

**МИНИСТЕРСТВО  
ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное агентство  
по образованию**

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
НОВОСИБИРСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**Физический факультет**

**Квалификационная работа на соискание  
степени бакалавра**

**Кафедра: физика плазмы**

**Ткаченко Андрей Александрович**

**Название работы**

**Измерение разброса скоростей электронов РЭП на установке ЭЛМИ**

**Научный руководитель: к. ф.-м. н. Сеницкий С. Л.**

**Новосибирск – 2006 год**

# Содержание

Введение.....	3
Глава 1. Изложение метода, аналитический расчет.....	6
Глава 2. Моделирование прохождения электронов через винтообразные отверстия.....	8
2.1 Моделирование прохождения для различных видов функций распределения электронов по углам.....	8
2.2 Моделирование прохождения в случае несовпадающих частот вращения частиц и стенок.....	9
2.3 Моделирование прохождения в случае несовпадающих частот вращения частиц и стенок при различных длинах винтообразных отверстий.....	10
Глава 3. Конструкция датчика и условия эксперимента.....	11
3.1 Описание установки ЭЛМИ.....	11
3.2 Конструкция датчика.....	12
3.3 Погрешности измерений.....	13
Заключение.....	15
Список литературы.....	16
Название работы	

1

Новосибирск – 2006 год

1

Содержание

2

## Введение.

Одним из основных параметров сильноточных РЭП, определяющих как эффективность накачки электромагнитной волны в электродинамических системах СВЧ - генераторов, так и уровень возбуждения ленгмюровской турбулентности в плазме при нагреве ее пучком является угловой разброс электронов. Поскольку сильноточные электронные пучки, как правило, сильно замагничены, то измерение разброса электронов по скоростям представляет собой очень сложную задачу. В связи с этим имеется необходимость в разработке способа определения углового разброса.

Ранее в [2,3] были предложены методики измерения этого параметра пучка, основанные на закономерностях прохождения замагниченных электронов через длинное цилиндрическое отверстие с радиусом, сопоставимым с поперечным ларморовским радиусом электронов, которые впервые были получены в работе [1].

Первый датчик, работающий на этом принципе, описанный в работе [2], состоял из

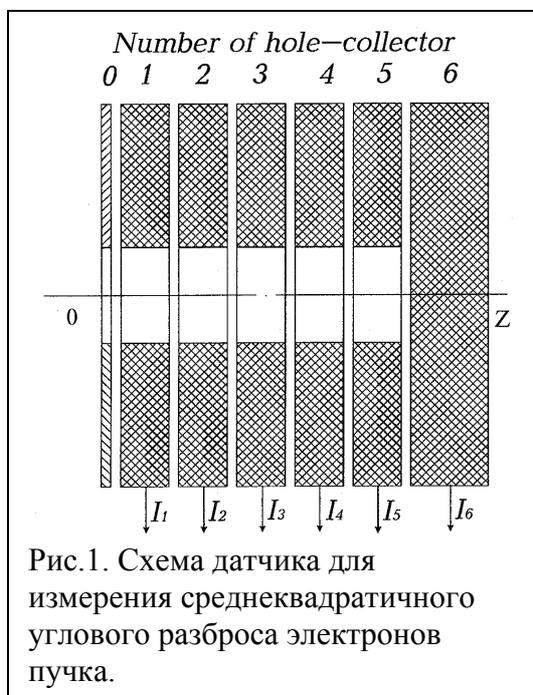
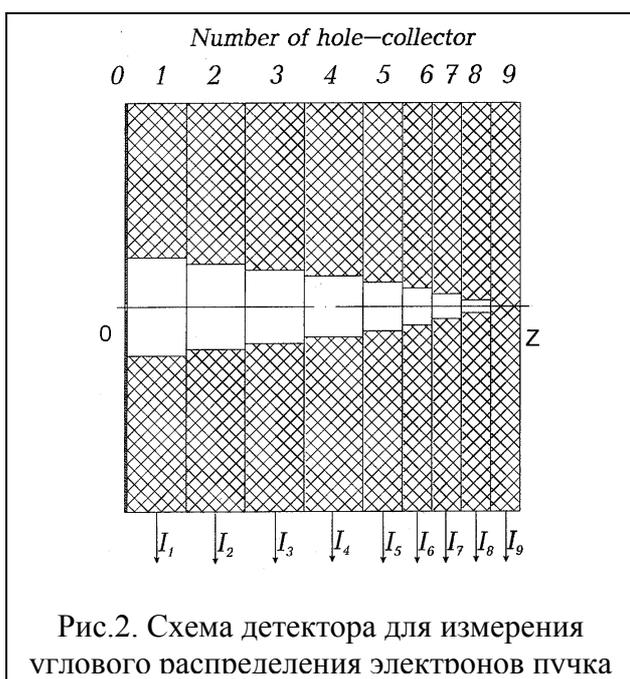


Рис.1. Схема датчика для измерения среднеквадратичного углового разброса электронов пучка.

графитового блока, в котором имелось 5 отверстий одинакового диаметра ( $d = 3\text{мм}$ ). За графитовым блоком помещался танталовый диск, в котором были сделаны отверстия диаметром  $0,5\text{мм}$ . Этот диаметр соответствовал двойному поперечному ларморовскому радиусу электронов пучка с энергией масштаба  $1\text{МэВ}$  и угловым разбросом  $15\text{-}30^\circ$  в магнитном поле величиной  $40\text{кЭ}$ . Отверстия в тантале были соосны с отверстиями в графите. Длина коллимирующего отверстия диаметром  $0,5\text{мм}$

возрастала с номером отверстия от 0,3мм до 2,5мм. Электроны, прошедшие через коллиматоры, поглощались в графитовых микроколлекторах. Токи электронов, поглотившихся в микроколлекторах, регистрировались осциллографом. Результаты данной работы показали, что принцип ослабления электронного тока коллимирующими отверстиями различной длины можно применять для определения углового разброса пучка электронов даже в условиях сильного магнитного поля. Для релятивистского электронного пучка ( $0.3 \leq E \leq 1.0$  МэВ) описанная методика применима в условиях  $\theta \geq 10^\circ$  и  $H_z \leq 40$  кЭ. Основными недостатками данного датчика являлись: зависимость результатов обработки измерений от функции распределения электронов по углам, а также заметная погрешность измерений, связанная с различной величиной плотности тока электронного пучка в местах расположения отверстий, обусловленной флуктуациями тока взрывоземиссионного катода.

Следующая модификация датчика среднеквадратичного углового разброса на основе секционированного коллимирующего отверстия [5], лишенная последнего недостатка, представлена на рис.1. Он состоит из коллимирующего диска, изготовленного из материала с малым пробегом электронов по отношению шагу ларморовской спирали электрона в ведущем магнитном поле, и пяти измерительных колец с внутренним диаметром, сопоставимым с величиной характерного поперечного ларморовского радиуса электронов пучка. С помощью такого датчика был измерен угловой разброс электронов мощного микросекундного пучка с энергозапасом в 400кДж, генерируемого ускорителем У-2 [4]. Но, как и в случае предыдущего датчика, при обработке результатов необходимо закладывать вид функции распределения электронов по углам.



Следующая модификация датчика, описанная в работе [3], (см рис.2) предполагала восстановление самой функции распределения электронов по углам. Этот датчик состоял из одного диска с небольшим коллимирующим отверстием, изготовленного из материала с малым пробегом электронов, и девяти измерительных колец с последовательно уменьшающимися радиусами внутренних отверстий. Радиусы менялись от 5мм до 0,6мм, толщины колец варьировались от 2,4мм до 1,6мм. Измерялся ток

электронов, поглощенных в каждом кольце, а так же ток электронов, прошедших через все кольца. Данный датчик использовался для регистрации углового разброса и функции распределения электронов по углам для микросекундного РЭП с энергией электронов 60кэВ и 120кэВ в магнитном поле порядка 2кГс, который генерировался ускорителем ЭЛДИС (НИИЭФА г. Санкт-Петербург). Величины углового разброса электронов, вычисленные по найденной функции распределения (см рис.4) и измеренные с помощью

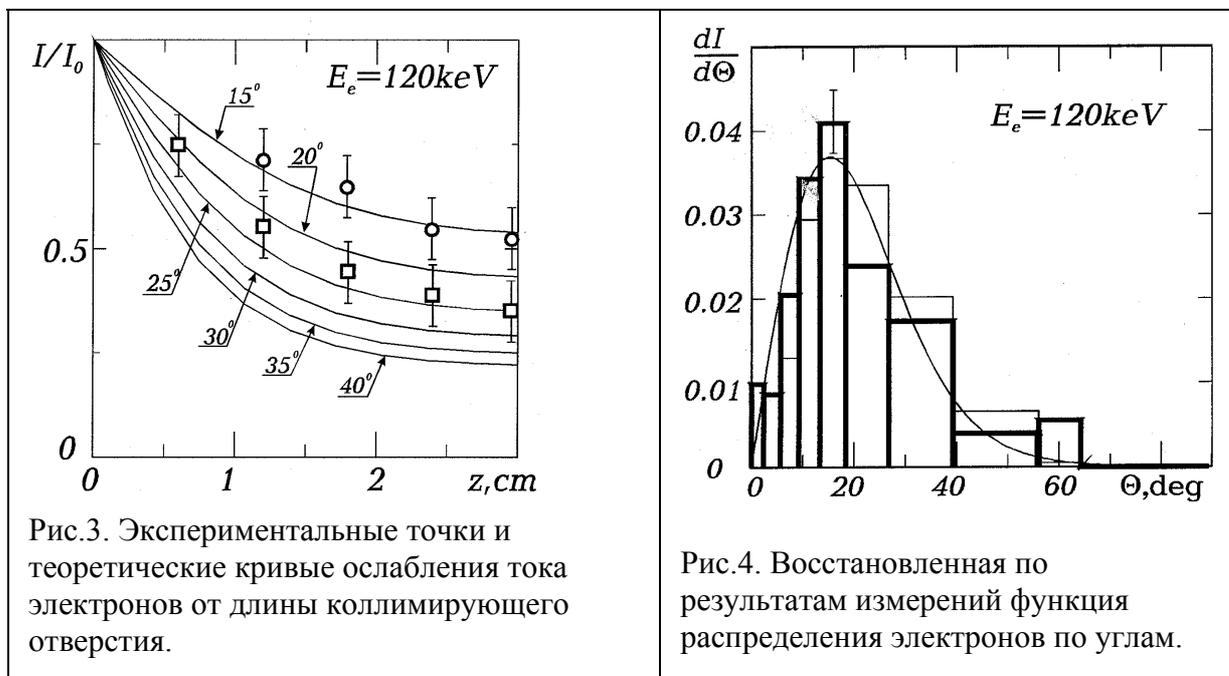


Рис.3. Экспериментальные точки и теоретические кривые ослабления тока электронов от длины коллимирующего отверстия.

Рис.4. Восстановленная по результатам измерений функция распределения электронов по углам.

датчика, приведенного на рис.1, (квадратики на рис.3) соответствовали друг другу в пределах погрешности измерений и составили около  $\theta_0 \sim 20^\circ - 30^\circ$

Обобщая достоинства перечисленных конструкций датчиков углового разброса можно заметить, что они довольно просты в изготовлении, но имеют ряд существенных недостатков.

- Как правило, результаты обработки измерений предполагают вполне определенный, но неизвестный для данного эксперимента, вид функции распределения электронов по углам (так в работе [1] эта функция имеет гауссов вид). И все последующие измерения велись с данным предположением. Только в последней модификации датчика сделана попытка довольно грубого (9 каналов) определения самого вида функции распределения. Поэтому эти методы очень чувствительны к изменению функции распределения.
- При движении электрона внутри цилиндрического отверстия с небольшим углом между скоростью и направлением ведущего магнитного поля, коллинеарного оси отверстия, угол падения электрона на поверхность отверстия  $\theta$  мал, что приводит к заметному росту коэффициента отражения электронов от поверхности  $K_{отр}$  при

уменьшении угла  $\theta$ . Кроме того, коэффициент отражения растет с увеличением атомного номера вещества. Это приводит к тому, что измерительными кольцами датчиков регистрируются не только электроны самого пучка, упавшие на них, но и отраженные, а также вторичноэмиссионные электроны, вылетевшие со стенок других колец. Паразитный сигнал от таких электронов может составлять заметную величину по сравнению с полезным сигналом.

- Хотя целью описанных методик было нахождение среднеквадратичного разброса углов электронов, но в результате измерений на выходе датчиков мы имеем экспериментальную кривую количества прошедших электронов от длины коллиматора. И для нахождения нужного параметра, как правило, требуется либо решение обратной задачи нахождения функции распределения по углам, либо вписывание в экспериментальную кривую рассчитанных для различного вида функций распределения по углам зависимостей количества прошедших электронов от длины коллиматора. Все доступные численные методы при попытке восстановления функции распределения по углам по данным измерениям дают ошибку масштаба 30%.

Учитывая все сказанное, нашей задачей являлась разработка такой конструкции датчика, которая, с одной стороны, была бы проста, а с другой стороны, давала бы без предварительной обработки величину, пропорциональную угловому разбросу электронов пучка, и влияние на которую наличия отраженных и вторично эмитированных электронов было бы сведено к минимуму.

## **Глава 1. Изложение метода, аналитический расчет**

Рассмотрим принцип действия и конструкцию следующего датчика. Коллимирующий винтообразный канал (в дальнейшем винт) с поперечным сечением в виде вырезанного сектора окружности помещается в продольное магнитное поле, в котором движутся электроны пучка. Этот винт характеризуется двумя параметрами: шаг винта и рабочий угол, равный углу вырезанного сектора в окружности.

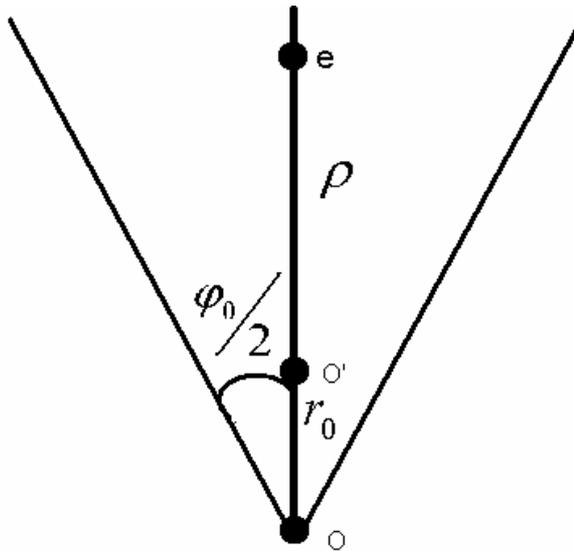


Рис.1.1 Поведение частицы в системе отсчета, вращающейся вокруг центра винта с циклотронной частотой частицы.

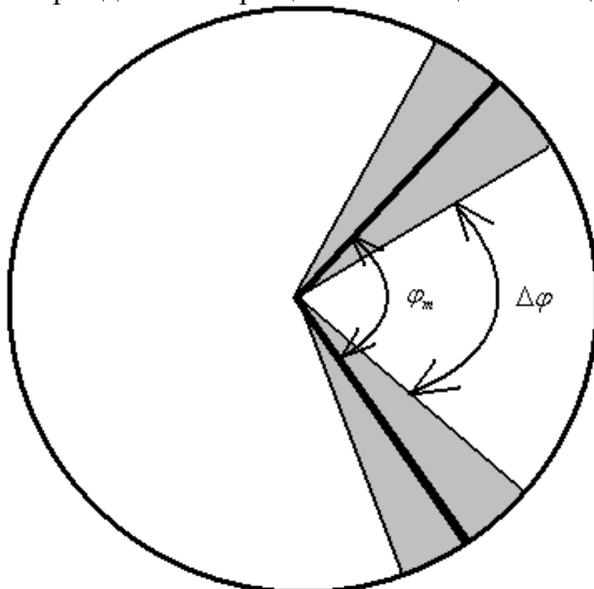
Рассмотрим задачу о прохождении потока замагниченных заряженных частиц с одинаковой энергией и с равновероятными начальными фазами вращения по ларморовской окружности через винтообразное отверстие с указанным выше поперечным сечением в полностью поглощающем экране. Для начала рассмотрим случай, когда шаг винта совпадает с шагом ларморовской спирали частицы в ведущем магнитном поле.

Для удобства все расчеты велись в системе отсчета, вращающейся вокруг оси винта с циклотронной частотой частицы.

Для начала рассмотрим поведение замагниченной частицы в такой вращающейся системе отсчета с частотой, совпадающей с циклотронной частотой самой частицы.

Пусть  $r_0$  – это расстояние между центром винта и центром ларморовской окружности (прицельный параметр),  $\rho$  – поперечный ларморовский радиус, причем  $\rho > r_0$ , так как при невыполнении этого условия электрон, очевидно, погибнет на стенке.

За период своего вращения частица не выходит из сектора с углом  $\varphi_0 = 2 \arcsin(r_0 / \rho)$



Теперь учтем, что в сечении винт представляет из себя сектор с углом  $\varphi_m$ , где  $\varphi_m$  рабочий угол винта.

На рис.1.2 изображено сечение винта. Серым закрашена область, находясь в которой частицы обязательно сталкиваются со стенкой. И только

частицы, имеющие начальную фазу вращения в секторе  $\Delta\varphi$  проходят сквозь винтовое отверстие.

$$\Delta\varphi = \varphi_m - 2 \arcsin\left(\frac{r_0}{\rho}\right).$$

Рис.1.2 Сечение винта

Доля всех частиц, с заданным  $r_0$  и  $\rho$ , проходящих через спираль длиной более

одного оборота равна  $\frac{\varphi_m - 2 \arcsin(r_0/\rho)}{2\pi}$ .

$$I = 2nev \int_0^{r_{\max}} r_0 dr_0 (\varphi_m - \arcsin(r_0/\rho))$$

Если  $0 < \varphi_m < \pi$ , тогда  $r_{\max} = \rho \sin(\varphi_m/2)$ , если же  $\varphi_m > \pi$ , то  $r_{\max} = \rho$

Интегрируя по  $r_0$  от 0 до  $\rho \sin(\varphi_m)$ , получаем:

$$\begin{cases} I = \frac{\rho^2 nev}{4} (\varphi_m - \sin(\varphi_m)) & 0 < \varphi_m < \pi \\ I = \frac{\rho^2 nev}{2} (\varphi_m - \pi/2) & \varphi_m > \pi \end{cases}$$

Усредняем по всем ларморам и получаем окончательный результат:

$$\begin{cases} I = \frac{\langle \rho^2 \rangle nev}{4} (\varphi_m - \sin(\varphi_m)) & 0 < \varphi_m < \pi \\ I = \frac{\langle \rho^2 \rangle nev}{2} (\varphi_m - \pi/2) & \varphi_m > \pi \end{cases} \quad (1)$$

Из этого выражения видно, что полный ток через винтовое отверстие прямо пропорционален среднему от квадрата ларморовского радиуса.

## Глава 2. Моделирование процесса прохождения электронов через винтообразное отверстие.

Для численного моделирования процесса прохождения замагниченных электронов через винтообразное отверстие была написана программа на языке программирования C++.

### 2.1 Моделирование прохождения для различных видов функций распределения электронов по углам.

В данной программе моделировалось движение вращающихся частиц между двумя стенками, вращающимися с другой частотой. При этом предполагались: равновероятное распределение по начальной фазе вращения частиц, равномерное распределение центров ларморовского вращения в плоскости падения на винт и заданная функция распределения частиц по поперечному ларморовскому радиусу, что аналогично заданному угловому распределению. Расчеты были проведены для различных видов функций распределения по поперечным ларморам: для функции распределения в виде ступеньки, т.е. являющейся постоянной на некотором интервале ларморовских радиусов, для гауссовой (формула) на некотором интервале и для функции Лоренца (формула) тоже на некотором интервале. Результаты расчетов в случае совпадения частот частиц и стенок приведены на рис.2.1.

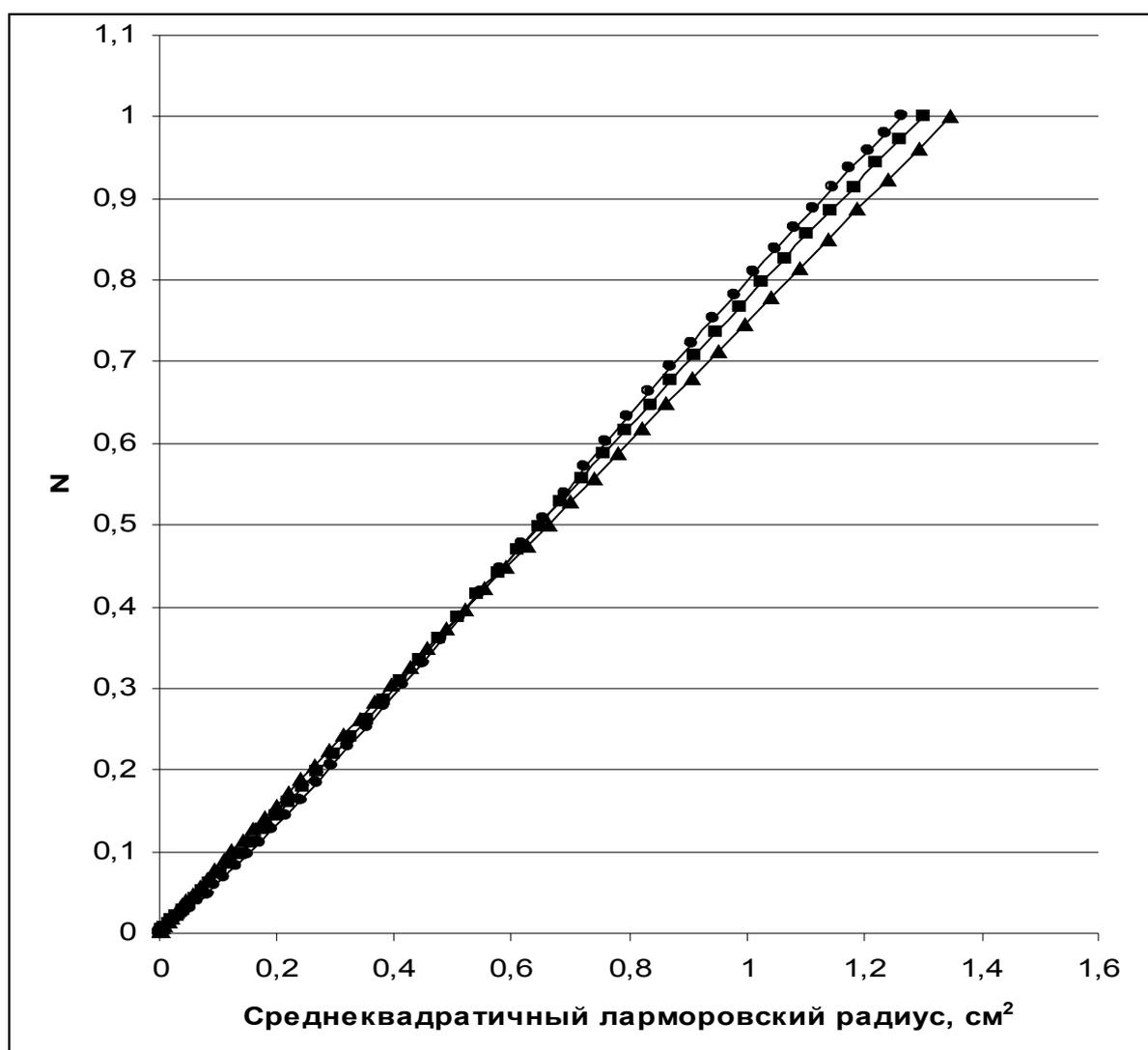


Рис.2.1 . Зависимость количества электронов  $N$ , прошедших через винтовое отверстие, измеренное в относительных единицах, от среднеквадратичного ларморовского радиуса.

Квадраты соответствуют функции Лоренца, круги – гауссовой функции, а треугольники – ступенчатой функции.

Из графика на рис.2.1 видно, что электронный ток, проходящий через винтовое отверстие пропорционален среднеквадратичному ларморовскому радиусу, что согласуется с теоретической зависимостью (1).

## 2.2 Моделирование прохождения в случае несовпадающих частот вращения частиц и стенок.

Рассмотрим вопрос о влиянии на результаты измерения датчиком на основе винта распределения электронов по энергиям. Это распределение естественным образом обуславливает распределение электронов по циклотронным частотам. Следовательно, есть электроны, которые не попадают в резонанс с винтом. На рис.2.2 приведена зависимость тока, прошедшего через винтовое отверстие, как функции относительной отстройки частоты вращения частицы по отношению к частоте стенок. Расчеты были проведены для различных рабочих углов винтового отверстия:  $150^\circ$ ,  $90^\circ$  и  $30^\circ$ .

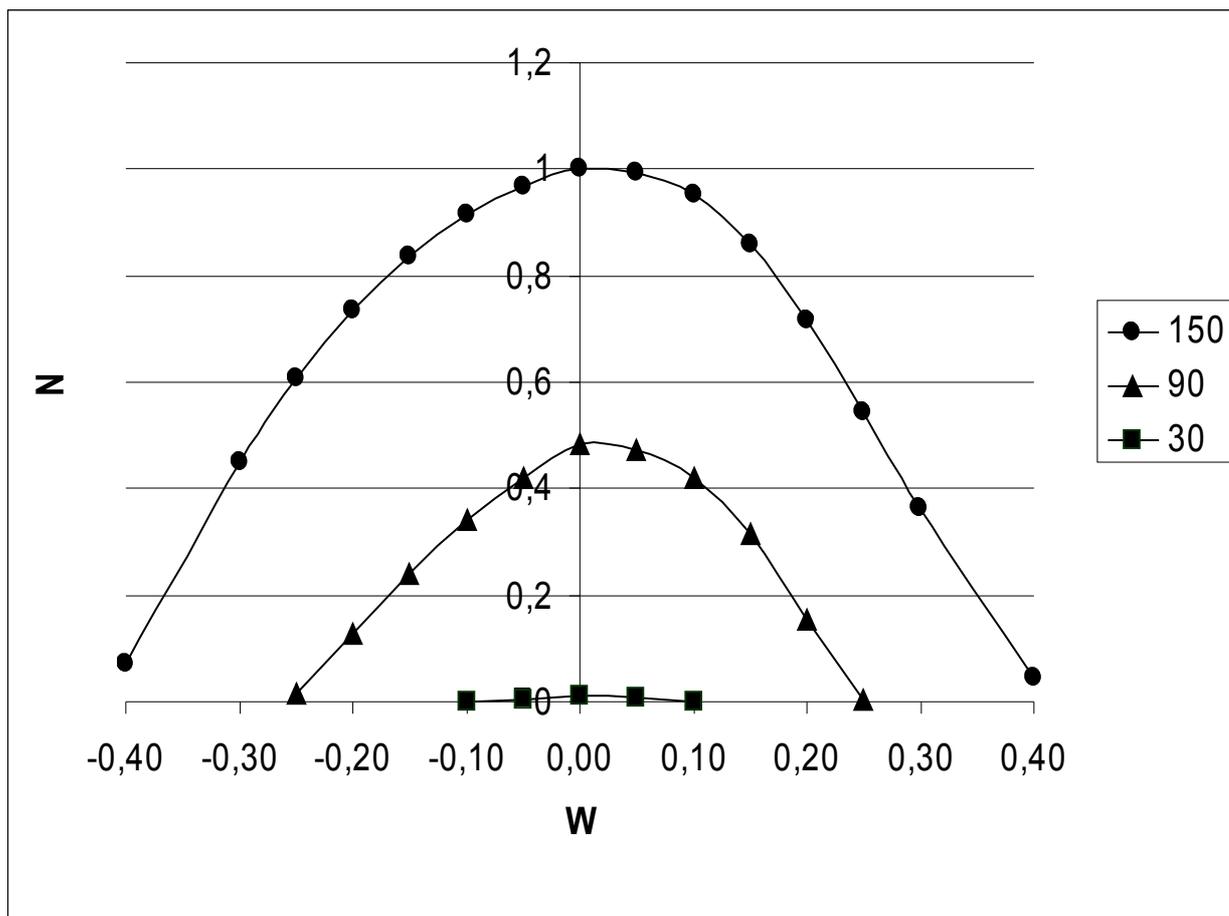


Рис.2.2. Зависимость количества электронов  $N$ , прошедших через винтовое отверстие, измеренного в относительных единицах, от относительной отстройки  $W$  частоты вращения винта от частоты вращения электронов при различных рабочих углах винта.

Из графиков на рис.2.2 видно, что подбирая рабочий угол и частоту вращения винта, можно определять среднеквадратичных разброс по скоростям для электронов в заданном узком энергетическом интервале.

## 2.2 Моделирование прохождения в случае несовпадающих частот вращения частиц и стенок при различных длинах винтообразных отверстий.

Рассмотрим предыдущую задачу для двух датчиков различной длины. Пусть длины датчиков отличаются в два раза (рис.2.3).

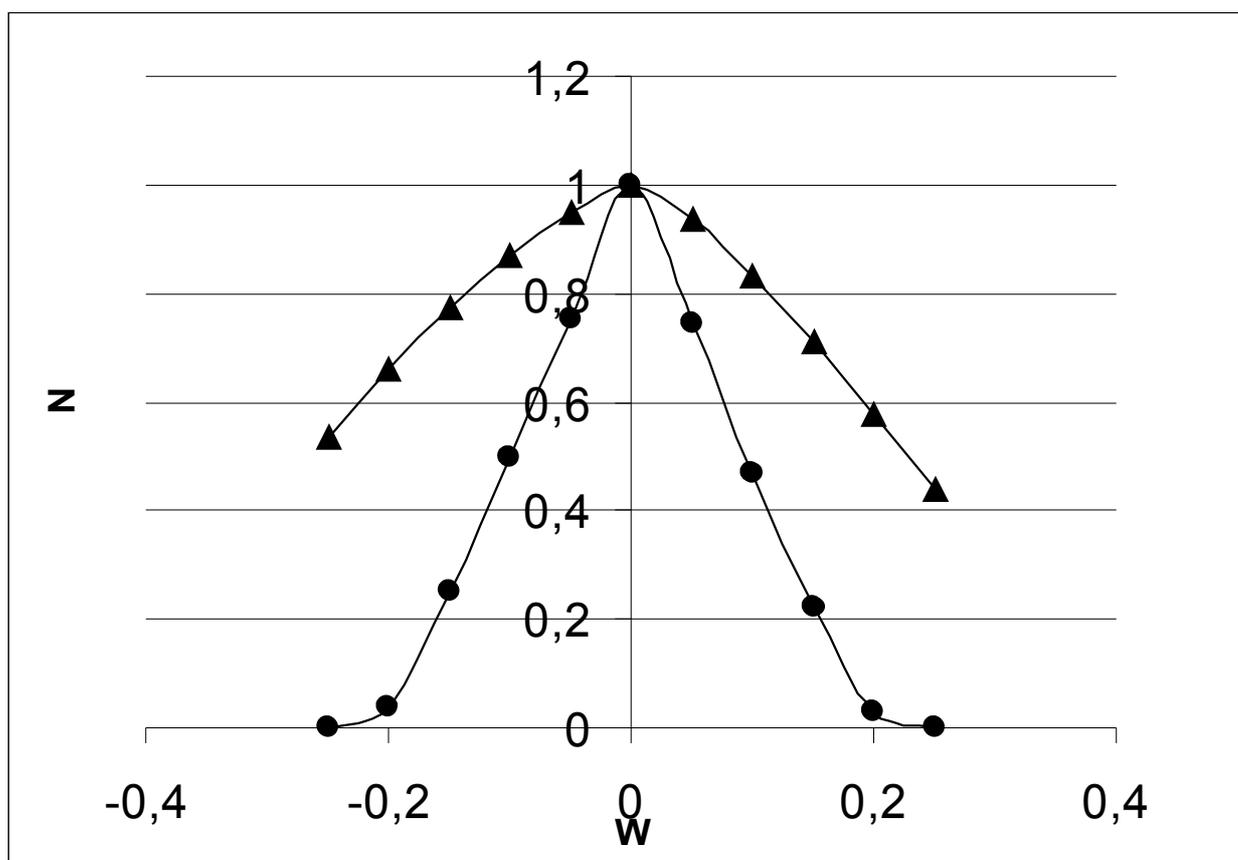


Рис.2.3 Зависимость количества электронов  $N$ , прошедших через винтовое отверстие, измеренного в относительных единицах, от относительной отстройки  $W$  частоты вращения винта от частоты вращения электронов при различных длинах датчика. Треугольники соответствуют датчику длиной в один шаг, круги – в два шага.

Из графиков на рис.2.3 видно, что датчик с большей длиной пропускает электроны в более узком диапазоне энергий.

## Глава 3. Конструкция датчика и условия эксперимента.

### 3.1 Описание установки ЭЛМИ.

Установка ЭЛМИ (рис.3.1) состоит из четырех основных частей: магнитно-изолированного ленточного диода, формирователя тонкого ленточного пучка, вакуумного щелевого канала с ондулятором и брэгговским резонатором и, наконец, системы диагностики генерируемого излучения, смонтированной в отдельной вакуумной камере.

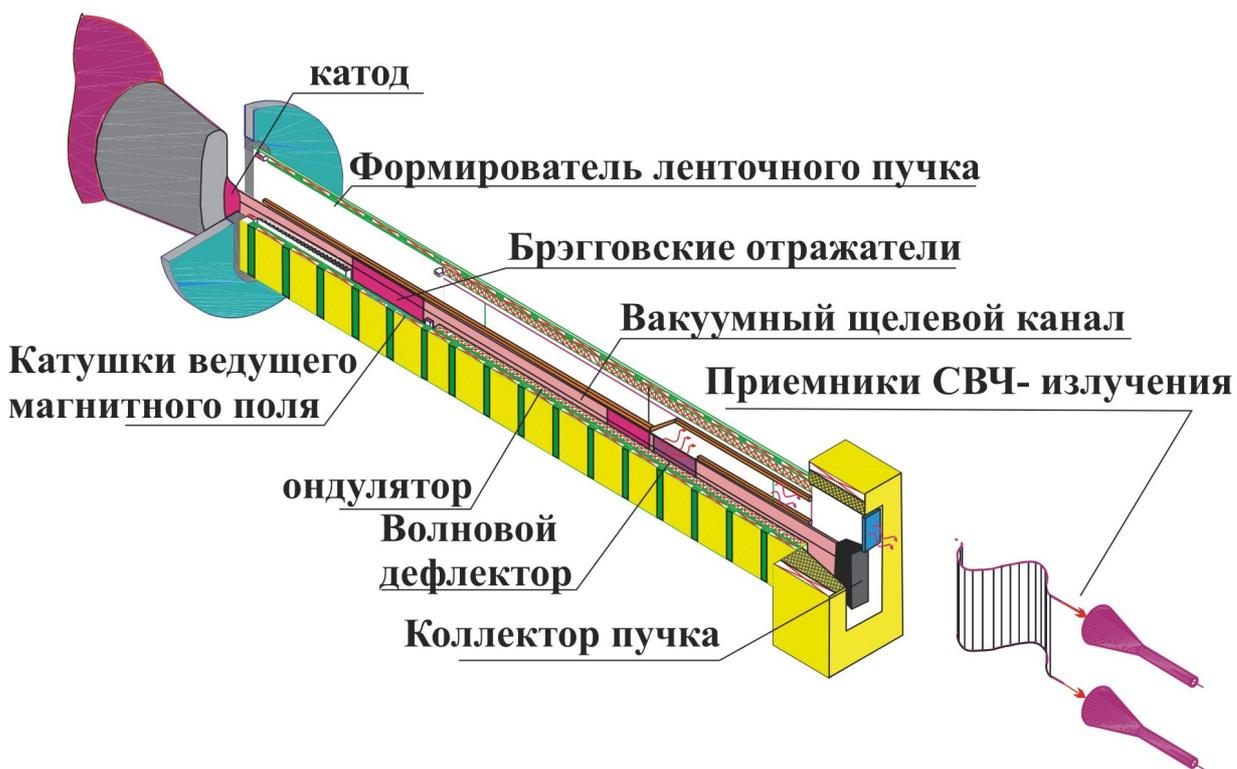


Рис.3.1 Установка ЭЛМИ.

Магнитно-изолированный ленточный диод состоит из сильно вытянутого в одном из направлений волокнистого графитового катода, к которому прикладывается импульс высокого ( $\sim 1\text{МВ}$ ) напряжения, и анодной плоскости со щелью. Через эту щель электроны пучка, эмитируемые катодом и ускоренные электрическим полем диода, попадают в формирователь. Сечение пучка на входе в него имеет вид ленты с размерами  $1 \times 20\text{см}$ . Формирователь пучка и следующий за ним ондулятор размещены в вакуумном канале с сечением  $4 \times 25\text{см}$ , поверх которого намотана обмотка, создающая однородное продольное поле величиной до  $14\text{кГс}$ .

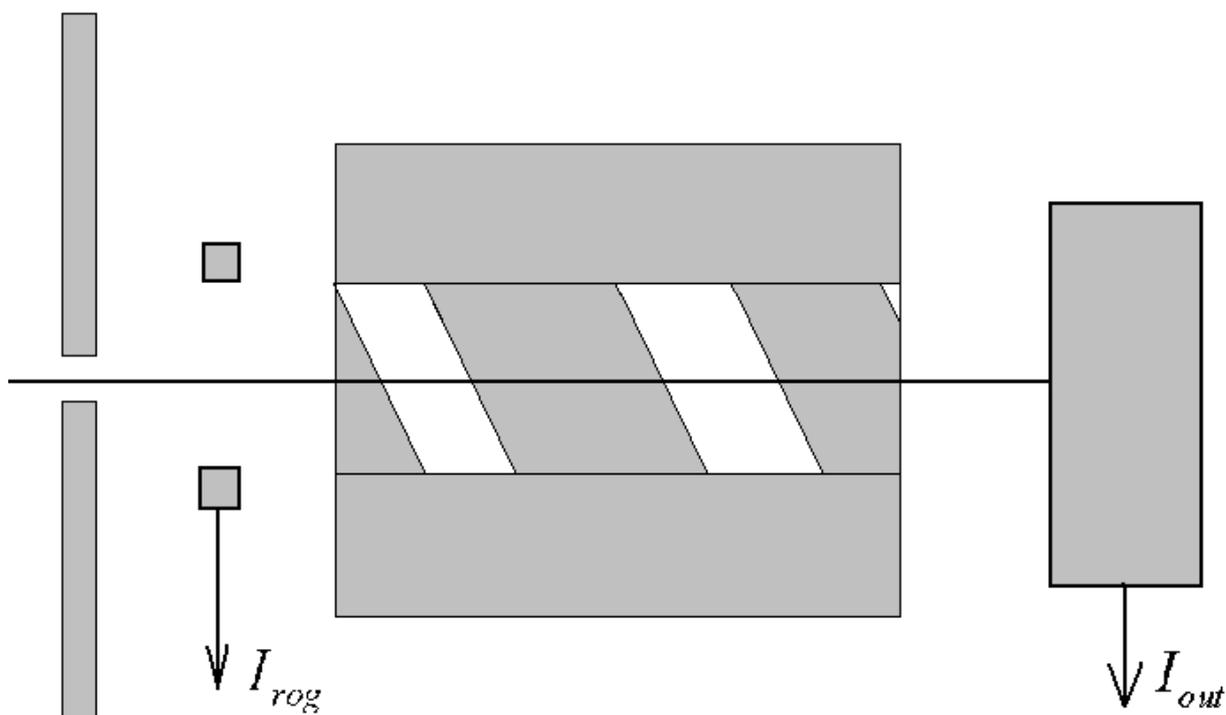
После прохождения формирователя пучок попадает в планарный медный резонатор, состоящий из двух брэгговских отражателей, соединенных отрезком гладкого волновода. Каждый из этих отражателей состоит из двух расположенных симметрично относительно центральной плоскости двумерных брэгговских решеток.

Для поглощения электронного пучка после его прохождения через щелевой канал, в конце канала установлена специальная секция с коллектором для пучка. В этой секции и предполагается установка датчика углового разброса.

### 3.2 Конструкция датчика.

Конструкция датчика предполагается следующей.

Графитовый блок, в котором имеется отверстие диаметром  $\sim 5$  мм. Внутри отверстия вставляется графитовый цилиндр, вставленный в металлический кожух, на котором имеется винтовая нарезка. Перед данным блоком устанавливается графитовая пластина с коллиматором диаметром  $\sim 2$  мм, а между коллиматором и блоком – пояс Роговского для регистрации входного тока. За графитовым блоком ставится датчик, который регистрирует ток прошедших электронов. Отношение токов пропорционально среднеквадратичному ларморовскому радиусу.



### 3.1 Погрешности измерений.

Перечислим некоторые эффекты, которые могут приводить к погрешностям:

- Неколлинеарность оси коллиматора и силовой линии магнитного поля;
- Изменение величины магнитного поля вдоль оси коллиматора;
- Образование плазмы на элементах датчика углового разброса.

Рассмотрим эти эффекты подробнее.

Несовпадение оси коллиматора и силовой линии магнитного поля  $B_0$  может происходить по нескольким причинам. Механическое крепление коллиматора

относительно оси вакуумной камеры осуществляется последовательным соединением нескольких фланцев. Реальная точность изготовления деталей позволяет уменьшить такой перекося до величины  $\leq 0,5^{\circ}$ . Возможна также некоторая деформация камеры при ее вакуумной откачке. Кроме того, возможно несовпадение осей магнитной и вакуумной систем.

Изменение величины продольного магнитного поля внутри коллиматора  $B_k$ , например, его уменьшение вдоль оси приводит к тому, что часть электронов попадают на стенку коллиматора, даже если они влетают в него под нулевым прицельным параметром. Это приводит к завышению измеряемого углового разброса.

Погрешности, связанные с электронами вторичной эмиссии, в данном методе отсутствуют. Так как, как видно из п.2.2, для того, чтобы вторично эмитированный электрон пролетел сквозь винт, его энергия должна быть близка к энергии выбившего его электрона. Вероятность же эмиссии высокоэнергетичного электрона очень мала.

Отраженные электроны так же не вносят свой вклад в регистрацию прошедшего тока. Это происходит из-за сложной геометрии датчика.

## **Заключение.**

В результате выполнения данной работы были получены следующие результаты:

- Предложен новый метод регистрации среднеквадратичного разброса скоростей электронов РЭП, в котором влияние вторично эмитированных и отраженных электронов ничтожно мало. Данный метод универсален для любой функции распределения по электронов по ларморовскому радиусу и не требует решения обратной задачи для нахождения среднеквадратичного ларморовского радиуса.
- Проведены аналитические расчеты, в результате которых получена зависимость тока прошедших электронов от среднеквадратичного ларморовского радиуса.
- Проведено моделирование на ЭВМ движения потока электронов в винтовом отверстии, результаты которого подтвердили аналитические расчеты, а также предложен метод нахождения среднеквадратичного ларморовского радиуса в узком энергетическом спектре электронов.

## **Список литературы.**

1. В.Д. Алексин, В.Г. Бочаров. Прохождение заряженных частиц в магнитном поле через отверстие. Диагностик плазмы. Сб. статей под ред. С.Ю. Лукьянова, вып.3, М., Атомииздат. 1973, стр.345.

2. А. В. Аржанников, В. С. Койдан, С. В. Логинов. Определение углового разброса замагниченного релятивистского электронного пучка по его прохождению через микроотверстия. ПТЭ, т.4, 1983, с.36-39.

3. A.V. Arzhannikov, V.B. Bobylev, V.S. Koidan et al. Construction, test of diagnostic and measurement of the angular distribution of electron beam at the ELDIS facility. Report of Forschungszentrum Karlsruhe, Germany, 1997.

4. A.V. Arzhannikov, V.B. Bobylev, V.S. Nikolaev et al. New Results of the Full Scale Ribbon Beam Experiments on U-2 Device. Proc. 10th Intern. Conf. On High Power Particle Beams, 1994, p.136-139.

5. Чикунов В.В. Эксперименты по исследованию характеристик мощного микросекундного РЭП для нагрева плазмы. Дис. на соиск. ученой степени канд. физ.-мат. наук, Новосибирск, 1988.