

Государственный научный центр  
Российской Федерации  
Институт ядерной физики  
им. Г.И. Будкера СО РАН

В.Е. Блинов, В.Р. Грошев

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОВОЛОЧНОЙ  
СТРУКТУРЫ И ВЫБОР НАТЯЖЕНИЯ  
ПРОВОЛОЧЕК В ДРЕЙФОВОЙ КАМЕРЕ  
ДЕТЕКТОРА КЕДР

ИЯФ 97-16

Новосибирск  
1997

**Оптимизация проволочной структуры  
и выбор натяжения проволочек  
в дрейфовой камере детектора КЕДР**

*В.Е. Блинов, В.Р. Грошев*

Государственный научный центр Российской Федерации  
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН

**Аннотация**

В работе дано описание метода расчета электрических полей в ячейке дрейфовой камеры, а также электростатических и гравитационных смещений проволочек. Получено хорошее согласие результатов расчета с измерениями и расчетами с использованием других программ. Найдено искажение полей в ячейке дрейфовой камеры детектора КЕДР, обусловленное влиянием соседних слоев, внешней и внутренней обечеек, деформации ячейки, неточности выставки проволочек в ячейке. На основании расчетов выбраны натяжения и диаметры проволочек. Для получения проектного пространственного разрешения 100мкм в дрейфовой камере необходимо натяжение полевых проволочек 250г, анодных – 100г.

---

# 1 Введение

В Институте ядерной физики им. Будкера СО РАН в настоящее время завершается создание детектора КЕДР [1] на накопителе ВЭПП-4М. Одной из систем детектора является дрейфовая камера (ДК) [2, 3, 4]. Дрейфовая камера (рис.1) имеет цилиндрическую форму и занимает пространство, ограниченное двумя цилиндрическими обечайками длиной 1100 мм и двумя торцевыми пластинами. В торцевых пластинах просверлены отверстия, в которых с помощью нержавеющей пинов крепятся проволочки. ДК содержит более 16 тысяч проволочек, в том числе 1512 сигнальных. При длине проволочек 970 мм и измерительной базе 370 мм камера дает 42 измерения ионизационных потерь и координаты частицы. Проволочки сгруппированы в семь цилиндрических суперслоев. Четыре – нечетных аксиальных суперслоя – имеют проволочки параллельные оси цилиндра, три – четные стерео суперслоя с проволочками, наклоненными под углом  $\pm 100$  мрад к оси камеры. Стереослои используются для измерения координаты вдоль оси ДК. Суперслои разбиты на дрейфовые ячейки.

Выбор типа ячейки был обусловлен требованием получения высокого импульсного разрешения при минимальном количестве каналов электроники. За основу мы выбрали ячейку (рис.2), используемую в детекторе SLD [5]. Ячейка содержит восемь анодных проволочек, шесть из которых – чувствительные. Крайние – нерабочие анодные проволочки – служат для выравнивания поля в ячейке. Анодные проволочки изготовлены из позолоченного вольфрама диаметром 28 мкм и имеют натяжение 100 г. Справа и слева от плоскости с анодными проволочками расположены два ряда фокусирующих проволочек. Значение потенциала на фокусирующих проволочках определяет коэффициент газового усиления. Распределение потенциалов на полевых проволочках создает однородное поле в дрейфовом промежутке напряженностью 2 кВ/см. Для фокусирующих, полевых и нерабочих анодных проволочек мы использовали золоченую титановую проволоку диаметром 150 мкм. Натяжение этих проволочек равно 250 г.

В качестве рабочего газа был выбран чистый диметиловый эфир (ДМЭ). На модели ячейки ДК с этим газом получено среднее по ячейке пространственное разрешение 45 мкм.

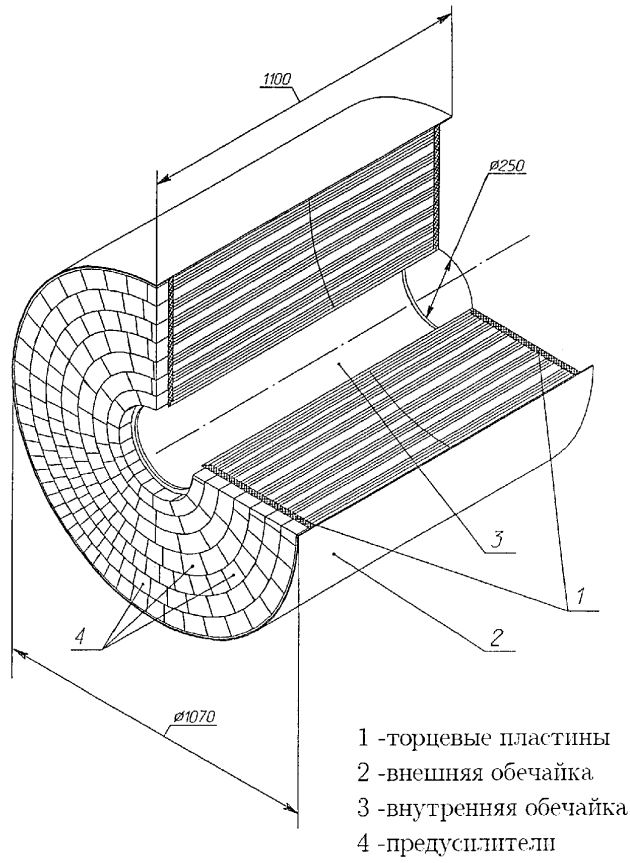


Рис. 1: Общий вид дрейфовой камеры.

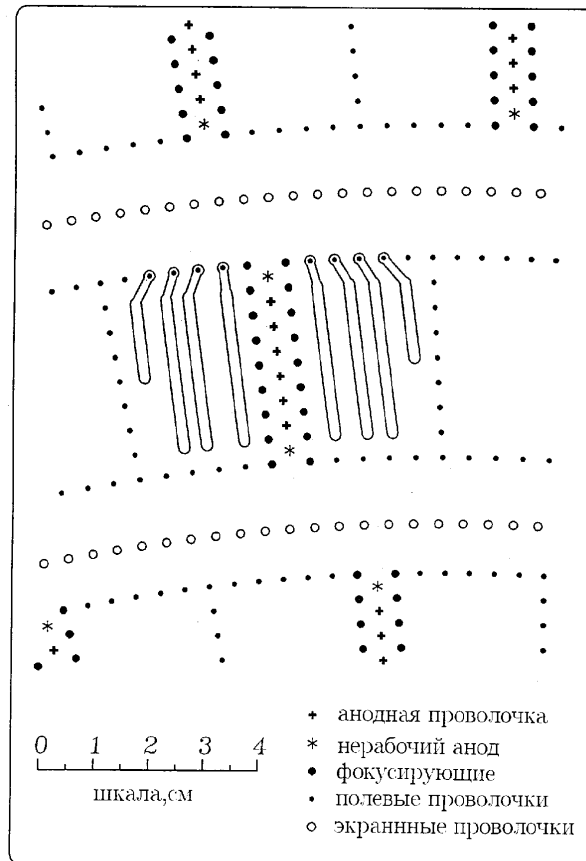


Рис. 2: Ячейка дрейфовой камеры.

## 2 Оптимизация проволочной структуры ДК

Скорость дрейфа электронов в ДМЭ линейно зависит от напряженности электрического поля и плотности газа. Это накладывает серьезные требования на стабильность рабочих условий в камере. Изменение напряженности поля или плотности газа на 0.1% приводит к ошибке измерения координаты в 10 мкм на 1 см дрейфа. Это требование необходимо учитывать при выборе расстояния между суперслоями, расстояния от стенок ДК до внешних слоев ячеек, при выборе величины стерео угла и натяжения проволочек. Поэтому серьезное внимание было уделено расчету искажений полей в ячейке и их минимизации.

### 2.1 Расчет полей в ячейке ДК

Была написана программа расчета электростатических полей в ячейке, которая позволила оптимизировать проволочную структуру ДК. Приведем краткое описание метода расчета. Заряды на проволочках определялись методом потенциальных коэффициентов [6, 7]. Потенциальные коэффициенты  $S_{ik}$  дают связь между потенциалами и зарядами на проволочках. Пусть есть  $n$  проволочек с зарядом  $Q_i$  и потенциалом  $V_i$  на  $i$ -ой проволочке. Потенциал  $i$ -ой проволочки, с одной стороны, равен напряжению, а с другой стороны, сумме потенциалов, создаваемых другими проволочками, в месте расположения этой проволочки. Получаем систему линейных уравнений

$$V_i = S_{ik} \cdot Q_k (i, k = 1, \dots, n). \quad (1)$$

Величина  $S_{ik}$  равна потенциалу, приобретенному  $i$ -ой проволочкой, если сообщить  $k$ -ой заряд  $Q_k = 1$ , а все остальные проволочки оставить незаряженными. Легко получить некоторые свойства потенциальных коэффициентов:  $S_{ik} = S_{ki}$ ,  $S_{ii} > S_{ik} > 0$ .

Потенциал от проволочки длиной  $L$  в декартовой системе координат имеет вид:

$$\varphi(x, y, z) = Q * \ln \left| \frac{(z - a + \sqrt{(z - a)^2 + x^2 + y^2})}{(z + a + \sqrt{(z + a)^2 + x^2 + y^2})} \right|, \quad (2)$$

где,  $Q$  - заряд единицы длины проволочки,  $a=L/2$ . Проволочка располагается на оси  $z$  от  $-a$  до  $+a$ .

Решая систему линейных уравнений (1), находим заряды на проволочках  $Q_k$ . Зная заряды, можно определить потенциал и напряженность электрического поля в любой точке. Программа позволяет производить расчет полей от системы цилиндрических проводников в вакууме ( $\varepsilon = 1$ ), при этом расстояние между проводниками  $h$  должно быть много больше диаметра проводника  $d$ . Так при  $h/d > 5$  ошибка в величине вычисленных зарядов меньше 1% и становится меньше 0.1% при  $h/d > 10$ .

Сплошные поверхности могут быть заданы проволочной сеткой нужной формы. Для получения необходимой точности отношение шага сетки к диаметру проволочек должно быть больше 5.

Программа позволяет вычислять потенциал, x- и y-компоненты напряженности электрического поля в плоскости перпендикулярной оси z, рисовать распределение эквипотенциалей и траектории дрейфа электронов в ячейке в магнитном поле, направленном параллельно проволочкам.

Из-за линейной зависимости скорости дрейфа( $W$ ) от напряженности поля в газе ДМЭ искажение полей приводит к изменению соотношения время дрейфа( $t$ ) – координата( $X$ ). При дрейфе в постоянном электрическом поле напряженностью  $E$  это соотношение имеет вид:

$$X = W \cdot t = k \cdot E \cdot t. \quad (3)$$

Изменение  $E$  на величину  $\Delta E$  приводит к изменению  $X$  на величину  $\delta X = k \cdot t \cdot \Delta E$ . Появление y-компоненты электрического поля  $E_y$  вызывает смещение дрейфующих электронов на величину  $\delta Y$ . В итоге имеем:

$$\delta X = X \cdot \Delta E / E, \quad (4)$$

$$\delta Y = Y \cdot E_y / E. \quad (5)$$

В случае неоднородных полей формулы(4,5) принимают вид:

$$\delta X(x_{\partial p}) = \int_0^{x_{\partial p}} (E_x - E_x^*) / E_x dx, \quad (6)$$

$$\delta Y(x_{\partial p}) = \int_0^{x_{\partial p}} (E_y - E_y^*) / E_x dx, \quad (7)$$

где,  $x_{\partial p}$  – расстояние дрейфа электронов,  $E_x$ ,  $E_y$  – x,y – компоненты напряженности электрического поля в ячейке без внешних возмущений, а  $E_x^*$ ,  $E_y^*$  – x,y – компоненты полей в ячейке с внешними возмущениями. Используя эти формулы, можно количественно определить величину ошибки в измерении координаты  $\delta X$  и дополнительное смещение дрейфующих электронов вдоль оси  $Y$  ( $\delta Y$ ). Значения величин  $\delta X$  и  $\delta Y$  вычислялись для трех крайних анодных проволочек в зависимости от расстояния дрейфа. Величина  $\delta X$  дает систематическую ошибку в определении координаты, поэтому необходимо, чтобы  $\delta X$  было меньше проектного пространственного разрешения равного 100 мкм.

Величина  $\delta Y$  характеризует изменение координаты центра участка траектории частицы, ионизация с которого определяет появление временной отметки. Большое значение  $\delta Y$  приводит к ухудшению качества фокусировки дрейфующих электронов и систематической ошибке в измерении координаты. Из результатов моделирования было получено, что  $\delta Y$  не должно превышать 1 мм, при этом вклад в ошибку измерения координаты не превышает 50 мкм. Практически во всех случаях вклад в ухудшение координатного разрешения величины  $\delta X$  много больше  $\delta Y$ , поэтому мы будем приводить лишь графики для  $\delta X$ .

С помощью этой программы были посчитаны искажения, возникающие от наличия соседних слоев, внешней и внутренней цилиндрических обечаек ДК, деформации

ции ячейки(сжатие), возникающей в стерео слоях, неточности выставки проволочек в ячейке и других причин.

## 2.2 Результаты расчетов

Суперслой моделировался тремя ячейками (рис.3). Результаты приводятся для центральной ячейки.

Важной характеристикой ячейки является напряженность электрического поля на поверхности полевых проволочек. Для "холодных" газов значение напряженности поля не должно превышать 40-50 кВ/см [8], в зависимости от качества поверхности проволочек. При больших полях возможно загорание коронного разряда на поверхности полевых проволочек. Из этих соображений был выбран диаметр полевых и фокусирующих проволочек равный 150 мкм. Проволочки были позолочены для улучшения качества поверхности.

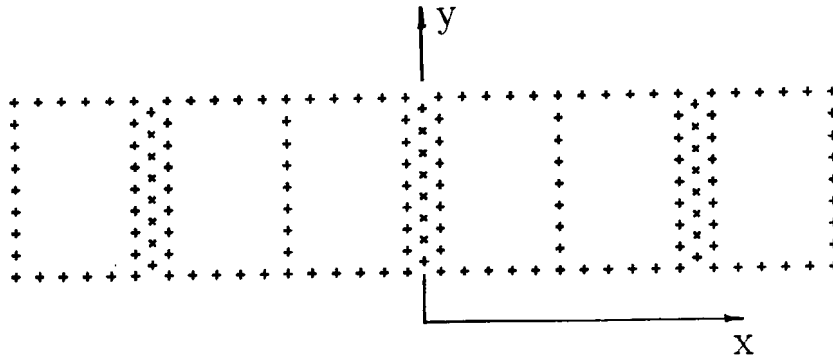


Рис. 3: Проволочная структура для которой проводился расчет.

Напряженность поля на поверхности фокусирующих проволочек равна 12 кВ/см, а на полевых изменяется от 9 до 51 кВ/см. Максимальная напряженность поля возникает на угловых проволочках. Метод ее понижения до приемлимой величины будет описан далее. Все значения приведены для напряженности поля в дрейфовом промежутке 2.0 кВ/см.

Напряженность поля на поверхности анодных проволочек диаметром 28 мкм, соответствующая коэффициенту газового усиления  $10^5$ , равна 300 кВ/см. Расчетная зависимость напряженности поля  $E_{анода}$  (кВ/см) на центральной анодной проволочке от напряжения на фокусирующих  $V_{фок}$  (кВ) и максимального напряжения на потенциальных проволочках  $V_{ном}$  (кВ) имеет вид:

$$E_{анода} = 93.8 \cdot V_{фок} + 5.5 \cdot V_{ном}. \quad (8)$$

Из этого выражения видно, что усиление на аноде в основном определяется напряжением на фокусирующих проволочках.

Мы исследовали возможность решения право-левой неопределенности в ячейке посредством смещения анодных проволочек на 100 и 200 мкм. Искажения  $X(t)$  зависимости превышают 100 мкм (рис.4), и поэтому эта возможность была отвергнута.

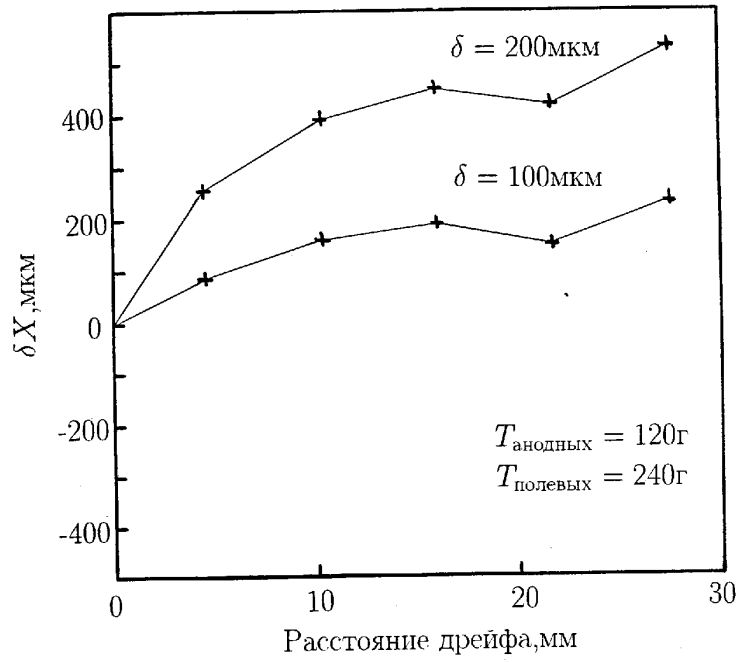


Рис. 4: Искажения  $X(t)$  – зависимости при смещении анодной проволочки по оси  $x$  на 100 и 200 мкм.

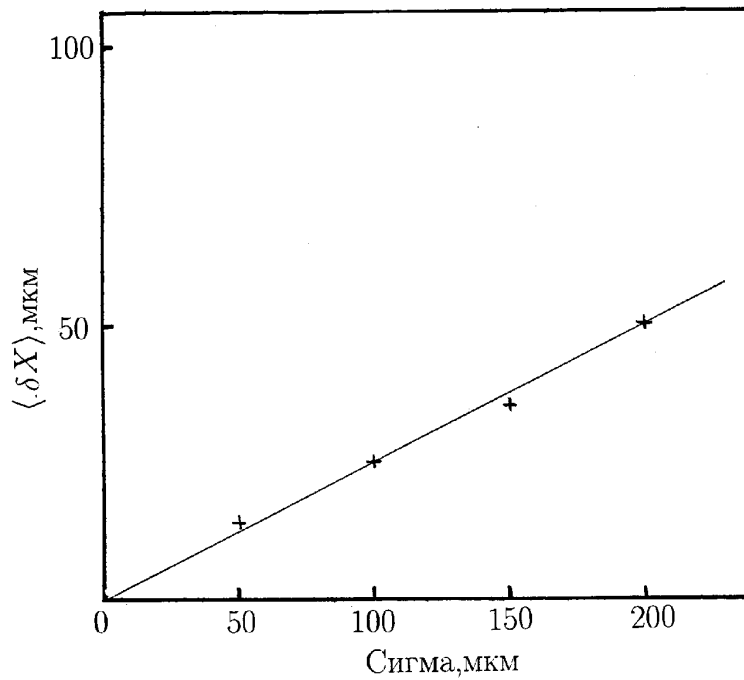


Рис. 5: Среднее по ячейке искажение  $X(t)$  – зависимости как функция точности вы-  
ставки полевых проволочек.



Для определения требований на точность выставки полевых и фокусирующих проволочек мы смещали их по осям случайным образом в соответствии с гауссовым распределением. На рис.5 приведена зависимость среднего по ячейке значения  $\delta X$  от величины дисперсии распределения. Из графика видно, что даже при точности выставки проволочек 100 мкм искажения равны 30–40 мкм. Напомним, что реально нами получена точность выставки около 20 мкм и поэтому вкладом этого эффекта в пространственное разрешение можно пренебречь.

При конструировании ДК необходимо было выбрать оптимальное расстояние между соседними суперслоями. Близкое расположение слоев приводит к взаимному искажению полей в них, а увеличение расстояния между ними уменьшает количество измерений координаты вдоль траектории частицы. В нашем случае соседним суперслоем является стереослой, из-за этого возникает искажение полей, зависящее от координаты вдоль проволочки. В расчетах каждый слой моделировался тремя ячейками. Расстояние между слоями  $\beta$ , а относительное смещение одного слоя по отношению к другому  $\alpha$ . Значение  $\alpha$  изменялось от 0 до 28.5 мм, а  $\beta$  варьировалось от 15 до 30 мм. Приемлимые величины искажений получаются при  $\beta = 25 - 30$  мм. На рис.6 показана зависимость  $\delta X$  для  $\beta = 25$  мм и значения  $\alpha = 0$  мм, при ко-

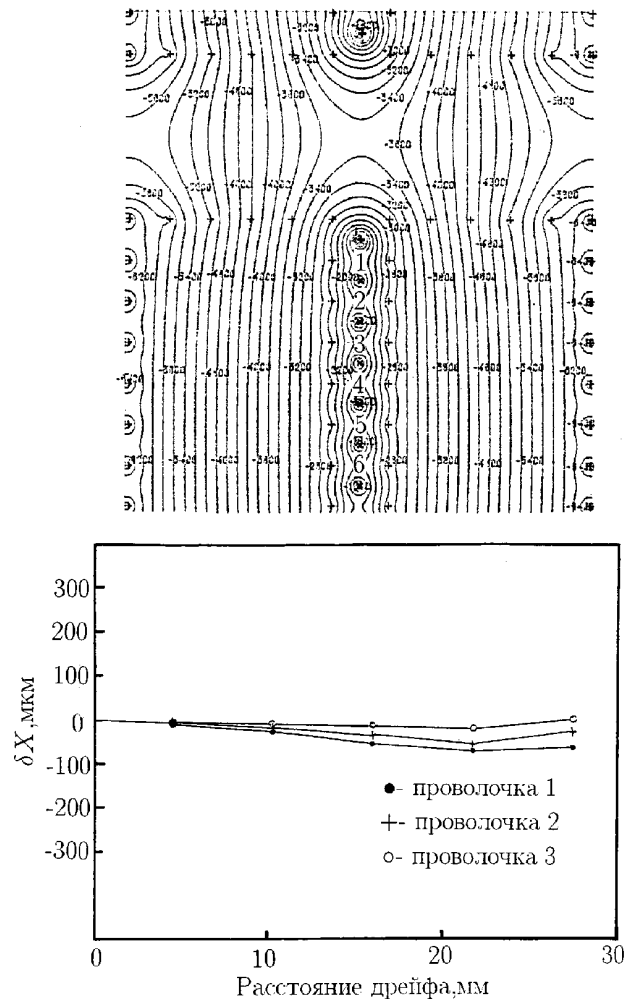


Рис. 6: Искажения  $X(t)$  – зависимости для расстояния между суперслоями 25 мм.

тором искажения максимальны, для трех крайних анодных проволочек. При этом расстояние между суперслоями лишь немного меньше радиального размера суперслоя и объем камеры используется неэффективно. Для устранения этого недостатка было предложено между суперслоями поместить экран – слой проволочек под оптимальным потенциалом. При этом удалось довести расстояние между суперслоями до 20 мм и уменьшить искажения (рис.7).

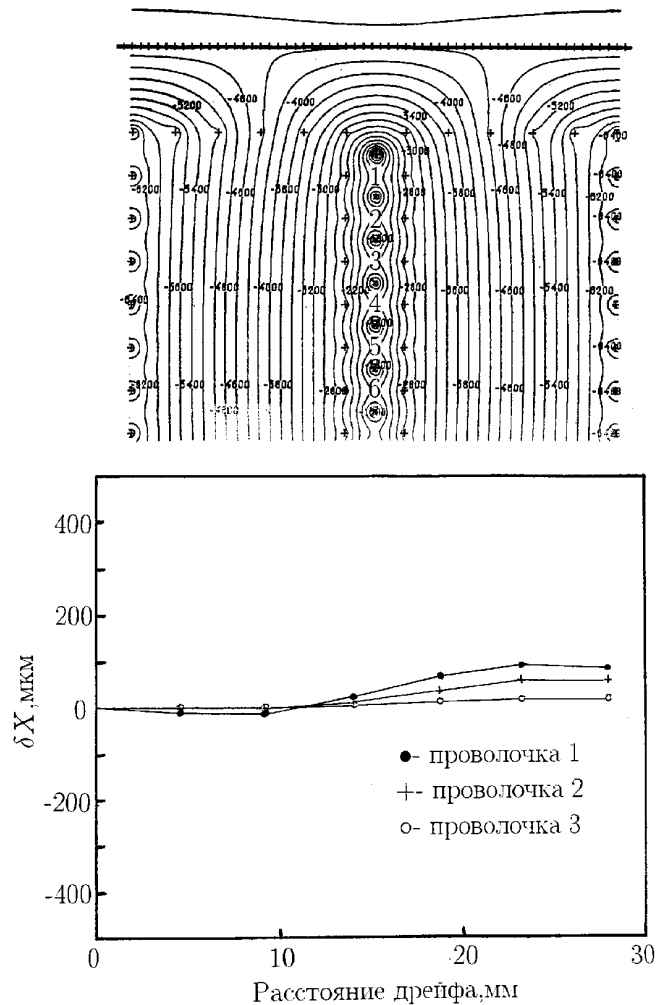


Рис. 7: Искажения  $X(t)$  – зависимости для суперслоем с экраном на расстоянии 10 мм под оптимальным потенциалом.

Наличие экрана, находящегося под промежуточным потенциалом между суперслоями, приводит к другому полезному эффекту. Выбором потенциала на экране можно изменять заряд на угловых полевых проволочках, тем самым уменьшать напряженность поля на поверхности проволочки и ее смещение. Значение потенциала было выбрано исходя из минимума искажений в ячейке и составило  $-5$  кВ. При этом напряженность поля на угловых проволочках уп ла с 96 до 51 кВ/см, а смещение угловой проволочки уменьшилось с 1400 мкм до 250 мкм, что в свою очередь уменьшило искажения полей в ячейке и устранило необходимость существенного увеличения натяжения этих проволочек.

Другой проблемой являются искажения, возникающие в ячейке от внутренней и внешней обечеек ДК, с нанесенными на них заземленными экранами. На рис.8 показана картина эквипотенциалей и искажений при наличии заземленного экрана на

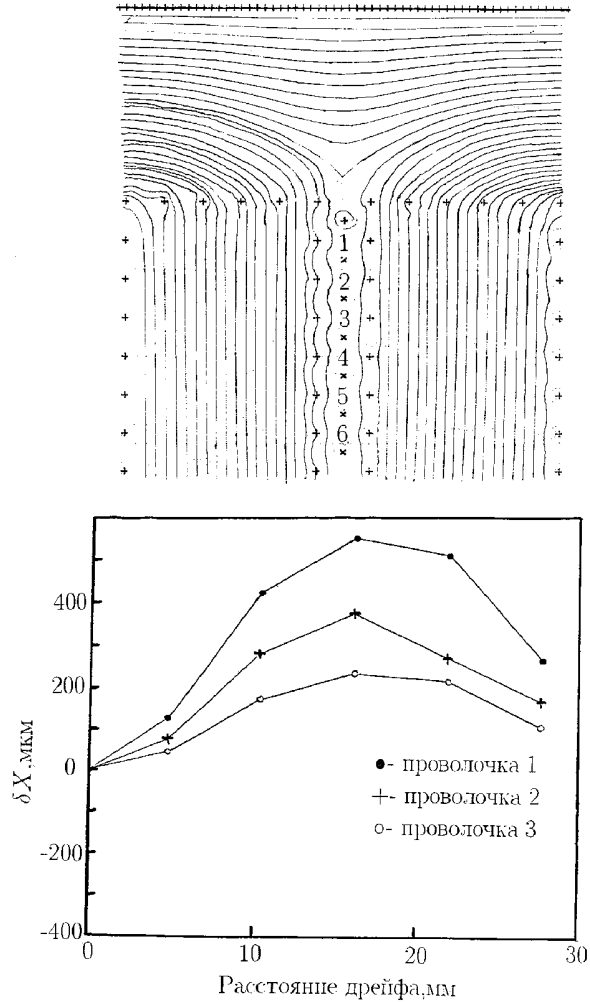


Рис. 8: Искажения  $X(t)$  – зависимости для суперслоя от экрана под потенциалом земли, расположенного на расстоянии 25 мм от него.

расстоянии 25 мм от суперслоя. Искажения полей неприемлемо велики. Для того, чтобы максимально приблизить крайние слои ячеек к обечайке, на их внутренние поверхности нанесли металлический экран, расположенный между внешним заземленным экраном и слоем ячеек и подали на него оптимальный потенциал. На рис.9 приведена зависимость  $\delta X$  при расстоянии от суперслоя до экрана 5 мм. Искажения вполне удовлетворительные и поэтому данная геометрия была использована при конструировании ДК.

В стереослоях напряженность поля изменяется из-за деформации ячейки в зависимости от координаты вдоль проволоочки. Искажения максимальны в середине проволоочки и зависят от длины проволоочек, радиуса на котором расположен стереослой  $R$  и величины стерео угла  $\theta$ . На рис.10 приведено изменение величины  $\delta X$  для различных  $R$  и  $\theta$ . Значение  $\delta Y$  во всех случаях много меньше 100 мкм. Из результатов расчета видно, что искажения меньше 100 мкм возникают при:  $R=153$  мм и

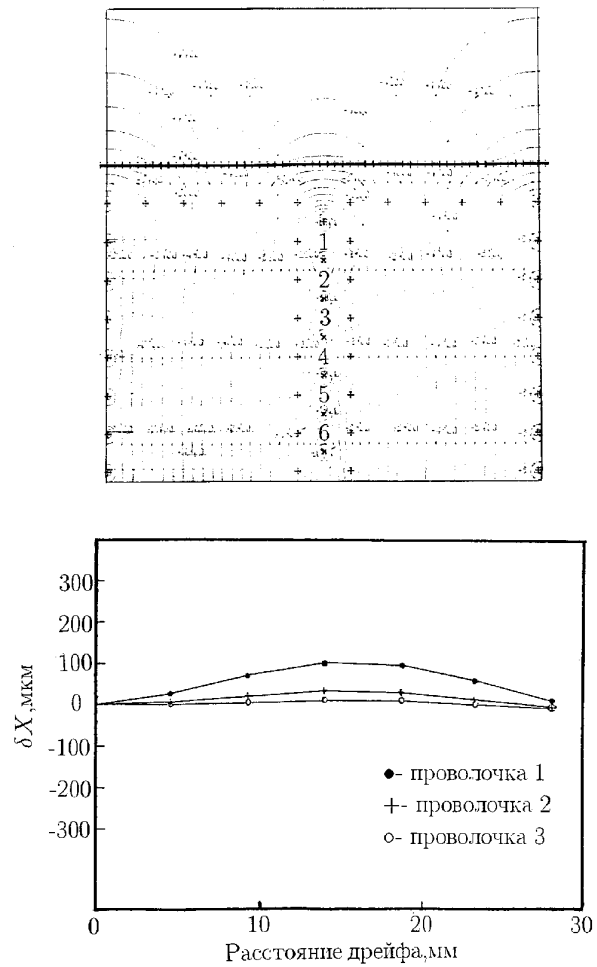


Рис. 9: Искажения  $X(t)$  – зависимости для суперслоя от экрана под оптимальным потенциалом, расположенного на расстоянии 5 мм от него.

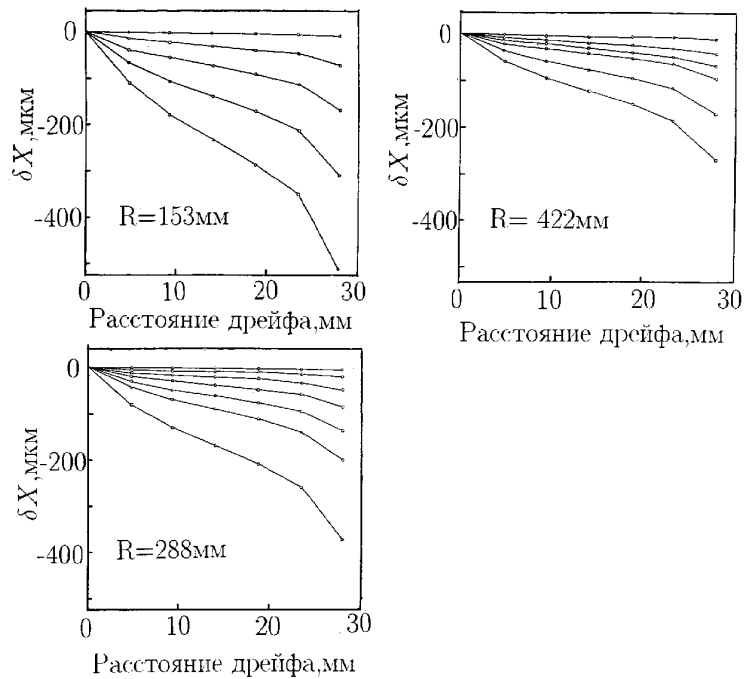


Рис. 10: Искажения  $X(t)$  – зависимости от стереугла для трех стереослоев, расположенных на расстояниях 153 мм, 288 мм и 422 мм. Стереугол на графике изменяется от значения 25 мрад. с шагом 25 мрад.

$\theta < 0.075$  рад,  $R=288$  мм и  $\theta < 0.1$  рад,  $R=422$  мм и  $\theta < 0.15$  рад. В ДК стерео угол был выбраны равным 0.1 рад для всех суперслоев.

Для выправления искажений поля на торце камеры из-за краевого эффекта было предложено нанести на торцевую пластину ДК ряд металлических полосок (рис.2), расположенных внутри дрейфового промежутка. На полоску подается напряжение равное среднему по площади полоски потенциалу, вычисленному с помощью программы, описанной выше. Необходимое число полосок было выбрано равным 4 после измерений на модели ячейки с различным числом полосок.

### 3 Расчет электростатических и гравитационных смещений проволочек в ячейке дрейфовой камеры

Смещения проволочек в ячейке ДК из-за электрических и гравитационных сил могут существенно ухудшить пространственное разрешение. С одной стороны, смещения анодных проволочек дают прямой вклад в ухудшение пространственного разрешения, с другой стороны, смещения проволочек приводят к искажению электрических полей в ячейке. Искажение полей ухудшает пространственное разрешение посредством изменения зависимости координаты пролета частицы от времени дрейфа ( $X(t)$ ).

Для оптимизации натяжений проволочек в камере была написана программа расчета электростатических и гравитационных смещений в ячейке. Приведем краткое описание метода расчета.

В случае, когда сила, действующая на единицу длины проволочки, помещенной в однородное поле сил, много меньше натяжения, форма проволочки хорошо аппроксимируется параболой

$$\vec{X} = \frac{\vec{F} \cdot l^2}{8 \cdot T} \cdot \left( 1 - \left( \frac{2 \cdot z}{l} \right)^2 \right), \quad (9)$$

где,  $\vec{X}$  – величина смещения проволочки в точке с координатой  $z$ ,  $l$  – длина проволочки,  $\vec{F}$  – сила, действующая на единицу длины проволочки. Максимальное смещение центра проволочки и среднее смещение по длине проволочки равны:

$$X_{\max}(z = 0) = \frac{|\vec{F}| \cdot l^2}{8 \cdot T}, \quad (10)$$

$$\langle X \rangle = \frac{2}{3} X_{\max}. \quad (11)$$

Сила, действующая на единицу длины проволочки, в гравитационном и электрическом поле имеет вид:

$$\vec{F}_{\text{грав}} = B \cdot \vec{G}, \quad (12)$$

$$\vec{F}_{\text{элек}} = Q \cdot \vec{E}, \quad (13)$$

где,  $B$  – масса единицы длины проволоочки,  $\vec{G}$  – вектор напряженности гравитационного поля,  $Q$  – заряд единицы длины проволоочки,  $\vec{E}$  – вектор напряженности электрического поля. Подставляя значения (12,13) в формулу (10), получаем окончательные выражения для смещения центра проволоочки в гравитационном и электрическом полях

$$\vec{X}_g = \frac{B \cdot \vec{G} \cdot l^2}{8 \cdot T}, \quad (14)$$

$$\vec{X}_e = \frac{Q \cdot \vec{E} \cdot l^2}{8 \cdot T}. \quad (15)$$

Все вычисления смещений проводятся в плоскости перпендикулярной проволоочкам, проходящей по середине проволоочек. Для получения смещений при  $z \neq 0$  необходимо воспользоваться формулой (9). Алгоритм работы программы приведен ниже:

- 1) по формуле (14) вычисляем гравитационные смещения проволоочек  $\vec{X}_g$  из начального положения,
- 2) определяем заряды на проволоочках, считая, что они смещены как целое вдоль вектора  $\vec{X}_g$  на величину  $\langle X_g \rangle$  (11) и напряженности поля в этих точках,
- 3) по формуле (15) находим величину электростатического смещения  $\vec{X}_e$ ,
- 4) вычисляем суммарное гравитационное и электростатическое смещение  $\vec{X}_{tot} = \vec{X}_g + \vec{X}_e$ ,
- 5) далее переходим к пункту 2, заменяя  $\vec{X}_g$  на  $\vec{X}_{tot}$ , и делаем следующую итерацию и так далее.

Программа была проверена в двух аналитически вычисляемых случаях, приведенных в работе [9]. Длина проволоочек из алюминия диаметром 200 мкм равна 180 см. Вычислялось только электростатическое смещение проволоочек. В таблицах на рис.11 приведены условия расчета и результаты вычислений программы после первой итерации, что соответствует простейшим аналитическим вычислениям, и конечный результат работы программы. Видно хорошее согласие с аналитическими вычислениями в обоих случаях и существенное отличие конечного результата расчета программой от упрощенного аналитического решения.

Было также проведено сравнение величин смещений, рассчитанных программой, с изменениями на модели пропорциональной камеры [10] (рис.12). Камера с длиной проволоочек 60 см имела десять анодных проволоочек с шагом 2 мм и диаметром 28 мкм(золоченый вольфрам), катодные плоскости состояли из двадцати проволоочек диаметром 100 мкм с шагом 1 мм(бериллиевая бронза). Расстояние между анодной и катодной плоскостями 7.5 мм. Натяжение анодных проволоочек 40 г, катодных 100 г. Камера расположена так, что сила тяжести направлена против оси  $y$  (рис.12). Известно [11], что в пропорциональных камерах возникает неустойчивость анодных проволоочек, связанная с попеременным смещением из плоскости по и против оси  $y$  (рис.12). Используя формулу для критического натяжения [11] получим, для данной модели  $V_{крит} = 6.3$  кВ. На рис.13 приведена экспериментально измеренная зависимость смещения от напряжения на катодных плоскостях для двух анодных

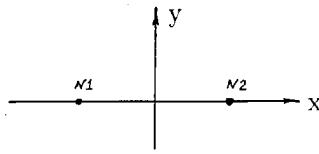


Таблица 1:  $\vec{G} = (0, 0)$

	Пров-ка 1	Пров-ка 2
Координата (см)	(-1.0)	(1.0)
Напряжение (В)	-5000	+5000
Смещение (мкм) аналитические вычисления	(+265.0)	(-265.0)
Программа после первой итерации	(+263.0)	(-263.0)
Программа, конечный результат	(+255.0)	(-255.0)

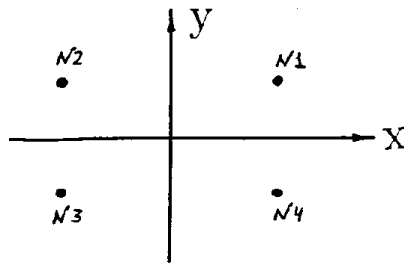


Таблица 2:  $\vec{G} = (0, 0)$

	Пров-ка 1	Пров-ка 2	Пров-ка 3	Пров-ка 4
Координата (см)	(+1,+0.5)	(-1,+0.5)	(-1,-0.5)	(+1,-0.5)
Напряжение (В)	+5000	-5000	-5000	+5000
Смещение (мкм) аналитические вычисления	(-350,+311)	(+350,+311)	(+350,-311)	(-350,-311)
Программа после первой итерации	(-348,+310)	(+348,+310)	(+348,-310)	(-348,-310)
Программа, конечный результат	(-361,+297)	(+361,+297)	(+361,-297)	(-361,-297)
Напряжение (В)	+5000	-5000	+5000	-5000
Смещение (мкм) аналитические вычисления	(-72,-573)	(+72,-573)	(+72,+573)	(-72,+573)
Программа после первой итерации	(-71,-572)	(+72,-572)	(+71,-572)	(-71,+572)
Программа, конечный результат	(-64,-673)	(+64,-673)	(+64,+673)	(-64,+673)

Рис. 11: Результаты расчета для двух аналитически вычисляемых случаев.

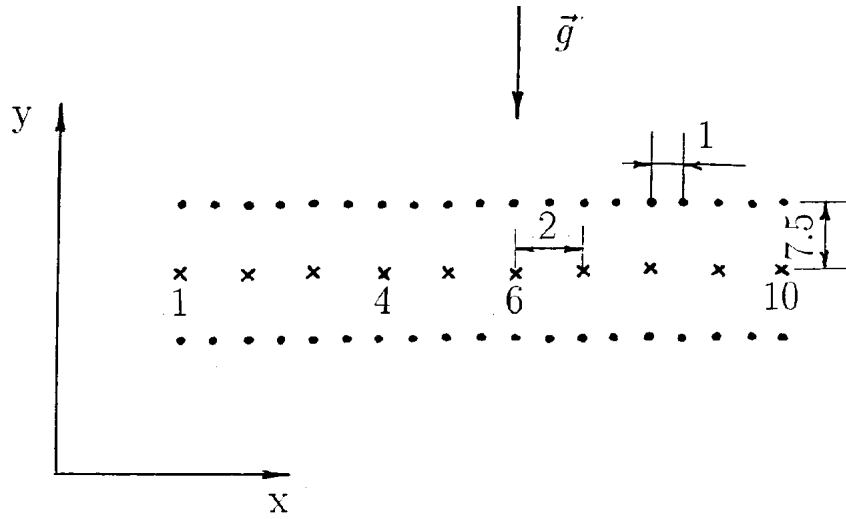


Рис. 12: Модель пропорциональной камеры.

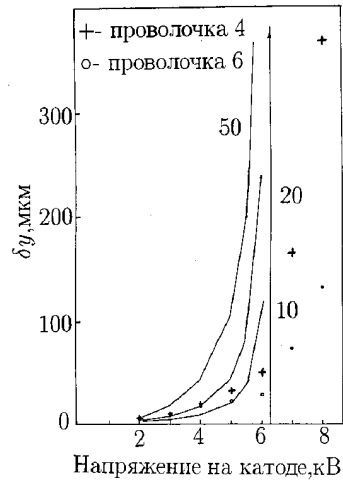


Рис. 13: Сравнение измеренных смещений проволочек в пропорциональной камере от напряжения с аналитическими вычислениями при начальном смещении анодной проволочки на 10, 20 и 50 мкм.



проволочек. Величина смещения измерялась с помощью микроскопа. Сплошными линиями изображена зависимость смещения анодной проволоочки в случае, когда она изначально была смещена из плоскости на 10, 20, и 50 мкм, полученная в работе [11]. Сравнение результатов измерений с предсказаниями программы приведено на рис.14 для случаев, когда изначально анодные проволоочки попеременно смещались на  $\pm 10$ ,  $\pm 20$ ,  $\pm 50$  мкм. Аналитические вычисления хорошо описывают поведение проволочек при малых смещениях и дают плохое согласие с экспериментом при приближении к  $V_{крит}$ . Предсказания программы при начальных смещениях  $\pm 10$  и  $\pm 20$  мкм удовлетворительно описывают экспериментальные данные при всех напряжениях. При этом известно, что механическая точность изготовления камеры составляла 10–15 мкм.

Учет гравитации практически не изменяет результатов расчета.

Мы провели сравнение результатов расчета с измерениями, сделанными группой SLD, на модели ячейки и предсказаниями их программы моделирования электростатических и гравитационных смещений проволочек в ячейке [9]. Модель состояла из трех рядов проволочек длиной 180 см (рис.15), два внешних ряда и проволочки 1 и 10 из среднего из алюминия диаметром 200 мкм, центральный ряд диаметром 25 мкм из вольфрама. Металлические плоскости моделируются двумя рядами проволочек под потенциалом земли. На рис.16 показаны зависимости смещений анодных проволочек от напряжения на фокусирующих проволочках и результаты моделирования (сплошные линии), взятые из работы [9], а также результаты расчетов с использованием нашей программы. На рис.17 приведены величины смещений, когда алюминиевые проволочки заменены на проволочки из бериллиевой бронзы того же диаметра, при различных направлениях силы тяжести. Результаты расчета по нашей программе показаны крестиками. Предсказания обеих программ хорошо согласуются между собой и с хорошей точностью описывают экспериментальные данные.

### 3.0.1 Результаты расчетов

С помощью описанной программы было проведено исследование электростатических и гравитационных смещений проволочек в ячейке ДК детектора КЕДР. При моделировании суперслоя задавались три ячейки (рис.3). Все расчеты, приведенные ниже, относятся к центральной ячейке. Во всех расчетах напряжение на фокусирующих проволочках было выбрано равным  $-2.8$  кВ, максимальное напряжение на потенциальных проволочках  $-8.5$  кВ. Анодные проволочки находились под потенциалом земли. Геометрия ячейки, материалы и диаметры проволочек были описаны выше.

Для исследования влияния механического смещения анодных проволочек они попеременно смещались по и против оси  $x$  на величину точности выставки и вычислялись их электростатические и гравитационные смещения. На рис.18 показана зависимость смещения анодных проволочек от их натяжения для точности выставки 10, 25, и 35 мкм. Неточность выставки проволочек 20 мкм требует натяжения анодных проволочек 120 г, при этом механическое и электростатическое смещение,

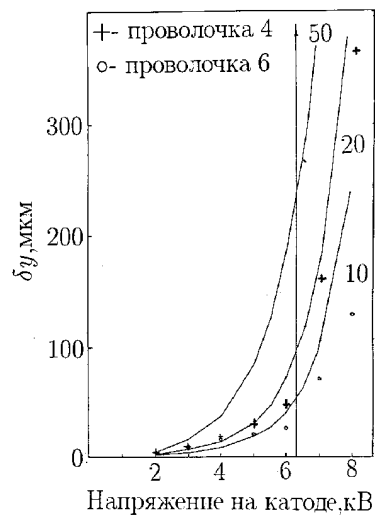


Рис. 14: Сравнение измеренных смещений проволочек в пропорциональной камере от напряжения с аналитическими вычислениями программы при начальном смещении анодной проволочки на 10, 20 и 50 мкм.

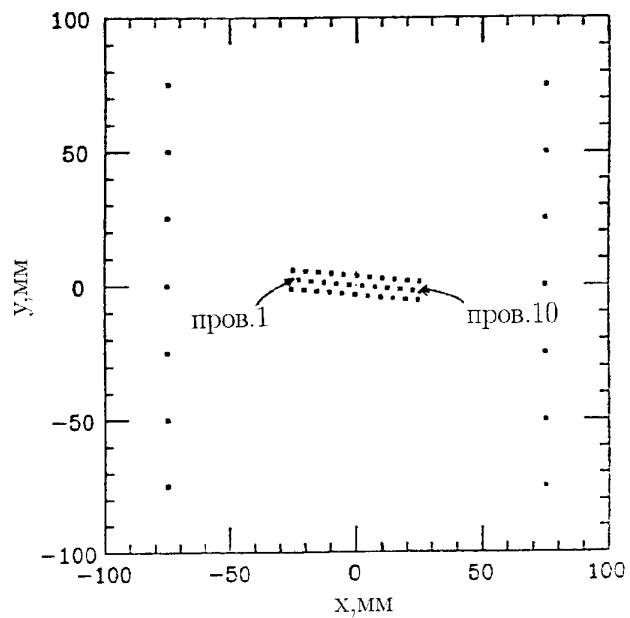


Рис. 15: Проволочная структура, использованная для измерения смещений проволочек в группе SLD.

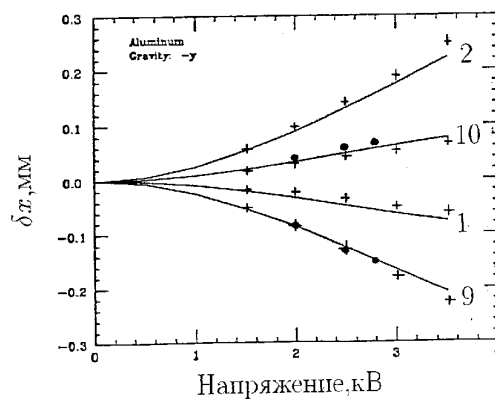
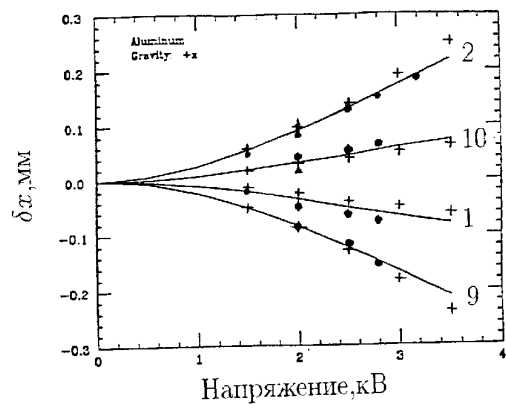


Рис. 16: Зависимость смещений анодных проволочек от напряжения на фокусирующих проволочках для двух направлений силы тяжести: сплошная линия – расчеты [9], + – наши расчеты, ● – эксперимент.

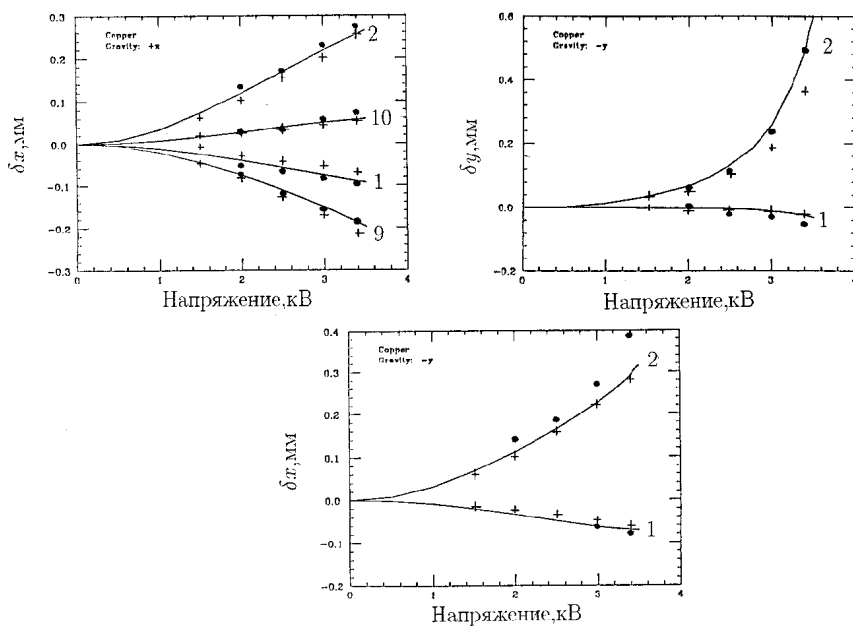


Рис. 17: Зависимость смещений анодных проволочек от напряжения на фокусирующих проволочках для двух направлений вектора силы тяжести: сплошная линия – расчеты [9], + – наши расчеты, ● – эксперимент.

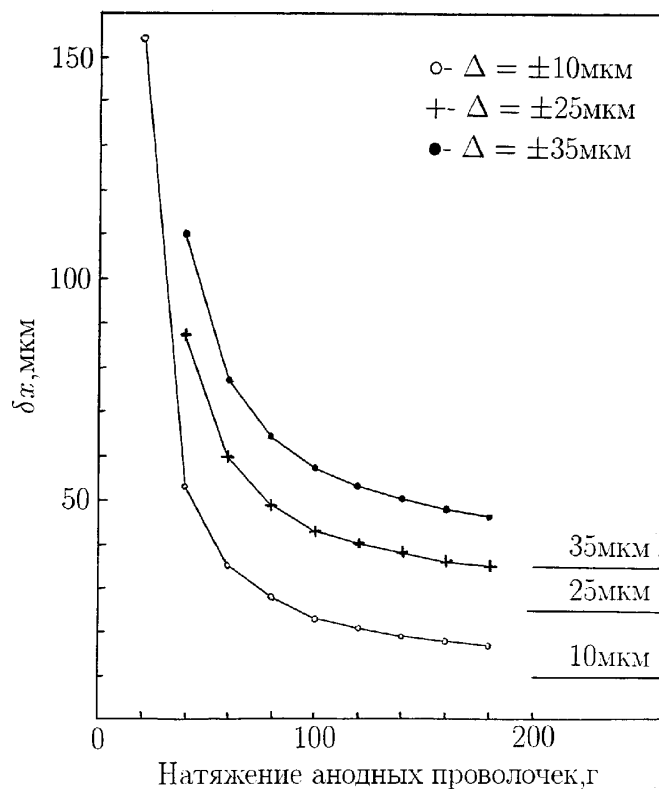


Рис. 18: Зависимость смещений анодных проволочек от их натяжения для точности выставки проволочек 10, 20 и 50 мкм.

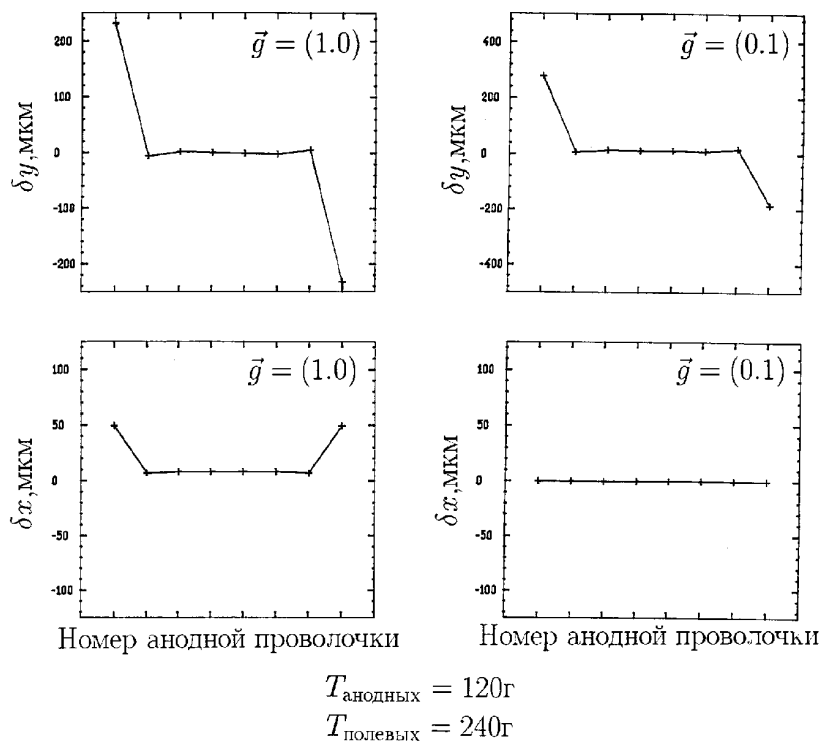


Рис. 19: Зависимость смещений анодных проволочек для двух направлений вектора силы тяжести.

вызванное им, дают примерно равные вклады в пространственное разрешение.

На рис.19 приведены величины смещений анодных проволочек для двух направлений вектора напряженности гравитационного поля при натяжении анодных проволочек 120 г, катодных – 240 г. На рис.20 показаны искажения зависимости  $X(t)$ , вызванные смещением проволочек в ячейке для этих двух случаев. Искажения полей из-за смещения проволочек дают приемлимый вклад в пространственное разрешение камеры. Определенный интерес представляет случай, когда на крайние нерабочие анодные проволочки подается потенциал – 0.8 кВ, при этом достигается максимальная однородность поля в ячейке и равенство зарядов на анодных проволочках. Заряд на этих проволочках падает и уменьшается их смещение по оси  $y$ , смещения остальных проволочек изменяются незначительно.

Известно, что после натяжения камеры происходит уменьшение натяжения проволочек из-за временной текучести материала проволоки. В начальный момент быстрое, с характерным временем несколько дней, а потом медленное, с характерным временем порядка года. По прошествии нескольких лет натяжение уменьшается до 95% – 70% начального, для вольфрама и алюминия соответственно. Для исследования влияния этого эффекта мы провели расчеты влияния падения натяжения проволочек на искажение  $X(t)$  – зависимости. Было установлено, что при начальном натяжении полевых проволочек 240 г, а анодных – 120 г, падение натяжения полевых проволочек более чем на 30% является нежелательным (рис.21). Мы используем титановые полевые проволочки у которых падение натяжения со временем меньше значения 30%, типичного для алюминиевых проволочек, поэтому натяжение полевых проволочек 250 г является достаточным. Падение натяжения анодных проволочек, изготовленных из вольфрама, практически не влияет на пространственное разрешение.

Мы попробовали уменьшить искажения  $X(t)$  – зависимости, варьируя натяжения различных групп полевых проволочек. На основании этих расчетов можно сделать вывод, что, к сожалению, на однородность поля в ячейке одинаково влияют различные группы полевых проволочек. Поэтому существенно уменьшить искажения можно только увеличив натяжения всех полевых проволочек в ячейке, тем самым существенно повысив нагрузку на торцевые пластины.

Из результатов моделирования следует, что для получения проектного пространственного разрешения 100мкм необходимо натяжение полевых проволочек 250 г, анодных – 120 г.

## 4 Заключение

С помощью созданных программ расчета электрических полей и электростатических и гравитационных смещений проволочек в ячейке дрейфовой камеры проведена оптимизация проволочной структуры и выбраны натяжения проволочек в ДК детектора КЕДР.

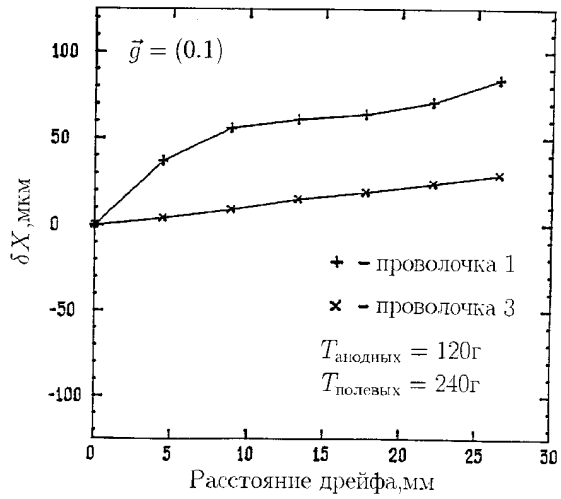
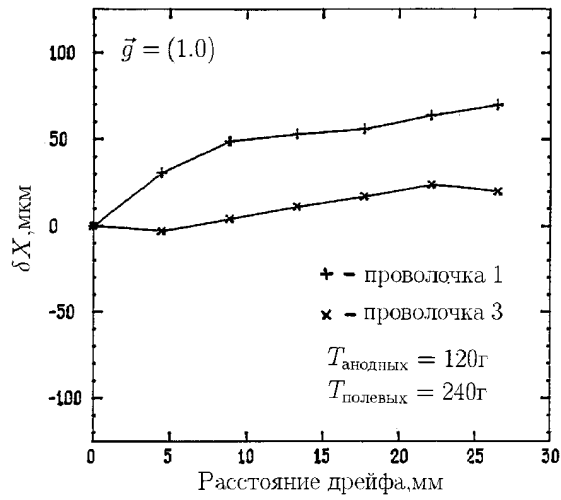


Рис. 20: Искажения  $X(t)$  – зависимости из-за смещений проволочек в ячейке дрейфовой камеры детектора КЕДР для двух направлений вектора силы тяжести.

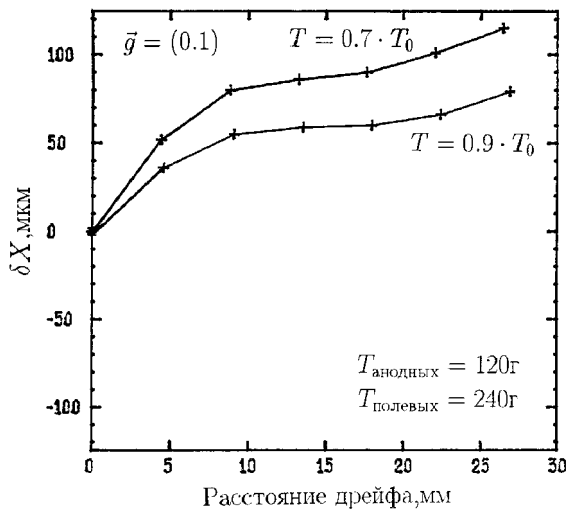


Рис. 21: Искажения  $X(t)$  – зависимости из-за уменьшения натяжения проволочек в ячейке ДК до 90 и 70%.

## Литература

- [1] В.В. Анашин и др., Труды международного симпозиума по координатным детекторам в физике высоких энергий. Дубна, D1.13-88-172, стр.58, 1988.
- [2] S.E.Baru et al., Proc. of Fifth Intern. Conf. on instrumentation for colliding beam physics. Novosibirsk, World Scientific, 1990, p.41.
- [3] S.E.Baru et al., Nucl. Instr. and Meth. A323 (1992) 151.
- [4] S.E.Baru et al., Nucl. Instr. and Meth. A379 (1996) 417.
- [5] SLD Design report, SLAC-Report-273 (1984); W.B.Atwood et al., Nucl. Instr. and Meth., 252 (1986) 295.
- [6] Н.Н. Миролюбов, "Методы расчета электрических полей". Наука, 1963.
- [7] В.В. Батыгин, И.Н. Гоптыгин, "Сборник задач по электродинамике". Наука, 1970.
- [8] J.P. Venuti et al., SLD memo. 1988.
- [9] C. Young., Memo SLD DC GROUP 01.02.86.
- [10] Г.Д. Минаков, частное сообщение, 1977.
- [11] В.И. Тельнов, кандидатская диссертация, 1982.

**Оптимизация проволочной структуры  
и выбор натяжения проволочек  
в дрейфовой камере детектора КЕДР**

*В.Е. Блинов, В.Р. Грошев*

ИЯФ 97-16

Ответственный за выпуск А.М. Кудрявцев  
Работа поступила 3.03.1997 г.

---

Сдано в набор 5.03.1997 г.

Подписано в печать 5.03.1997 г.

Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 2.1 печ.л., 1.7 уч.- изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ N 16.

---

Обработано на IBM PC и отпечатано на  
ротапринте ГНЦ РФ "ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН",  
*Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.*