВЗ ОИЯИ, ИФВЭ (Серпухов). Основные результаты опубликованы в работах 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и изложена на страницах. В ней содержится 48 рисунков и список цитируемой литературы из 39 наименований.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** подчеркнута актуальность проблемы, сформулированы цели работы, определены основные положения, вынесенные на защиту.

**В первой главе** изложено: краткое описание установки и физической программы исследований, фоновые условия в зоне нейтринного детектора и требования к координатным детекторам.

Главные особенности регистрации процессов взаимодействия нейтрино обусловлены крайне малым их сечением. Последнее ведет автоматически к использованию массивных детекторов, которые одновременно являются мишенями и анализаторами.

Расположение нейтринного канала и элементы детектора показаны на рис. 1.

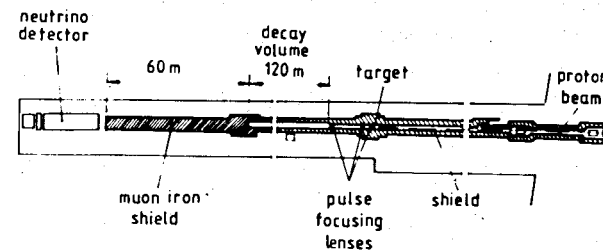


Рис. 1. Расположение элементов нейтринного канала ИФВЭ (Серпухов).

Пионы и каоны, рожденные в мишени, фокусируются в распадный канал 120 метров длиной тремя линзами. Железный мюонный фильтр, поглощающий заряженные компоненты распадов К и П - мезонов дает возможность получения пучков нейтрино и антинейтрино широкого спектра, дихроматические пучки нейтрино и антинейтрино, пучки обогащенные электронным нейтрино.

Нейтринный детектор состоит из мишени-калориметра, ливневого детектора электронов и мюонного спектрометра.

Мишень-калориметр состоит из 37 модулей. Каждый модуль содержит:

- 1 - железную магнитную раму размером  $(4,5 \times 4,5) \text{ м}^2$ , толщиной 110 мм по пучку с внутренним окном размером  $(3 \times 3) \text{ м}^2$ ;
- 2 - 10 сцинтилляционных счетчиков размером  $(0,2 \times 0,3 \times 5) \text{ м}^3$ , наполненных жидким сцинтиллятором на основе уайт-спирита;
- 3 - две плоскости (X и Y) из дрейфовых камер.

Вес активной мишени-сцинтиллятора ограничивается размером  $(3 \times 3) \text{ м}^2$  и равен 50 тоннам и 110 тоннам с алюминиевыми фильтрами. Проектная эффективность регистрации мюонов составляет 90%, энергетическое разрешение  $E/E_\mu = 15 - 25\%$ , угловое разрешение  $\Delta\theta_\mu = (10 - 30) \text{ мрад}/\rho \text{ ГэВ}/c$ .

Ливневый детектор электронов расположен в зазоре между мишенью-

калориметром и мюнным спектрометром. Его размеры (0,2 x 3,6 x 3,6) м<sup>3</sup>. Детектор состоит из 18 горизонтальных ячеек. Каждая ячейка имеет 3,6 м в длину, 19 см в высоту, 20 см в глубину и состоит из 12 слоев свинца по 4 мм каждый и 12 слоев сцинтиллятора. Детектор толщиной 11 радиационных длин увеличивает полезный объем для регистрации  $\nu_e$  - рассеяния, также он необходим для регистрации гамма-квантов и электронов от взаимодействия  $\nu_e$  с нуклонами.

Характеристики ливневого детектора были изучены в пучке заряженных частиц в интервале энергий от 1 до 5 ГэВ:

- энергетическое разрешение  $16/\sqrt{E}$  %;
- неэффективность разделения адронов и электронов 1,5% при 1,6 ГэВ и  $\leq 0,8$  % при 4,5 ГэВ;
- среднее значение распределения амплитуд импульсов от энергии падающего электрона в области от 1 до 5 ГэВ имеет достаточно хорошую линейность.

Мюнный спектрометр расположен в конце установки и состоит из 13 магнитных железных дисков: диаметр диска 4 м, толщина по пучку 220 мм. Пять дисков толщиной 220 мм расположены в передней части спектрометра, восемь дисков - (2 x 220) мм - в конце. X и Y плоскости дрейфовых камер расположены в зазорах между дисками. Мюнный спектрометр предназначен для измерения импульсов и определения знака заряженных мюонов. Проектное разрешение по импульсам мюонов составляет в среднем  $\Delta P/P_\mu = 10$  %. Две X-Y годоскопические сцинтилляционные плоскости расположены в 3-ем и 6-ом зазорах и служат для определения временных и пространственных координат проходящих мюонов. На рис. 2 представлена временная структура пучка по четверным совпадениям всех сцинтилляционных плоскостей мюонного спектрометра.

В зависимости от режима работы установки запуск электроники считывания осуществляется либо от первого банча ускорителя (рабочий триггер), либо от совпадения сигналов с разных сцинтилляционных плоскостей. Использование триггера от годоскопических плоскостей, перекрывающих весь чувствительный объем мюонного спектрометра, позволяет исследовать (измерить) такие рабочие характеристики камер, как пьедесталы, скорости дрейфа и эффективность регистрации треков.

Для восстановления треков частиц в калориметре и в мюонном спектрометре используются два типа камер (размером (4 x 0,5) м<sup>2</sup> и (4 x 2) м<sup>2</sup>). Оба типа имеют похожую структуру дрейфовых ячеек. Дрейфовые камеры размером (4 x 0,5) м<sup>2</sup> (изготовлены в ИФВЭ) имеют ячейку с длиной дрейфа равной 250 мм. 360 камер такого типа размещены в зазорах разных магнитов второй половины мишени-калориметра. Камеры размером (4 x 2) м<sup>2</sup> (изготовлены в ОИЯИ) состоят из 8 ячеек с

с длиной дрейфа равной 120 мм. 120 камер такого типа было изготовлено, 68 из них используются в первой части калориметра и 36 в мюонном спектрометре. Поперечное сечение одной дрейфовой ячейки камеры второго типа показано на рис. 3.

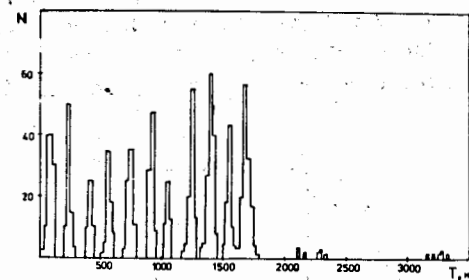
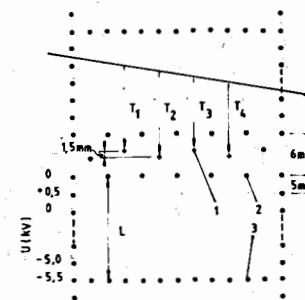


Рис. 2. Временная структура пучка по четверным совпадениям всех сцинтилляционных плоскостей.

Рис. 3. Поперечное сечение одной ячейки дрейфовой камеры.



На рис. 4 приводится временное распределение сигналов с проволоч дрейфовых камер мюонного спектрометра и мишени части ОИЯИ (~3000 каналов) при работе в нейтринном пучке. Начало распределения характеризует суммарный уровень шумов по камерам, экспоненциальный хвост определяется фоном медленных нейтронов.

Серьезным препятствием при проведении экспериментов на нейтринном детекторе является фон, загружающий регистрирующую аппаратуру. Трудности при реконструкции нейтринных событий накладывают жесткий предел на допустимую загрузку детектора. В качестве предварительной оценки допустимой загрузки детектора была принята величина 0,5 I/м<sup>2</sup>.

В результате усиления и расширения железного мюонного фильтра загрузка нейтринного детектора на конец 1988 года составляла

$(1 + 2) \text{ I}/\text{м}^2$  (при  $10^{13}$  протонов) при работе в пучке широкого спектра нейтрино. Основным источником фона являются "равновесные" мюоны (от взаимодействия нейтрино в  $\mu$  - фильтре). В связи с тем, что количество фоновых мюонов превышает  $0,5 \text{ I}/\text{м}^2$  для работы в пучке широкого спектра предложен и настраивается режим резонансного вывода. Временная диаграмма сброса пучка на мишень нейтринного канала в этом случае представляет собой пять импульсов длительностью 5 мксек с временным расстоянием между импульсами 10 мксек.

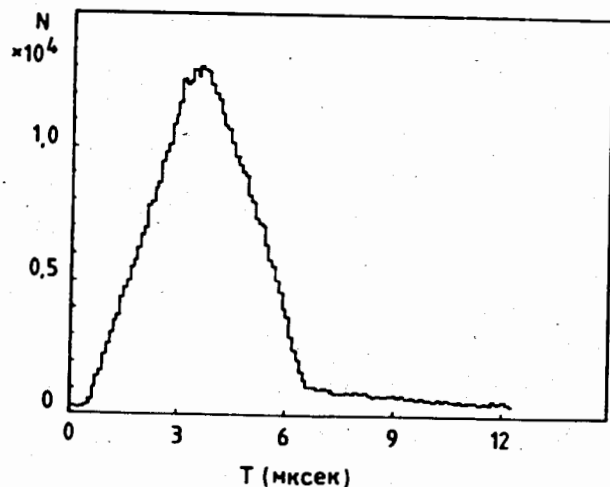


Рис. 4. Временное распределение сигналов с проволок дрейфовых камер мюонного спектрометра и мишенной части ОИЯИ при работе в нейтринном пучке.

Создание большой и дорогостоящей установки "Нейтринный детектор" потребовало тщательной проработки и изучения физической программы исследований, в результате чего были сформулированы требования к координатному детектору.

Требования, предъявляемые к трековым детекторам достаточно высоки. Они должны иметь площадь до  $16 \text{ м}^2$  на одну плоскость при пространственном разрешении не хуже 1 мм. Число плоскостей около 80, толщина по пучку не более 150 мм.

Детекторы должны иметь бесфильмовый съем информации. Реконструкция событий, изучаемых в детекторе, должна осуществляться без привлечения человека к анализу данных на этой стадии обработки.

Выбору конкретного координатного детектора предшествовала большая работа по созданию и исследованию характеристик различных типов многопроволочных камер. Данные исследования представлены во второй главе.

Наиболее полно требованиям, предъявляемым к координатным детекторам нейтринного калориметра, удовлетворяют следующие приборы:

- пропорциональные камеры;
- пропорциональные камеры с катодным считыванием информации;
- дрейфовые камеры.

Прототипом камер детектора могут служить пропорциональные камеры изготовленные в ОНМО ОИЯИ для эксперимента НА-4. Свыше 80 камер размером  $(3 \times 1,5) \text{ м}^2$  было изготовлено и проверено в составе этого эксперимента. Основными несущими элементами камеры являются сотовые панели с малым количеством вещества по пучку ( $\sim 0,3 \text{ г}/\text{см}^2$ ).

Используя шаг сигнального электрода 2 мм сохраняется возможность группировки сигнальных проволок по 1, 2, 3 на один канал регистрации сигнала, при этом реализуемая пространственная точность отдельной камеры — стандартное отклонение прямоугольного распределения — соответственно составляет 0,7; 1,3; 2,0 мм. Мертвое время пропорциональной камеры 100 нсек, она обеспечивает эффективную регистрацию  $\geq 99,6 \%$  при ширине плато по эффективности регистрации треков  $\sim (600 \div 1000 \text{ В})$ .

Пропорциональные камеры с катодным считыванием информации о координате частицы, обладая всеми достоинствами обычных пропорциональных камер, позволяют улучшить точность регистрации треков. Для изучения характеристик были изготовлены три одинаковые камеры размером  $(220 \times 220) \text{ мм}^2$ , которые собирались в один блок и объединялись в один газовый объем. Аноды камер изготавливались из позолоченной вольфрамовой проволоки диаметром 20 мкм с шагом намотки  $2 \text{ мм} \pm 30 \text{ мкм}$ . Плоскости катодных электродов изготавливались также из позолоченной вольфрамовой проволоки диаметром 50 мкм с шагом намотки  $1 \text{ мм} \pm 15 \text{ мкм}$ .

Распределение индуцированного заряда регистрировалось с одного катода в каждой камере, второй катод заземлялся и служил экраном. Сигналы регистрировались с 14-ти катодных полосок шириной 2 мм в каждой камере, остальные катодные полоски заземлялись. Сигнал с каждой катодной полоски поступал на вход зарядо-чувствительного усилителя. Выход соединялся с амплитудно-цифровым преобразователем. Зарядочувствительный усилитель имел характеристики: чувствительность  $\sim 0,5 \text{ В}/\text{пК}$ , шумы  $\sim 3 \cdot 10^{-15} \text{ К}$ , длительность переднего фронта импульса 40 нсек, входная динамическая емкость  $C \sim 120 \text{ пФ}$ . Для

наполнения камер использовалась смесь газов: аргон - 67%, изобутан - 30%; метилал - 3%; фреон - 0,2%. Для выработки триггера использовались три сцинтилляционных счетчика, выключенных на совпадение с пороговым черенковским счетчиком, исключавшим частицы с импульсом менее 1,5 ГэВ/с.

Точность регистрации треков оценивалась по распределению величины  $\Delta = (x_1 - x_2) - (x_2 - x_3)$ , где  $x_1, x_2, x_3$  - координаты треков в камерах. Если камеры равноточны  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_i$  ( $\sigma_i$  - среднеквадратичная ошибка), то ошибка в координате для одной камеры определяется из выражения  $\sigma_i = \sigma_\Delta / \sqrt{6}$ .

Распределение величины  $\Delta$  строилось для координат  $x$ , вычисленных двумя методами. Первый из них, метод средневзвешенного, при котором координата частицы вычисляется из выражения:

$$x = \frac{\sum n_i (Q_i - q)}{\sum (Q_i - q)}$$

где  $Q_i$  - индуцированный заряд на  $i$ -ой катодной полоске,  $q$  - смещение распределения зарядов из-за наличия емкостной связи между анодом и катодом камер. Среднеквадратичная ошибка распределения в этом случае равна 160 мкм, что соответствует точности определения координаты в одной камере:  $\sigma_i = \sigma_\Delta / \sqrt{6} = 65$  мкм. Точность определения координат треков может быть улучшена, если для описания распределения индуцированного заряда использовать соотношение:

$$y = \frac{A}{ch^2[\pi/S(x-x_0)]}$$

где  $A$  - величина, пропорциональная суммарному заряду, индуцированному на катод;  $S$  - свободный параметр, характеризующий ширину распределения заряда на катодах. На рис. 5 приведено распределение величины  $\Delta$ , полученное с помощью этого выражения. Среднеквадратичное отклонение распределения  $\sigma_\Delta = 120$  мкм, точность определения координаты в одной камере  $\sigma_i = 50$  мкм.

Для исследования зависимости точности регистрации координаты

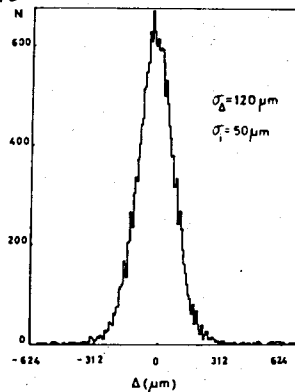


Рис. 5. Распределение величины  $\Delta$  для координат, вычисленных по методу наименьших квадратов.

трека от ширины катодных полосок была изготовлена пропорциональная камера, конструкция которой аналогична камерам установки НА-4. Отличие заключается в том, что катоды выполнены в виде полосок из проводящей краски, расстояние между центрами полосок - 18 мм. Центры полосок двух катодов сдвинуты относительно друг друга на 9 мм. Направление полосок перпендикулярно направлению анодных проволок.

Оценки точности производились по распределению величины  $\Delta = C_1 - C_2$ , где  $C_1$  и  $C_2$  - координаты лавины, вычисленные из распределения индуцированного заряда на разных катодах камеры. Принимая точность регистрации по катодам одинаковой, можно определить точность регистрации лавины одним катодом как  $\sigma = \sigma_\Delta / \sqrt{2}$ , где  $\sigma_\Delta$  - среднеквадратичное отклонение распределения величины  $\Delta$ .

Вычисление координаты лавины производилось двумя способами: по средневзвешенному распределению индуцированного на катоду заряда и методом фитирования распределения приближенной функцией. При вычислении координаты вторым способом фитирование экспериментальных данных производилось распределением Коши, проинтегрированным по катодной полоске. Распределение Коши бралось в виде:

$$f(x) = \frac{B}{[(x-x_0)/S]^2 + 1} + q$$

где  $x_0$  - координата центра,  $S$  - полуширина на полувисоте,  $B$  - значение функции в максимуме,  $q$  - постоянное смещение. Если  $x_i$  - координата центра  $i$ -ой полоски и  $W$  - расстояние между центрами полосок, то проинтегрированным распределением Коши является функция:

$$F_i = \int_{x_i - W/2}^{x_i + W/2} f(x) dx$$

На рис. 6 приведены зависимости точности определения координаты лавины (кривая 1) и зависимости параметра  $S$  распределения заряда на катоду (кривая 2) от ширины полосок (ширина полосок дается в единицах  $W/L$ , где  $L = 7$  мм - расстояние между анодом и катодом). Точность оценивалась по координатам лавины, определенным фитированием данных распределением Коши. Выбор распределения Коши был обусловлен тем, что значения точности при использовании других распределений оказались существенно хуже. При ширине полосок 18 и 36 мм точность регистрации примерно совпадает с точностью определения координат в обычных пропорциональных камерах с шагом считывания 2 и 4 мм соответственно.

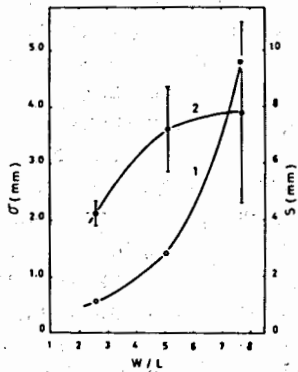


Рис. 6. Зависимость точности регистрации лавины (кривая 1) и значения параметра (кривая 2) от ширины полосок.

нием до уровня стандартного сигнала. Сформированные сигналы передавались в блок время-цифровых преобразователей с дальнейшим вводом информации в ЭВМ. Применение зарядо-чувствительных усилителей позволяло работать с порогом регистрации  $Q_{пор} = 4 \cdot 10^{-14}$  К ( $\sim 0,5$  мкА).

Точность регистрации координат проходящей частицы в камере оценивалась по распределению величины  $\Delta = (x_1 - x_2) - (x_2 - x_3)$ , где  $x_1, x_2, x_3$  - координаты трека, определяемые по сигналам с трех сигнальных проволок, при этом калибровочные характеристики ( $X = f(t \text{ дрейфа})$ ) для разных проволок принимались одинаковыми. Точность регистрации  $\sigma_i$  одной сигнальной проволоки вычислялась следующим образом:

$$\sigma_i = \frac{FWHM}{2.36\sqrt{S}},$$

где  $FWHM$  - полная ширина на полувысоте гистограммы распределения величины  $\Delta$ . Для смеси  $Ar + 5\% CO_2$  средняя точность по дрейфовой длине для одной проволоки составляет 0,6 мм (см. рис. 7).

В таблице I приведено сравнение различных типов камер, обеспечивающих точность регистрации не хуже 1 мм, конструкция которых позволяет создавать камеры больших площадей. Количество каналов определялось проектными требованиями к камерам (размеры, координатное разрешение, количество плоскостей).

Дрейфовая камера размером (3000 x 1500) мм<sup>2</sup> с распределенным дрейфовым потенциалом была изготовлена для исследования точности регистрации координаты пролетающей частицы. Поперечное сечение одной дрейфовой ячейки камеры приведено на рис. 3 ( $L = 95$  мм). Камера состояла из 6-ти одинаковых ячеек. Исследования проводились на стенде с радиоактивным источником  $^{106}Ru$  для следующих газовых смесей: 1 -  $Ar + 30\% C_4H_{10}$ ; 2 -  $Ar + 5\% CO_2$ ; 3 -  $Ar + 5\% CO_2 + 5\% CH_4$ ; 4 -  $Ar + 7\% CO_2 + 0,25\% C_2H_5OH$ . Скорость обмена смеси в камере составляла 20 л/час. Для усиления сигналов с проволок камеры использовались зарядо-чувствительные усилители с последующим формирова-

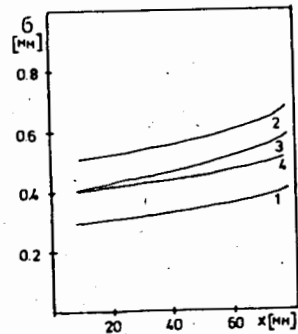


Рис. 7. Зависимость точности регистрации треков для газовых смесей 1, 2, 3, 4.

Таблица I

Тип детектора	Кол-во каналов (шт.)	Ширина плато по эффективности, (В)
Пропорциональная камера с анодным считыванием информации	80000	600
Пропорциональная камера с катодным считыванием информации	8000	200
Дрейфовая камера ( $Ar + 5\% CO_2$ )	4000	100

Исследования показали, что при использовании в установке обычных пропорциональных камер требуется огромное количество каналов регистрации информации, что приведет к высокой стоимости установки. Использование пропорциональных камер с катодным считыванием информации позволяет понизить количество каналов в 10 раз, однако, при этом необходимо проводить амплитудный анализ в каждом канале. Наиболее приемлемым является применение дрейфовых камер с большим дрейфовым промежутком, что позволяет иметь минимальное количество каналов регистрации информации (см. таблицу I), реализовать переопределение по количеству точек на треке, проводить измерение угловых характеристик трека в одной камере.

В третьей главе изложены особенности конструкции серийной дрейфовой камеры, система газообеспечения и электронная аппаратура регистрации информации с дрейфовых камер.

В основу конструкции серийной камеры были положены конструктивные решения и исследования характеристик дрейфовых камер размером  $(3 \times 1,5) \text{ м}^2$  и  $(4 \times 2) \text{ м}^2$ . Серийная камера состоит из восьми однотипных дрейфовых ячеек с длиной проволочных электродов 4 м и дрейфовыми промежутками 120 мм. Поперечное сечение камеры показано на рис. 8. Конструктивно камера состоит из трех основных элементов: двух панелей (рис. 8, поз. 9) и рамы, образованной двумя боковыми планками (рис. 8, поз. 6,7) длиной 4 метра и двухметровыми балками, сигнальной и высоковольтной, изготовленными из стеклотекстолита. Нижняя панель и рама образуют корпус, верхняя панель является крышкой камеры. Герметизация элементов рамы, а также рамы и панели корпуса производится герметиком. Уплотнение корпуса и крышки выполнено специальным шнуром из пористой резины с достаточно гладкой поверхностью, который вклеен в паз рамы. Для улучшения поверхности паза корпуса и противолежащей ему поверхности крышки использовалась технология нанесения тонкого слоя эпоксидного компаунда, имеющего по уплотняющей поверхности контакт с лавсановой пленкой. После полимеризации лавсановая пленка снимается и качество полученной поверхности определяется чистотой поверхности лавсановой пленки. Панели (отечественного производства) выполнены из специального сотового материала с малым количеством вещества по пучку. Для улучшения герметичности камеры панели с внутренней стороны покрывались фторлоноэпоксидным лаком.

Полевые проволоки для формирования однородного электрического поля камеры распаяны на печатных платах с шагом - 5 мм (в районе сигнального элемента - 6 мм (см. рис. 3), материал - бериллиевая бронза, диаметр проволок 0,2 мм, усилие натяжения 400 г. С целью компенсации эффектов, связанных с электростатическим взаимодействием и провисанием проволок большой длины, все полевые проволоки зафиксированы фторлоноэпоксидным лаком на четырех поддерживающих планках. Структура сигнального элемента показана на рис. 8 и 3. Он содержит: четыре сигнальные проволоки (позолоченный вольфрам, диаметр проволок 50 мкм, усилие натяжения 200 г), попеременно смещенные относительно центральной оси ячейки на  $\delta = \pm 0,75 \text{ мм}$ , для устранения лево-правой неопределенности; десять катодных проволок (бериллиевая бронза); две охранные (бериллиевая бронза). Сигнальные и охранные проволоки отделены от катодных керамической изоляцией. Точность фиксации проволок сигнального элемента не хуже 0,15 мм. С целью

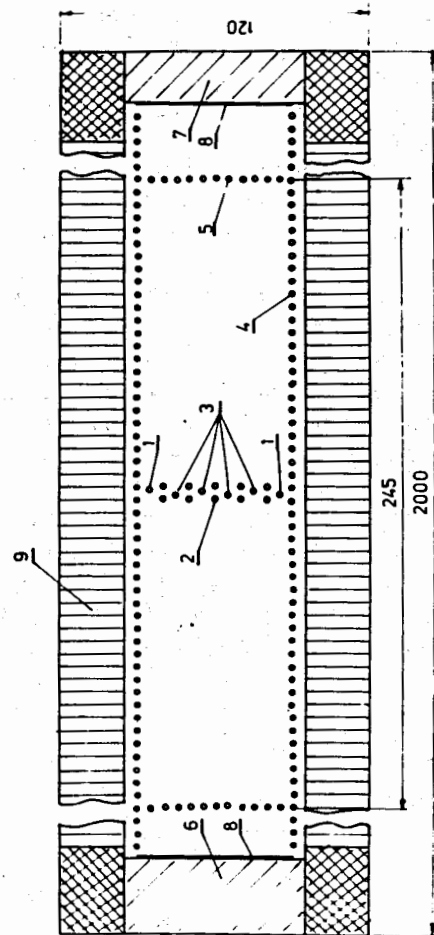


Рис. 8. Поперечное сечение серийной дрейфовой камеры:

1 - охранные проволоки; 2 - катодные проволоки; 3 - сигнальные проволоки; 4,5 - проволоки высоковольтные и распределенного потенциала (полевые); 6,7 - боковые планки; 8 - высоковольтные электроды; 9 - сотовые панели.



компенсации электростатического взаимодействия и провисания проволок сигнальных и высоковольтных элементов, а также для устранения влияния изгиба панелей в конструкции камер введены две поддержки рамочного типа. Для обеспечения заданного и одинакового зазора между панелями в центре камеры по длине 4 м с равными промежутками устанавливались 5 фиксирующих упоров.

Для обеспечения условий пожаробезопасности сигнальные и высоковольтные балки с внешней стороны камеры закрываются герметичными металлическими экранами, которые имеют газовые вводы для поддува азотом.

При изготовлении проволочных камер больших площадей возникает ряд трудностей, связанных с нарушением механической устойчивости проволочных электродов, вызываемых электростатическими силами и действием силы тяжести. Пространственное разрешение отдельной сигнальной проволоки дрейфовой камеры связано с изменением ее первоначального положения после подачи потенциала на электроды и провисанием за счет собственного веса. Кроме того, вследствие смещения проволок, изменяется геометрия элементарного пропорционального счетчика, что приводит к изменению коэффициента газового усиления по длине проволоки и смещению начала плато по эффективности регистрации треков. Измерения для вольфрамовой проволоки ( $\phi$  50 мкм, длиной - 1,3 м, усилие натяжения -  $T = 200$  г) показали, что максимальное провисание под действием силы тяжести менее 50 мкм, а для проволоки из бериллиевой бронзы ( $\phi$  50 мкм,  $l = 1,3$  м,  $T = 475$  г) - менее 70 мкм. Эти значения меньше механической точности фиксации проволок сигнального элемента.

В результате проведения испытаний отдельных элементов и исследования характеристик прототипов создана серийная дрейфовая камера со следующими параметрами:

- размер чувствительной области -  $(4000 \times 2000)$  мм<sup>2</sup>;
- количество сигнальных проволок - 32 шт;
- диаметр сигнальных проволок - 50 мкм;
- усилие натяжения сигнальных проволок - 200 г;
- количество катодных проволок - 80 шт;
- диаметр катодных проволок - 200 мкм;
- усилие натяжения катодных проволок - 475 г;
- количество охранных проволок - 16 шт;
- диаметр охранных проволок - 200 мкм;
- усилие натяжения охранных проволок - 475 г;
- количество полевых проволок - 859 г;
- диаметр полевых проволок - 200 мкм;
- усилие натяжения полевых проволок - 400 г;

- точность фиксации проволок сигнальных элементов - 0,15 мм;
- ошибка в привязке проволочных массивов к точным отверстиям камеры - 0,4 мм;
- толщина камеры по пучку - 120 мм.

В четвертой главе анализируется выбор газовой смеси для установки и изложены методические исследования характеристик серийных дрейфовых камер.

Газовая смесь, применяемая для наполнения дрейфовых камер, должна удовлетворять многим, подчас противоречивым, требованиям. Газовая смесь должна обеспечивать минимальный захват электронов, большое газовое усиление при относительно небольшом напряжении, пропорциональность сигнала измеряемой ионизации и т.д. Основой практически всех газовых смесей для детекторов является  $Ar$ . Для гашения разряда в камеру необходимо добавлять молекулярный газ. Использование чистых молекулярных газов затруднено из-за необходимости применения высокого напряжения, требуемое для обеспечения нужного газового усиления. Поэтому в пропорциональных газовых детекторах чаще всего применяют бинарные или тройные смеси с  $Ar$  в качестве основного газа и добавкой молекулярных газов. На газовую смесь для дрейфовых камер с большим дрейфовым промежутком накладываются дополнительные требования. Эта смесь должна обеспечивать постоянную в большом интервале напряжений скорость дрейфа электронов и минимальное значение коэффициента диффузии.

Специфика установки "Нейтронный детектор" приводит еще к одному требованию. В установке имеется 360 сцинтилляционных счетчиков, наполненных жидким сцинтиллятором на основе уайт-спирита. Появляется дополнительное условие - смесь, используемая для наполнения дрейфовых камер, должна быть пожаровзрывобезопасной.

В нашем случае целесообразно использовать смесь  $Ar + CO_2$ . Требования к точности измерения скорости дрейфа электронов в камере определяется отношением требуемой величины пространственного разрешения к длине дрейфового промежутка. Так при разрешении 1 мм и длине дрейфового промежутка 120 мм скорость дрейфа необходимо определять с точностью 0,8 %.

При использовании камер с большими дрейфовыми промежутками высоковольтные характеристики материалов, применяемых для изготовления камер, накладывают ограничения на значение напряженности поля в дрейфовом промежутке. Было показано, что для смеси  $Ar + CO_2$  (94 % + 6 %) максимальное изменение скорости дрейфа при изменении напряженности поля от 0,5 до 3,0 кВ/см составляет 18 %. В камере с дрейфовым промежутком 120 мм изменение напряженности от 0,5 до 3,5 кВ/см

происходит на длине  $\sim 7,5$  мм, что составляет  $\sim 6\%$  от величины дрейфового промежутка. В данном случае можно отказаться от требования насыщения дрейфовой скорости и работать в области ее максимума. Выигрыш при этом состоит в уменьшении напряженности электрического поля. Так для смеси  $Ar + 6\% CO_2$  максимум дрейфовой скорости достигается при напряженности  $\sim 0,5$  кВ/см.

Скорость дрейфа становится функцией двух параметров: концентрации  $CO_2$  и напряженности электрического поля ( $E$ ). При выборе рабочей точки необходимо оптимизировать скорость дрейфа по обоим параметрам с целью получения минимальной чувствительности к их изменениям. Было показано, что для стабилизации дрейфовой скорости с точностью  $\pm 0,4\%$  необходимо фиксировать  $E$  в диапазоне  $0,45 - 0,59$  кВ/см. При  $E = 0,48$  кВ/см для стабилизации дрейфовой скорости с точностью  $\pm 0,4\%$  необходимо фиксировать концентрацию  $CO_2$  в диапазоне  $5,7 - 7\%$ . Высоковольтные источники (точность установки  $U_{внх} = \pm 0,1\%$ ) и делители с разбросом значений сопротивлений не более  $2\%$  достаточно надежно обеспечивают работу в указанном диапазоне значений  $E$ . Автоматизированная система газообеспечения позволяет получить стабильное содержание добавки  $CO_2$  на уровне  $(6 \pm 0,2)\%$ .

Помимо отмеченных параметров на скорость дрейфа влияет наличие "неконтролируемых" примесей в газе, которые появляются из-за недостаточной герметичности корпуса камеры, системы газообеспечения и газоразделения из стенок. Измерения на выходе одной из камер мюонного спектрометра, натекание которой было  $4,6$  л/час, в рабочих условиях (давление на выходе камеры  $- 5 \div 8$  мм масляного столба, проток газовой смеси  $- 40$  л/час), показали содержание кислорода  $- 0,05\%$ , азота  $- 0,07\%$ . Показано, что в смеси  $Ar + 6\% CO_2$  при наличии  $0,1\% O_2$  время жизни электронов до прилипания составляет  $10$  мкс. При максимальном времени дрейфа ( $3,6$  мксек) первичных электронов в камере данное содержание кислорода допустимо. Измерения  $\Delta V/V$  при  $E = 0,5$  кВ/см, показали, что добавка  $0,5\% N_2$  в смесь  $Ar + 6\% CO_2$  приводит к изменению скорости дрейфа на  $2\%$ . Для обеспечения стабильности скорости дрейфа на уровне  $\pm 0,4\%$  необходимо, чтобы примесь  $N_2$  не превышала  $0,2\%$ , что обеспечивается для камеры с натеканием  $4,6$  л/час при скорости протока газовой смеси  $40$  л/час. Результаты измерений содержания кислорода и азота на выходе камер, анализ влияния их на дрейфовую скорость, а также исследование характеристик макета и опытной серии дрейфовых камер позволили определить верхний предел по натеканию камер равный  $2$  л/час.

Опыт работы с макетом и опытной серией дрейфовых камер с использованием двухкомпонентной смеси  $Ar + 7\% CO_2$  показал, что в камерах, находящихся в рабочем режиме, с течением времени (несколько десятков

минут) наблюдается резкое повышение частоты шумов, приводящее к появлению тока ( $0,1 - 2,0$ ) мкА в цепи охранных и сигнальных проволок, прекращающегося только при временном снятии высокого напряжения. Поэтому были проведены исследования по поиску гасящих добавок к двухкомпонентной смеси  $Ar + 7\% CO_2$ , не превышающих нормы взрыво- и пожаробезопасности и позволяющих иметь более устойчивые режимы работы камер. Исследования показали, что добавки метана до  $5\%$  и спирта к двухкомпонентной смеси  $Ar + 7\% CO_2$  практически не влияют на значение дрейфового поля, при котором скорость дрейфа электронов имеет максимальное значение и оно остается таким же, как и для двухкомпонентной смеси  $Ar + 7\% CO_2$ , но в то же время зависимости средних значений заряда от напряжения на сигнальной проволоке  $Q_{cp} = f(U_s)$  сдвигаются в сторону увеличения  $U_s$ , следовательно, смесь становится более высоковольтной (область пропорционального газового усиления на сигнальных проволоках находится при более высоких напряжениях  $U_s$  для трех ( $Ar + 7\% CO_2 + 5\% CH_4$ ) - и четырех ( $Ar + 7\% CO_2 + 5\% CH_4 + 0,5\% C_2H_5OH$ ) - компонентных смесей). Исследования характеристик серийных дрейфовых камер показали, что при использовании четырехкомпонентной смеси частота шумов для рабочих режимов камер не превышает  $10$  кГц, при этом ширина плато по эффективности регистрации треков составляет  $100 + 250В$ .

Как отмечалось выше, при эксплуатации камер с использованием двухкомпонентной газовой смеси  $Ar + 6\% CO_2$  с течением времени в некоторых камерах появляется ток в цепи сигнальных проволок. Так как изменение газовой смеси  $Ar + 6\% CO_2$  на смесь с гасящими добавками на установке "Нейтринный детектор" не предполагается, необходимо было найти такой режим работы, который обеспечивает надежную эксплуатацию камер с двухкомпонентной газовой смесью. Решение данной проблемы было найдено и сущность его заключается в следующем: на электроды распределенного потенциала подается импульсное напряжение отрицательного знака, на сигнальные проволоки - импульсное напряжение положительного знака, наложенные на постоянные напряжения, причем импульсное напряжение подается на электроды только на время сброса пучка ускорителя на мишень. При использовании такого режима питания повышается надежность работы дрейфовых камер, поскольку снижается вероятность образования коронных разрядов на микроостриях. В случае, если такой разряд возник в каком-либо месте камеры (например, вблизи микроострия прошла частица), он гасится в момент времени, соответствующий окончанию импульсных напряжений на электродах. За время между циклами работы ускорителя объемный заряд рассасывается под действием постоянных потенциалов. Амплитуда импульсных напряжений (на установ-

ке  $\sim 1$  кВ) в сумме с постоянными напряжениями выбирается из условий получения рабочего коэффициента газового усиления. Период следования импульсного напряжения определяется временной диаграммой работы ускорителя.

На рис. 9 приводятся сравнительные характеристики двух камер (1 и 2) при постоянном и импульсном режимах работы. Из рис. 9 видно существенное отличие в зависимости частоты шумов (правая шкала) от напряжения на сигнальных проволоках (пунктирные кривые 1 и 2 — постоянное напряжение на электродах камеры, сплошные 1 и 2 — импульсное напряжение). Вследствие периодического включения и выключения рабочего режима камер область частоты шумов порядка 10 кГц существенно сдвигается в сторону увеличения напряжения и, как следствие данного эффекта, импульсный режим дает заметный выигрыш в ширине плато по эффективности регистрации треков частиц от напряжения на сигнальных проволоках. Для камер, характеристики которых приведены на рис. 9, ширина плато увеличивается примерно на 100 В. Применение импульсного режима значительно повышает надежность работы камер во время сеансов по набору статистики.

Каждый сигнальный элемент отдельной дрейфовой ячейки содержит 4 сигнальные проволоки. Для надежной реконструкции трека достаточно 3 точки на прямой, при использовании 4-х сигнальных проволок мы имеем переопределение, и эффективность регистрации ячейки можно оценить по следующей формуле:  $\varepsilon = \varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_3 \varepsilon_4 + \varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_3 (1 - \varepsilon_4) + \varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_4 (1 - \varepsilon_3) + \varepsilon_1 \varepsilon_3 \varepsilon_4 (1 - \varepsilon_2) + \varepsilon_2 \varepsilon_3 \varepsilon_4 (1 - \varepsilon_1)$ , где  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$  — эффективности регистрации координат трека отдельными проволоками дрейфовой ячейки ( $\varepsilon_1$  — эффективность 1-ой проволоки, при мониторингировании остальными тремя сигнальными проволоками). На рис. 10 (семейство кривых 1, левая шкала) приведена зависимость эффективности регистрации треков камерами мюонного спектрометра от напряжения на сигнальных проволоках. Из рис. 10 виден разброс характеристик камер. Семейство 2 (правая шкала) — зависимость частоты шумовых импульсов камер мюонного спектрометра от напряжения на сигнальных проволоках. Точками показаны значения частоты шумов для пяти камер, превышающих огибающую. Суммарная ширина плато по эффективности регистрации треков для камер мюонного спектрометра составляет  $\Delta U \approx 100$  В при пороге регистрации сигналов равном 1 мкА.

Важным условием эффективной работы и получения результатов в определении координат дрейфовой камерой является однородность дрейфового поля. Неоднородности в распределении полей в дрейфовых ячейках можно оценить по гистограмме распределения величины  $K_2$ , равной:

$$K_2 = (T_1 - T_2) - (T_3 - T_4) = (T_1 + T_4) - (T_2 + T_3).$$

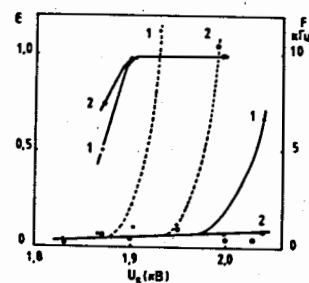


Рис. 9. Характеристики двух камер (1 и 2) при постоянном и импульсном питании: 1, 2 (левая шкала) — эффективность регистрации треков в зависимости от напряжения на сигнальных проволоках; 1, 2 (пунктир, правая шкала) — частота шумов при постоянном напряжении; 1, 2 (сплошные линии) — частота шумов при импульсном напряжении.

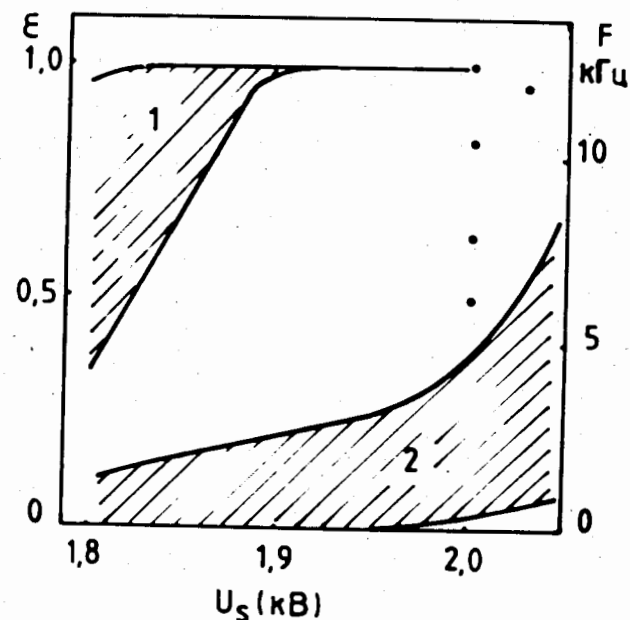


Рис. 10. Зависимость эффективности регистрации треков (1) и частота шумов (2) в камерах мюонного спектрометра.

На рис. II показана гистограмма распределения величины  $K_2$ . Среднее значение  $K_2$  составляет 16,9 нсек. Неравенство среднего значения  $K_2$  нулю указывает на различие в скоростях дрейфа по парам проволок  $S_{1,4}$  и  $S_{2,3}$ . Эта разница хорошо видна на рис. 12, где показано изменение среднего значения  $K_2$  от координаты трека по дрейфовому промежутку. Различие по сумме  $(T_1 + T_4)$  и  $(T_2 + T_3)$  в конце дрейфового промежутка составляет 40 нсек, что приводит к ошибке в определении координаты равной 0,8 мм (при скорости дрейфа электронов для газовой смеси  $Ar + 6\%CO_2$  равной 40 мм/мксек).

Координатное разрешение отдельных сигнальных проволок, измеренное по распределению величины второй разности, приведено на рис. 7 для прототипа серийной камеры и в среднем по дрейфовому промежутку равно  $\delta_i \approx 0,6$  мм. По распределению величины  $K_2$  можно оценить среднюю точность регистрации координаты проходящих частиц для камер мюонного спектрометра, которая не хуже 1 мм для смеси  $Ar + 6\%CO_2$  и скорости дрейфа электронов 40 мм/мксек.

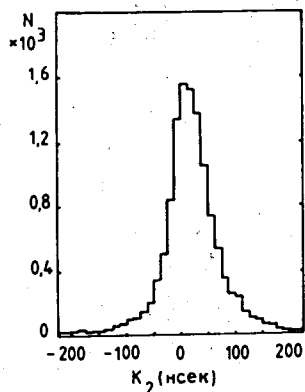


Рис. II. Распределение величины  $K_2$ .

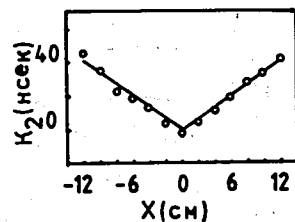


Рис. 12. Зависимость среднего значения коэффициента  $K_2$  от координаты трека в дрейфовом промежутке.

Для разрешения лево-правой неоднозначности проволоки каждого сигнального элемента попеременно смещены относительно центра дрейфовых ячеек камер на величину  $\delta = \pm 0,75$  мм. При этом эффективность разделения левых и правых треков можно оценить по распределению величины  $K_1$  равной:

$$K_1 = 1/2(T_1 - 3T_2 + 3T_3 - T_4) = \pm 4\Delta T$$

где  $\Delta T$  - временной сдвиг сигналов, определяемый координатным сдвигом ( $\delta$ ) сигнальных проволок относительно центра симметрии дрейфовой ячейки. На рис. 13 показано распределение величины  $K_1$  для сигнальных проволок дрейфовых камер мюонного спектрометра, усредненное по дрейфовому промежутку. На рис. 14 показано изменение среднего значения коэффициента  $K_1$  в зависимости от координаты трека в дрейфовой камере. Из распределения  $K_1$  для  $+2\Delta T$  и  $-2\Delta T$  можно оценить вероятность ошибки в определении левых и правых треков, которая составляет  $\sim 2\%$ .

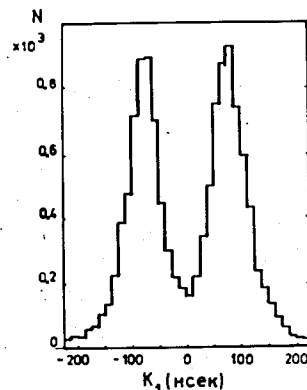


Рис. 13. Распределение величины  $K_1$ .

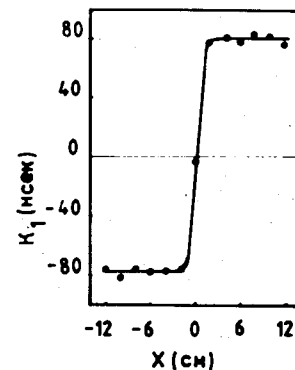


Рис. 14. Зависимость среднего значения  $K_1$  от координаты трека в дрейфовом промежутке.

Координатное и угловое разрешение мюонного спектрометра было получено следующим образом: через восстановленные в камерах "стринги" (отрезок трека, проведенный в отдельной камере) по методу наименьших квадратов, проводился трек, определялся его угол и координата в отдельной камере. Гистограммировались отклонения "стрингов" в камере от фитированного трека. Верхние оценки координатного разрешения мюонного спектрометра (так как трудно учесть вклад кулоновского рассеяния и остаточной намагниченности) дают результат равный  $\delta \approx 5,9$  мм. Аналогичное распределение для углов дает верхнюю оценку углового разрешения  $\delta \approx 63$  мрад.

Проведенные исследования характеристик и выбор режимов работы больших дрейфовых камер, а также применение импульсного режима рабо-

ты системы высоковольтного питания электродов позволили обеспечить надежную работу камер мюонного спектрометра в сеансах по набору статистики в течении 5 лет.

В заключении приводятся основные результаты диссертационной работы:

1. Проведены исследования различных типов газовых проволочных детекторов (пропорциональные камеры с катодным считыванием информации, прототип дрейфовой камеры) и обоснован выбор дрейфовой камеры для установки "Нейтринный детектор".

2. Изучена электростатика и зарядовые характеристики прототипов дрейфовых камер. Полученные результаты положены в основу конструкции серийных дрейфовых камер.

3. Разработаны и созданы дрейфовые камеры площадью  $8 \text{ м}^2$  для установки "Нейтринный детектор". Общее количество изготовленных камер равно 120.

4. Исследованы характеристики камер с различными газовыми смесями. Показано, что камеры работают более надежно и эффективно со смесями  $\text{Ar} + 7\% \text{CO}_2 + 5\% \text{CH}_4$ ,  $\text{Ar} + 7\% \text{CO}_2 + 5\% \text{CH}_4 + 0,25\% \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ , чем с выбранной для наполнения камер в установке двухкомпонентной смесью  $\text{Ar} + 6\% \text{CO}_2$ .

5. Предложен и реализован на установке "Нейтринный детектор" новый способ питания электродов больших дрейфовых камер. Импульсный режим высоковольтного питания обеспечивает стабильную и надежную работу камер.

6. Разработана методика и проведены исследования характеристик серийных дрейфовых камер мюонного спектрометра с использованием радиоактивного источника и в нейтринном пучке ИФВЭ:

а) исследована зависимость ширины плато по эффективности регистрации треков в камерах мюонного спектрометра, которая при пороге регистрации 1 мкА составляет  $\sim 100 \text{ В}$ ;

б) измерена точность регистрации треков частиц в камерах для различных газовых смесей на стенде с радиоактивным источником и в нейтринном пучке. Показано, что точность регистрации треков мюонов не хуже 1 мм;

в) исследовано разрешение лево-правой неоднозначности в дрейфовых ячейках камер. Неэффективность разрешения левых и правых треков в одной камере составляет  $\sim 2\%$ ;

г) оценены неоднородности электрических полей в дрейфовом промежутке. Показано, что различие в калибровочных характеристиках

отдельных проволок незначительно и приводит к ошибке в измерении координаты  $\sim 0,8 \text{ мм}$ .

7. Созданные большие дрейфовые камеры установлены и работают в установке "Нейтринный детектор" около 5 лет.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Барабаш Л.С.,..., Чалышев В.В. и др., ПИЗ-СИ-554, Дубна, 1981.
2. Материалы III Рабочего совещания по нейтринному детектору ИФВЭ-ОИЯИ, Дубна, 1982, стр. 39.
3. Барабаш Л.С.,..., Чалышев В.В. и др., Р9-С2-724, Дубна, 1982.
4. Материалы У Рабочего совещания по нейтринному детектору ИФВЭ-ОИЯИ, Дубна, 1984, стр. 108.
5. Материалы У Рабочего совещания по нейтринному детектору ИФВЭ-ОИЯИ, Дубна, 1984, стр. 112.
6. Barabash L.S.,..., Chalishchev V.V. et al., 1985, v. A236, No.2, p.271.
7. Барабаш Л.С., Чалышев В.В. Авторское свидетельство № ИИ81405, 1985, ОИ № 29, 1987, стр. 263.
8. Барабаш Л.С.,..., Чалышев В.В. и др., ОИЯИ, PI-88-516, Дубна, 1988.

Рукопись поступила в издательский отдел  
26 сентября 1989 года.