

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ» (НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ, НГУ)

Факультет **ФИЗИЧЕСКИЙ**

Кафедра Физики плазмы

Направление подготовки **03.04.02 ФИЗИКА**

Образовательная программа: **МАГИСТРАТУРА**

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА  
МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Никишина Алексея Викторовича

(Фамилия, Имя, Отчество автора)

Тема работы Измерение профиля плотности плазмы в установке ГОЛ-НВ с помощью  
многохордовой диагностики быстрых атомов

**«К защите допущена»**

Заведующий кафедрой

д.ф.-м.н.,

Зам. директора ИЯФ СО РАН по научной работе

Иванов А.А./.....  
(фамилия И., О.) / (подпись, МП)

«.....».....2018 г.

**Научный руководитель**

канд. физ.-мат. наук

с.н.с., ИЯФ, л.10

Иванов И.А./.....  
(фамилия И., О.) / (подпись, МП)

«.....».....2018 г.

Дата защиты: «.....».....2018 г.

Новосибирск, 2018

Оглавление	
Введение.....	3
1. Теория .....	7
1.1 Активная корпускулярная диагностика.....	7
1.2 Многохордовая диагностика.....	9
1.3 Эффективное сечение и коэффициент вторичной электронной эмиссии.....	11
1.4 Работа ВЭД.....	13
2. Описание эксперимента .....	15
2.1 Определение углового разброса пучка .....	17
2.2 Калибровка клапана.....	21
2.3 Моделирование вторично-эмиссионных датчиков .....	23
Заключение .....	26
Список литературы .....	27

## Введение

Одним из перспективных вариантов решения проблемы управляемого термоядерного синтеза является создание реактора на основе открытой многопробочной ловушки, предложенной Г. И. Будкером, В. В. Мирновым и Д.Д. Рютовым [1]. Идея метода заключается в создании соленоида с гофрированным магнитным полем, так что частицы захватываются множеством последовательно стоящих пробкotronов. В результате движение частиц плазмы приобретает диффузионный характер, а время удержания плазмы значительно возрастает. Эта идея была реализована в Институте ядерной физики имени Г. И. Будкера на установке ГОЛ-3 [2]. Установка ГОЛ-3 представляла собой многопробочную открытую ловушку длиной 12 м (основной соленоид) с пробочным отношением  $R = V_{\max}/V_{\min} = 4,8 T_{\text{л}}/3,2 T_{\text{л}} = 1,5$ . Нагрев плазмы осуществлялся с помощью релятивистского электронного пучка. На ней удалось получить плазму плотностью  $10^{18}$ - $10^{22}$  м<sup>-3</sup> и температурой до 2 кэВ. Время удержания плазмы составило до 1 мс. На ГОЛ-3 проводились исследования по многим направлениям, в том числе пучковый нагрев плотной плазмы, удержание ионной компоненты плазмы, продольные потери энергии за счёт электронной теплопроводности, стеночное удержание плотной плазмы, а также исследование воздействия плазменных и электронных потоков на твёрдые материалы. Благодаря ГОЛ-3 многопробочные ловушки стали рассматриваться как один из вариантов термоядерного реактора. Хотя наиболее близкие к реакторным параметры плазмы были получены на токамаках, у открытых ловушек отсутствует ограничение по давлению плазмы. Если давление плазмы становится сравнимо с давлением магнитного поля, ловушка переходит в режим «стеночного» удержания – вытолкнутое из плазмы магнитное поле будет концентрироваться у стенок камеры и всё равно продолжать удерживать плазму. Этот эффект позволяет удерживать плазму со значительно большей плотностью. Так, плотность плазмы в ГОЛ-3 примерно в 30 раз выше, чем в среднем на

токамаках. В настоящий момент не известно ни одной причины, которая принципиально ограничивала бы возможность увеличения основных термоядерных параметров (плотность, температура, время удержания) в многопробочных ловушках.

Установка ГОЛ-NB представляет собой один из этапов глубокой реконструкции установки ГОЛ-3. Задачей проектируемой установки ГОЛ-NB является проверка возможности удержания высокоэнергетических ионов с умеренной плотностью с помощью многопробочной конфигурации магнитного поля. Эта установка будет состоять из центральной ловушки, двух секций с многопробочным магнитным полем и баков концевых расширителей. Плазму в центральной ловушке планируется нагревать с помощью пучков нейтральных атомов, что отражено индексом NB в названии. На рис. 1 представлена конечная конфигурация установки ГОЛ- NB.

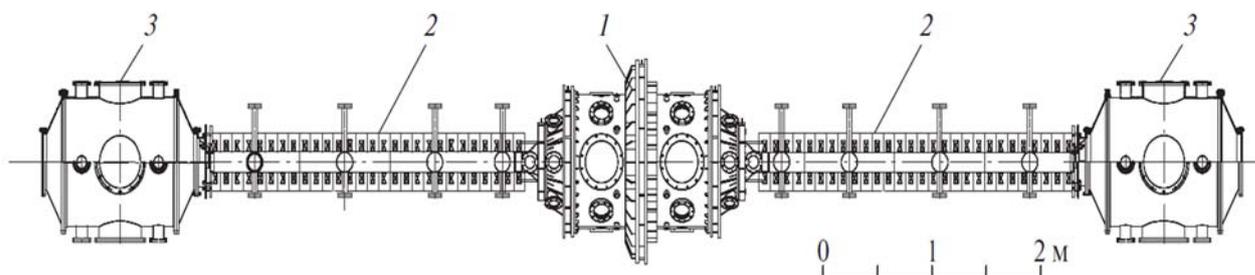


Рисунок 1 - Проект установки ГОЛ-NB. 1 – центральная ловушка, 2 – секции с многопробочным магнитным полем, 3 – баки концевых расширителей.

В настоящее время заканчивается сборка первой очереди установки ГОЛ-NB, схема которой представлена на рис.2.

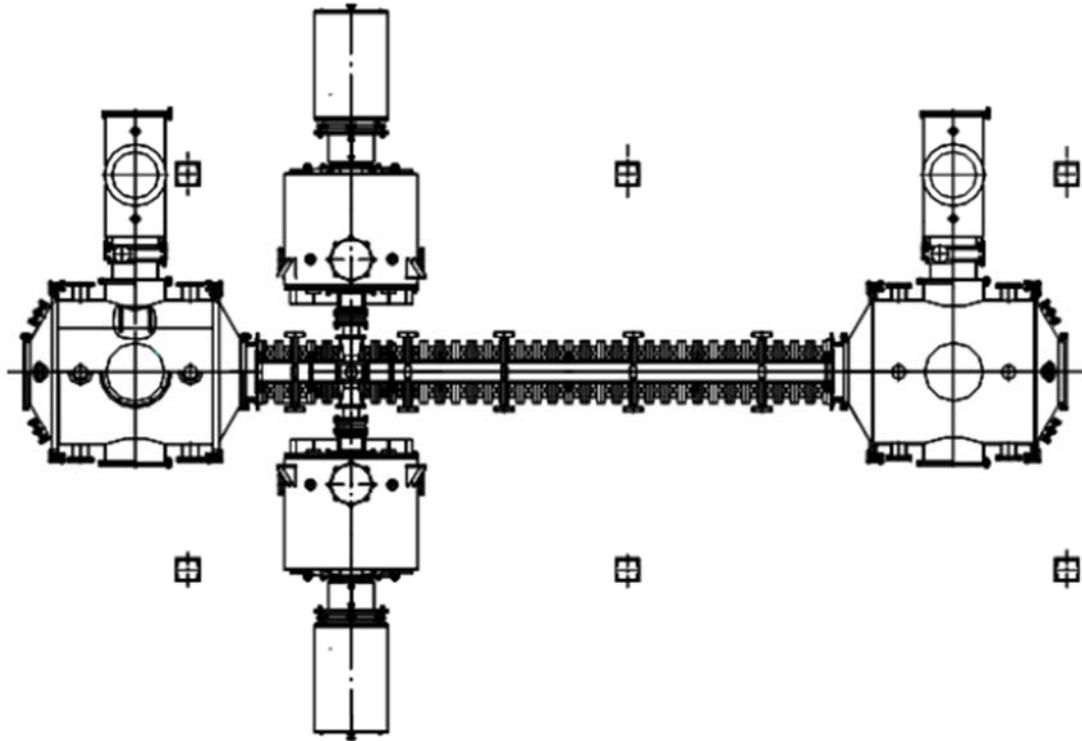


Рисунок 2 - Первая очередь установки ГОЛ-НВ (вид сверху).

Нейтральные пучки, которыми планируется нагревать плазму в ГОЛ-НВ, практически не взаимодействуют с неионизированным газом. Это означает, что плазму необходимо предварительно создать. Эта плазма - так называемая "мишенная" плазма - будет создаваться с помощью плазменной пушки, размещённой с торца установки, в одном из баков расширителей. Это влечёт за собой необходимость транспортировки плазмы сквозь многопробочную секцию в центральную ловушку. Целью первой очереди установки ГОЛ-НВ является изучение этого процесса [3], а также особенностей работы с новой улучшенной вакуумной камерой.

Целью данной работы было определить радиальный профиль плотности плазменной струи в установке ГОЛ-НВ с помощью диагностического инжектора нейтральных атомов. Для этого была определена максимальная разрешающая способность существовавшей диагностики на базе инжектора "Старт", вакуумная система инжектора была адаптирована для работы в условиях улучшенного вакуума, а также

была промоделирована и создана новая система регистрации нейтрального пучка способная работать с минимумом перекрёстных помех в магнитных полях до 1 кГс.

# 1. Теория

## 1.1 Активная корпускулярная диагностика

Активная корпускулярная диагностика основана на взаимодействии частиц пучка (ионов либо нейтральных атомов) с плазмой. Общая схема такой диагностики приведена на рис. 3

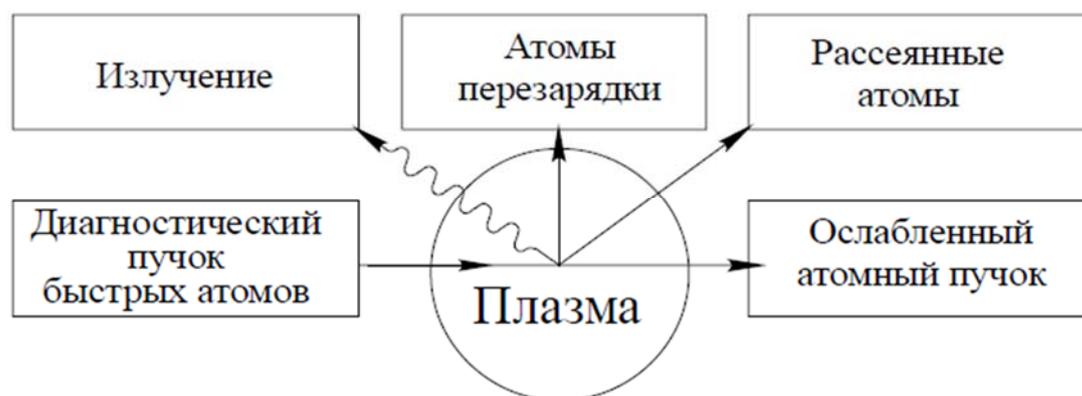


Рисунок 3 - Общая схема корпускулярной диагностики плазмы

Инжектированный пучок частиц при взаимодействии с плазмой ослабляется. Это происходит за счёт ионизации и рекомбинации атомов пучка, а также за счёт их рассеяния на частицах плазмы. Кроме этого возникает излучение, источником которого служат столкновения частиц пучка с ионами и электронами плазмы, а также излучение вторичных атомов перезарядки. Ослабление пучка напрямую связано с параметрами плазмы вдоль его траектории. Пучок можно направить в любую точку в плазме. Затем можно наблюдать результат его локального взаимодействия с исследуемой плазмой и, как следствие, получить информацию о её локальных параметрах.

Для измерения параметров внутренних слоёв плазменной струи необходимо обеспечить достаточное проникновение пучка в плазму. Другими словами, линейная плотность плазмы  $\tau = \int n dl$  не должна быть слишком велика. (Интеграл в приведённой выше формуле берётся по траектории пучка)

Основными процессами, за счёт которых происходит ослабление нейтрального пучка, являются ионизация его атомов при взаимодействии с ионами и электронами плазмы, их перезарядка на ионах плазмы, а также ионизация при взаимодействии с незаряженным газом, находящимся в камере - так называемая обдирка. Ослабление происходит по закону

$$\frac{dN_a}{dt} = -n_a n_e \langle \sigma_{ea} v_{ea} \rangle_{f_e} - n_a n_i \langle \sigma_{ia} v_{ia} \rangle_{f_i} - n_a n_{a1} \langle \sigma_{aa} v_{aa} \rangle_{f_a},$$

где  $\sigma_{ea}$  - сечение ионизации электронным ударом,  $\sigma_{ia}$  - сечение перезарядки,  $\sigma_{aa}$  - сечение обдирки,  $n_a$  и  $n_{a1}$  - плотности атомов пучка и газа в камере, а  $v_{ea}$ ,  $v_{ia}$  и  $v_{aa}$  - относительные скорости пучка и электронов, ионов и нейтральных атомов соответственно. Это ослабление можно переписать в виде

$$\frac{dN_a}{dl} = -\frac{n_a n_e}{v_b} \langle \sigma_{ea} v_{ea} \rangle_{f_e} - \frac{n_a n_i}{v_b} \langle \sigma_{ia} v_{ia} \rangle_{f_i} - \frac{n_a n_{a1}}{v_b} \langle \sigma_{aa} v_{aa} \rangle_{f_a},$$

где  $v_b$  - скорость атомов пучка.

Тогда ослабление тока пучка можно записать как

$$J = J_0 e^{-\int \frac{n_a n_e}{v_b} \sigma_{ea} v_{ea} dl} e^{-\int \frac{n_a n_i}{v_b} \sigma_{ia} v_{ia} dl} e^{-\int \frac{n_a n_{a1}}{v_b} \sigma_{aa} v_{aa} dl} \quad (1)$$

Нейтральный газ, на котором происходит обдирка, с хорошей точностью можно считать однородно распределённым по всему пространству вакуумной камеры. В этом случае третий экспоненциальный множитель можно обозначить в виде некоторой нормировочной константы А. Эту константу можно определить, измерив ослабление по крайним хордам, которые не проходят через плазму. Скорость атомов пучка очень велика по сравнению со скоростями ионов плазмы и атомов газа в камере. Следовательно, после усреднения по относительным скоростям для ионов и атомов получится, что  $v_{ea} \approx v_b$ . С учётом этого, а также равенства плотностей ионов и электронов можно получить выражение для линейной плотности

$$\ln \frac{J}{AJ_0} = - \int n_a n \sigma_{эфф} dl - \int n_a n \sigma_{ia} dl \quad (2)$$

## 1.2 Многохордовая диагностика

Измерение ослабления пучка быстрых нейтральных атомов позволяет вычислить значение линейной плотности плазмы, при условии, что известно эффективное сечение ослабления. В случае отличия массы атомов пучка от массы ионов плазмы этот метод позволяет использовать пучки умеренной интенсивности, однако требует при этом оборудования для анализа массы частиц. В случае, если плотность тока пучка достаточно велика и значительно превышает фоновый поток нейтральных атомов, диагностика не требует сложной аппаратуры.

В экспериментах на аппаратуре диагностики всегда присутствует фоновый сигнал, создаваемый потоком нейтральных атомов перезарядки и ультрафиолета из плазмы. Этот поток имеет некоторую характерную величину и является в какой-то степени постоянным. На этом фоне модулированный нейтральный пучок с длительностью масштаба сотен микросекунд и достаточно большой энергией виден очень хорошо.

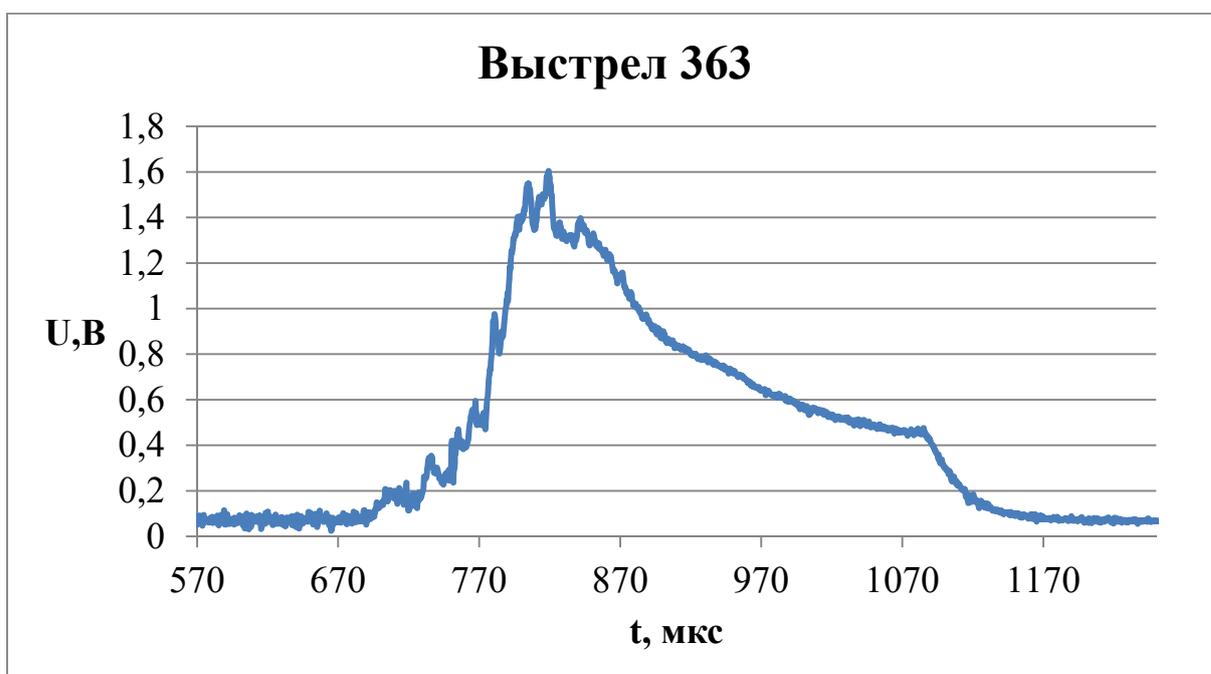


Рисунок 4 - Пример сигнала с одного из датчиков системы регистрации диагностического пучка нейтральных атомов.

Измерения линейной плотности плазмы вдоль различных хорд позволяют при некоторых условиях получить также и локальную плотность плазмы. В идеале для этого необходимо знать линейную плотность плазмы как функцию от радиуса. Её можно получить с помощью проведения измерений по нескольким хордам и последующим восстановлением радиальной зависимости плотности. Принципиальная схема такой диагностики представлена на рис. 5

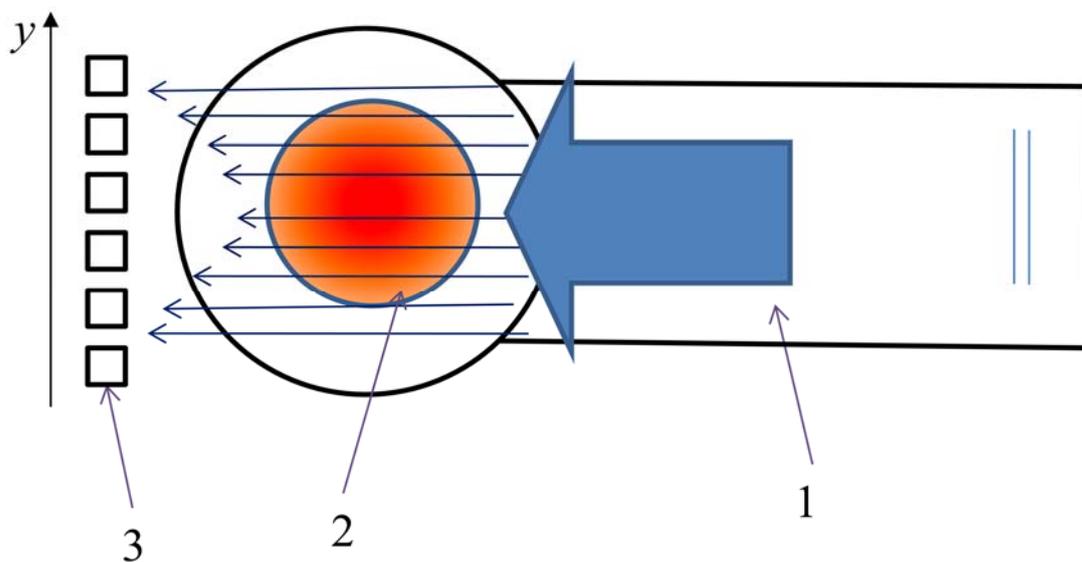


Рисунок 5 - Принципиальная схема многохордовой диагностики плазмы. 1 - диагностический пучок быстрых нейтральных атомов, 2 - плазма, 3 - система датчиков, регистрирующих ослабление пучка.

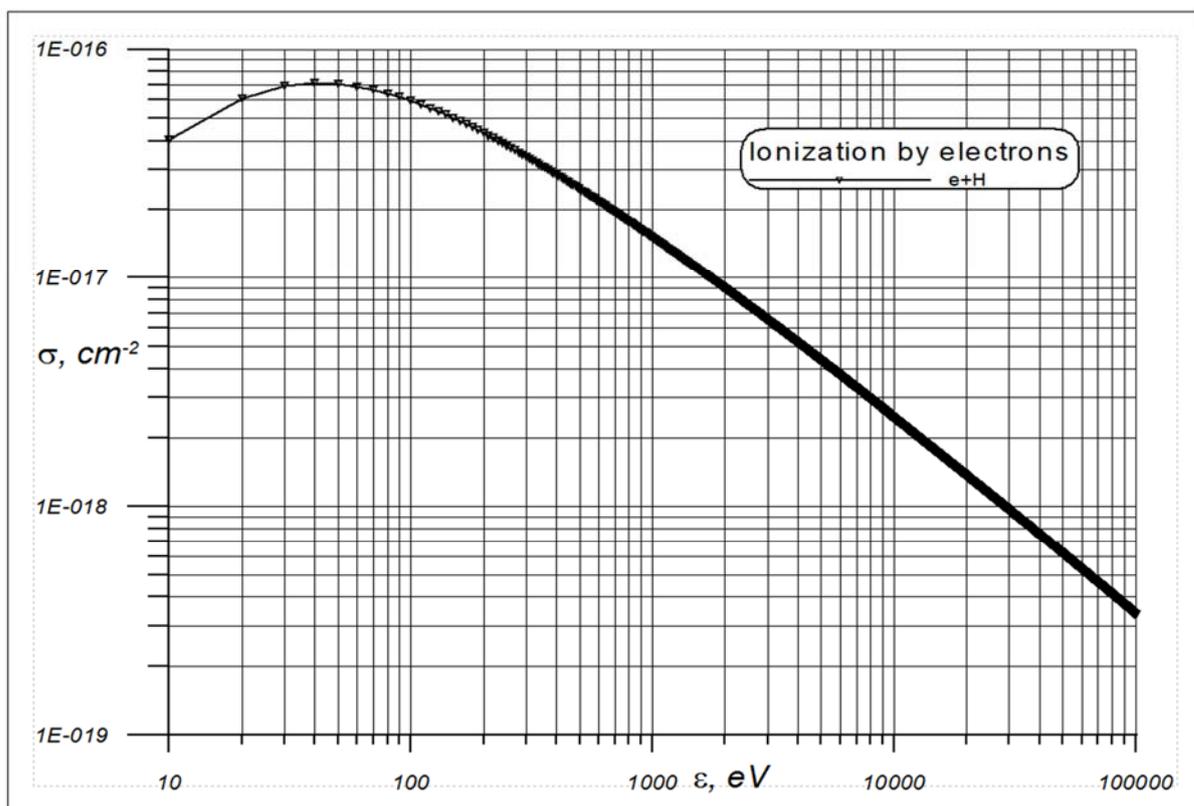
Как указано в работе [ 4 ], наиболее простым случаем является аксиально-симметричная плазма, плотность которой зависит только от радиуса. Тогда измерения достаточно проводить лишь с одного ракурса по нескольким параллельным хордам. Если хорда расположена на расстоянии  $y$  от начала координат, линейную плотность можно записать так:  $\tau = \int_{-\sqrt{a^2-y^2}}^{\sqrt{a^2-y^2}} n\sqrt{x^2 + y^2} dx$ . После соответствующей замены переменных интеграл принимает вид  $\tau(y) = 2 \int_y^a n(r) \frac{r}{\sqrt{r^2-y^2}} dr$ , где  $a$  - радиус плазмы, на котором плотность плазмы становится равной нулю. Это интегральное

уравнение Абеля, формальное решение которого имеет вид  $n(r) = -\frac{1}{\pi} \int_r^a \frac{\tau'(y) dy}{\sqrt{y^2 - r^2}}$ .

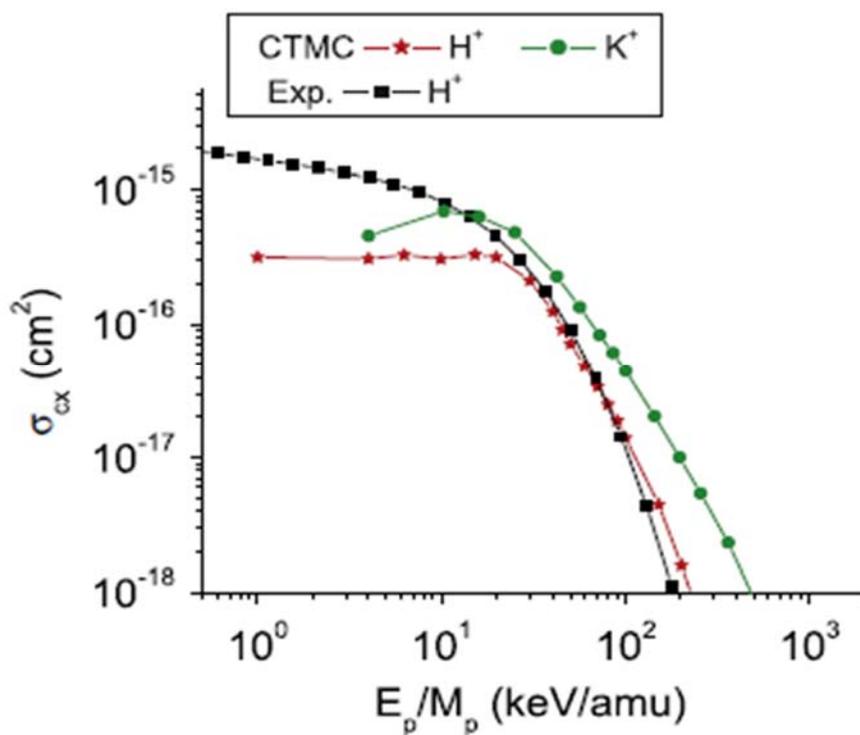
Получившееся уравнение Абеля является так называемой "некорректной обратной задачей". На практике это означает, что ошибки в определении линейной плотности как функции прицельного параметра приводят к существенно большим ошибкам в восстановленном профиле плотности. Этого можно частично избежать, если аппроксимировать профиль плотности гладкой функцией с конечным числом параметров, меньшим, чем число диагностических хорд. Например, параболической либо экспоненциальной зависимостью  $n(r) \approx n_0 e^{-r^2/a^2}$ . Тогда по результатам хордовых измерений достаточно определить параметры  $n_0$  и  $a$ . Преимуществом данного подхода является устойчивость по отношению к измерительным ошибкам, а также изначальная физическая корректность результата, то есть плотность всегда будет положительной и плавно изменяющейся в зависимости от радиуса. При этом предполагается, что на оси установки плотность плазмы максимальна. В противном случае можно выбрать модифицированный профиль со смещённым по радиусу максимумом.

### **1.3 Эффективное сечение и коэффициент вторичной электронной эмиссии**

Для получения эффективного сечения взаимодействия пучка нейтральных атомов с плазмой необходимо знать сечения всех процессов, в ходе которых атомы могут взаимодействовать с электронами и ионами плазмы, а также с газом в вакуумной камере. Основных процессов три: это ионизация электронным ударом, перезарядка, а также обдирка - ионизация при взаимодействии с нейтральными атомами и молекулами газа. Сечения ионизации и перезарядки известны, и были взяты из работы [5] и базы данных NIST.



а



б

Рисунок 6. а - сечения ионизации электронным ударом, б - сечения перезарядки.

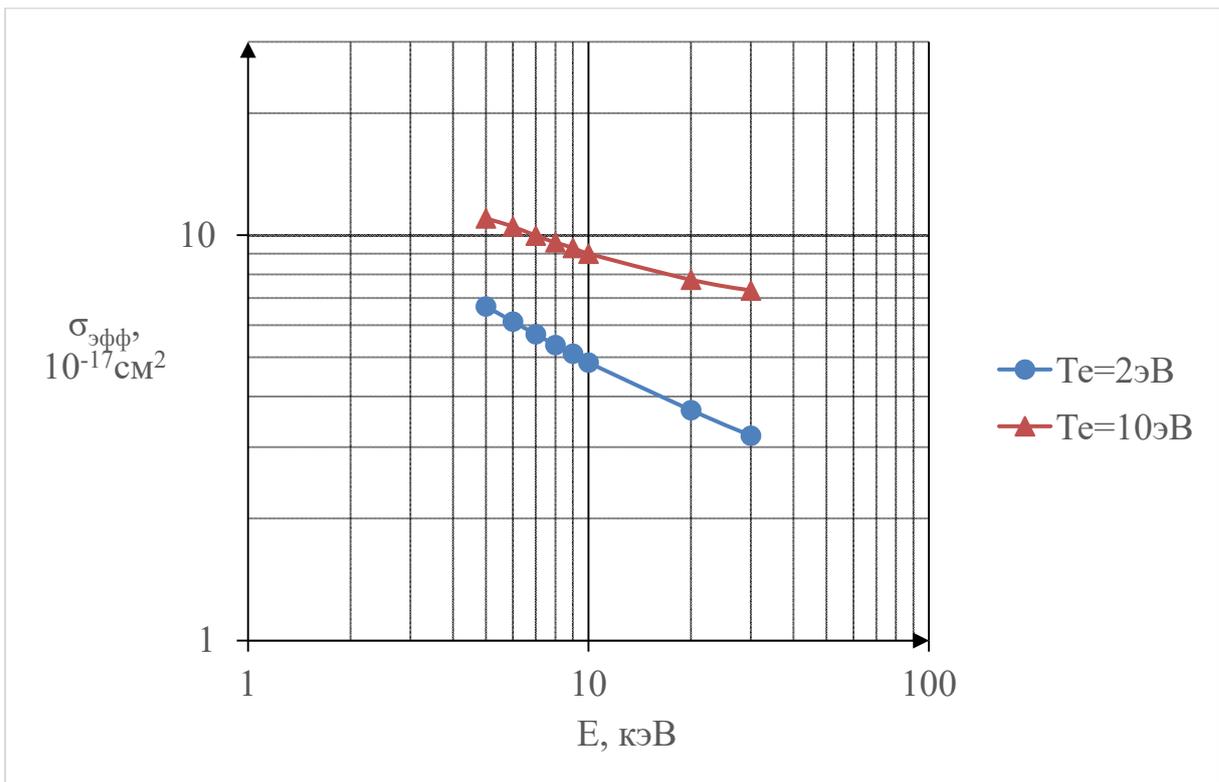


Рисунок 7 – Эффективное сечение ионизации атомов водорода электронным ударом в диапазоне от 5 до 30 кэВ. По горизонтальной оси отложена энергия атомов. Круглые маркеры соответствуют температуре электронов 2 эВ, треугольные - 10 эВ.

Из рис. 7 и 6б видно, что в нужном диапазоне энергий эффективное сечение ионизации водорода электронным ударом на порядок меньше, чем сечение перезарядки. Из этого следует, что вклад первого интеграла в формуле (2) в итоговый результат составляет менее 10%. Это верно для температуры электронов до 10 эВ, то есть для мишенной плазмы. С ростом температуры плазмы эффективное сечение будет возрастать, и, как следствие, будет возрастать доля первого интеграла в итоговом ответе.

#### 1.4 Работа ВЭД

Для диагностики нейтрального пучка используется система вторично-эмиссионных датчиков. Идея их работы заключается в следующем. Когда нейтральный атом, летящий с некоторой скоростью, попадает на такой датчик, он выбивает электрон. Для облегчения эмиссии датчик находится под некоторым (около 100В) отрицательным потенциалом. Электрон

начинает движение в электрическом поле и попадает на экран. Таким образом возникает ток, который можно измерить. Этот ток пропорционален интенсивности пучка нейтральных атомов, а также их энергии. Принципиальная схема диагностики показана на рис. 8.

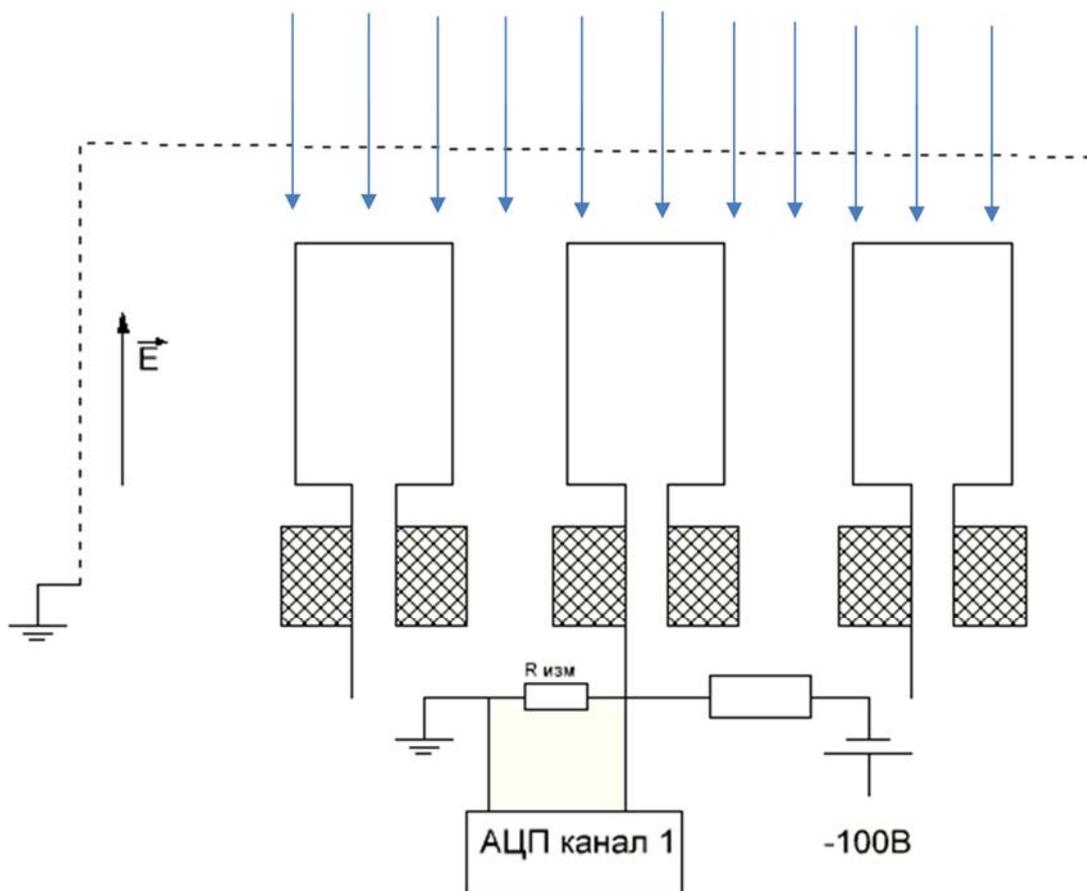


Рисунок 8 - Принципиальная схема диагностики нейтрального пучка с помощью вторично-эмиссионных датчиков. Стрелками показано направление движения частиц пучка.

Зависимость от энергии отражается в виде коэффициента вторичной электронной эмиссии. В работе [6] показано, что с ростом энергии отличие коэффициента вторичной электронной эмиссии для нейтральных атомов и для ионов того же химического элемента уменьшается, и уже при энергии более 5 кэВ не превышает 25%. В нашей работе используются пучки с энергиями от 5 до 30 кэВ, был использован коэффициент ионно-электронной эмиссии для водорода.

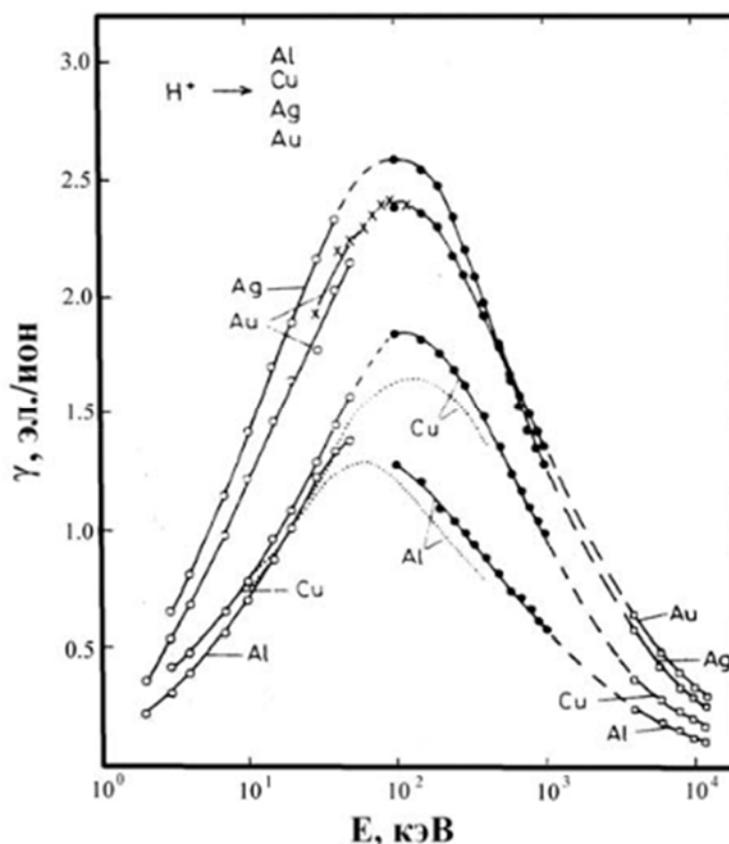


Рисунок 9 - Коэффициент вторичной ионно-электронной эмиссии для различных металлов при взаимодействии с ионами водорода[7<sup>7</sup>]

## 2. Описание эксперимента

В основе данной работы лежит старая многохордовая диагностика, успешно работавшая на установке ГОЛ-3 и нулевой очереди установки ГОЛ-NB[ 8 ]. Для использования на ГОЛ-NB эту диагностику было необходимо модернизировать.

Сама диагностика состоит из двух основных узлов: инжектора пучка нейтральных атомов и системы диагностики тока прошедших атомов. Инжектор нейтральных атомов, в свою очередь, состоит из ионного источника и перезарядной мишени. Все компоненты вакуумной системы диагностики были сильно загрязнены углеродом и требовали тщательной очистки или замены. В силу этого потребовалась установка новой

перезарядной мишени, а также новой усовершенствованной системы вторично-эмиссионных датчиков.

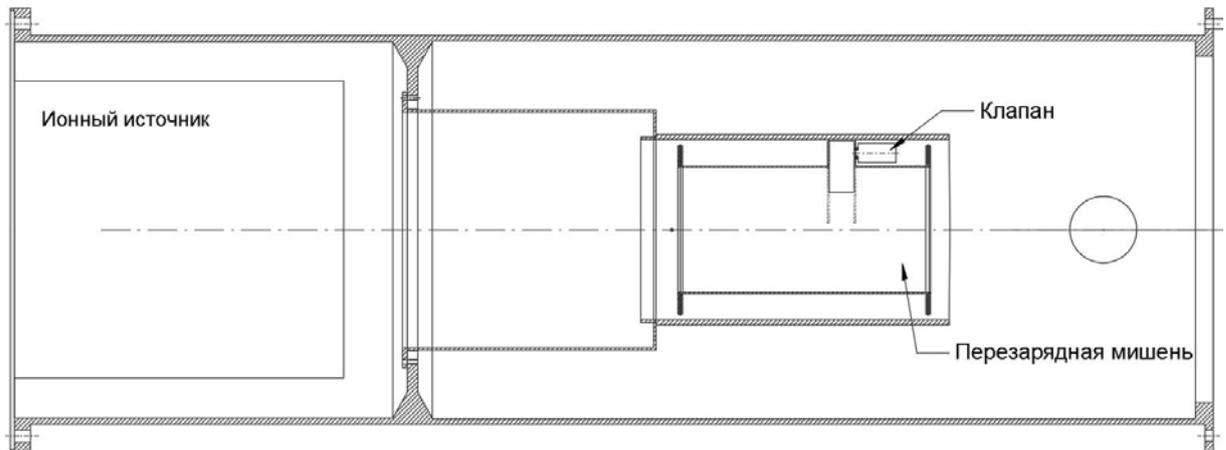


Рисунок 10 - Схема диагностического инжектора нейтральных атомов

Первоочередной задачей работы было определить максимальную разрешающую способность существовавшей диагностики. Разрешающая способность диагностики определяется собственным угловым разбросом пучка, а также параметрами системы регистрации. И если параметры системы регистрации известны, то угловой разброс пучка на момент выполнения работы был неизвестен. Её необходимо было узнать для того, чтобы определить, можно ли использовать для диагностики данный инжектор, или же необходимо искать другой.

Следующим этапом работы была калибровка клапана системы газонапуска перезарядной мишени. Диагностический инжектор нейтральных атомов в простейшем случае состоит из двух основных узлов: ионного источника и перезарядной мишени. Перезарядная мишень представляет собой трубу, диаметр которой больше, чем диаметр ионного пучка. В трубу врезана небольшая камера, к которой присоединён газовый клапан. Перед самым выстрелом клапан открывается и напускает в мишень нейтральный газ, на котором перезаряжаются ионы, вылетевшие из источника. Таким образом получается пучок нейтральных атомов. Ключевой характеристикой клапана является время открытия. Оно должно

быть достаточно мало, чтобы обеспечить необходимое быстродействие системы.

После этого необходимо было разработать новую систему диагностики прошедших быстрых нейтральных атомов. Главной особенностью новой системы должна была стать способность работать в достаточно больших магнитных полях с минимумом перекрёстных помех. Для этого было промоделировано движение вторично-эмиссионных электронов в электрическом и магнитном полях в условиях, достаточно близких к условиям на установке.

## **2.1 Определение углового разброса пучка**

Для определения углового разброса пучка между инжектором и системой регистрации была помещена диафрагма с щелью шириной 1 мм. Схема эксперимента представлена на рис. 10. Диафрагма была расположена так, что изначально щель находилась на уровне центра вакуумной камеры. Затем была проведена серия экспериментов, в ходе которой щель смещалась по радиусу вдоль вертикальной оси  $y$ .

Был получен набор сигналов с нескольких датчиков. На рис. 12а каждой точке на графике соответствует максимальное значение сигнала с конкретного датчика в определённом эксперименте. Затем эти сигналы были сдвинуты так, чтобы получить общую картину, представленную на рис. 12б.

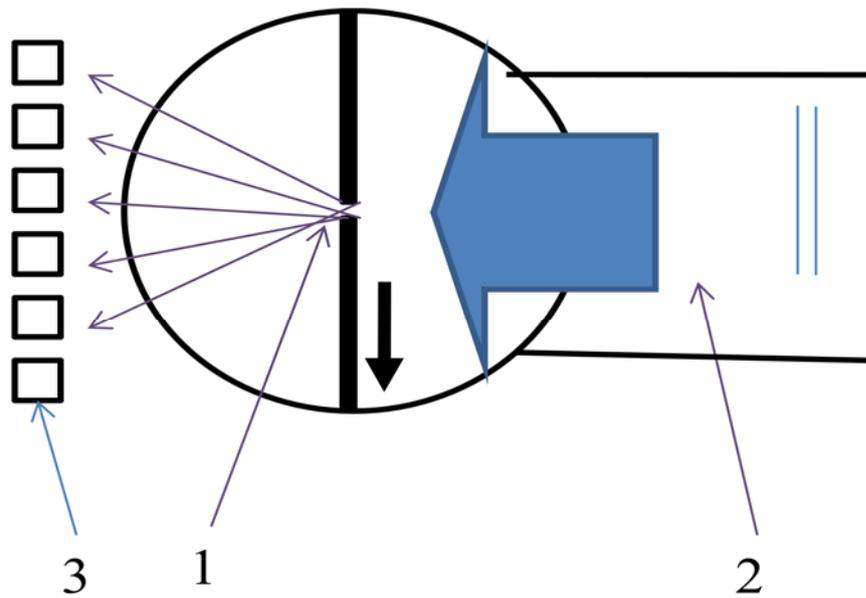
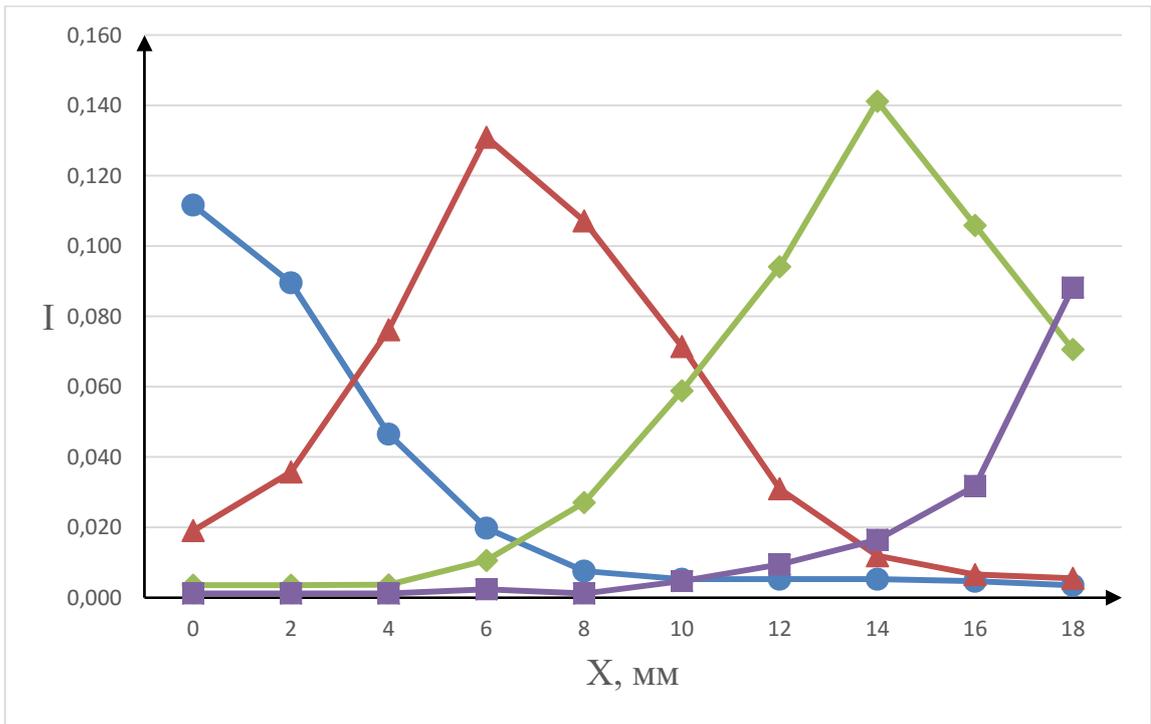
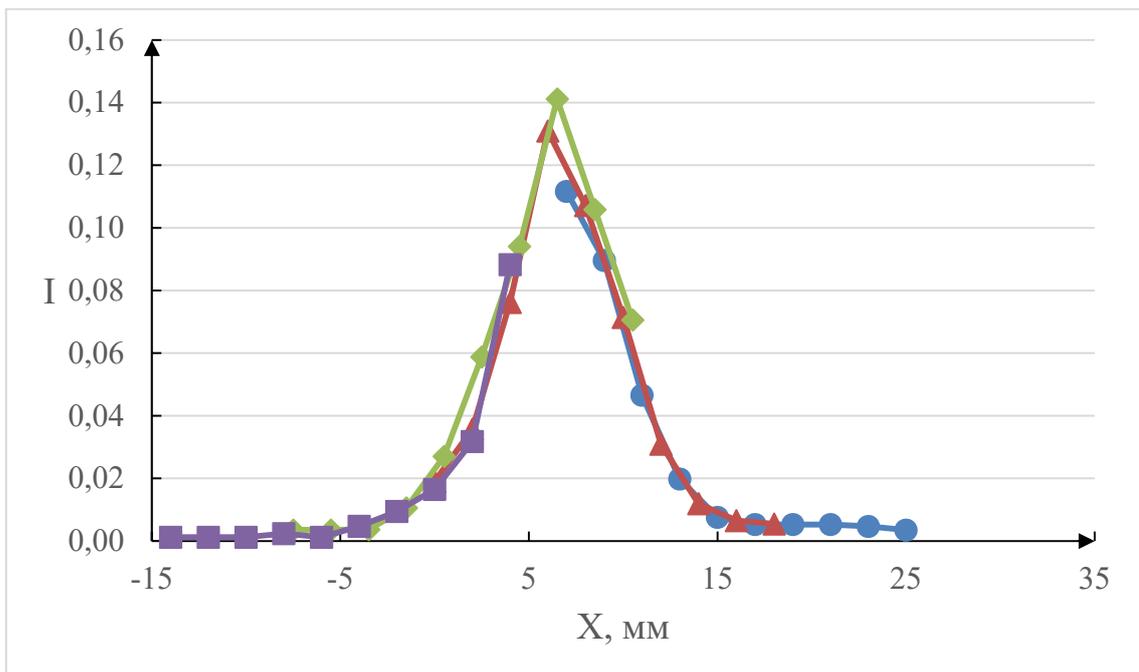


Рисунок 11 - Схема проведения эксперимента по определению углового разброса пучка. 1 - диафрагма с щелью, 2 - диагностический инжектор, 3 - система регистрации пучка. Стрелка вниз показывает направление движения диафрагмы в ходе экспериментов.



а



б

Рисунок 12 - Результаты эксперимента по определению углового разброса.

По горизонтали отложено расстояние от центра камеры, по вертикали - интенсивность. Сигналу с каждого датчика соответствует свой тип маркера. а - необработанные результаты, б - сигналы сдвинуты для получения общей картины.

Затем полученные данные были интерполированы функцией Гаусса. Необходимо учитывать, что полученный сигнал на самом деле не показывает картину углового разброса пучка. Так как пучок, имеющий гауссов угловой разброс, сканируется с помощью нескольких прямоугольных датчиков сопоставимого с величиной разброса размера, полученный сигнал на самом деле представляет собой свёртку гаусса и прямоугольника. Измерив ширину полученного сигнала на полувысоте и зная ширину прямоугольника, равную 4 мм, была получена предельная разрешающая способность диагностики. Она равна 6,6 мм, что соответствует угловому разбросу 18 мрад.

Рисунок 13 - Интерполяция результатов функцией Гаусса. Дисперсия равна 10,4 мм, ширина на полувысоте - 7,7 мм.

## 2.2 Калибровка клапана

Затвор клапана представляет собой подпружиненный сердечник катушки индуктивности. Когда по катушке протекает ток, сердечник втягивается в неё, и происходит открытие клапана. С учётом этого была собрана схема для калибровки, изображённая на рис. 14. Её главными элементами являются 2 клапана, один из которых подвергается калибровке, а сердечник другого зафиксирован в открытом положении. На схеме клапаны обозначены как индуктивности.

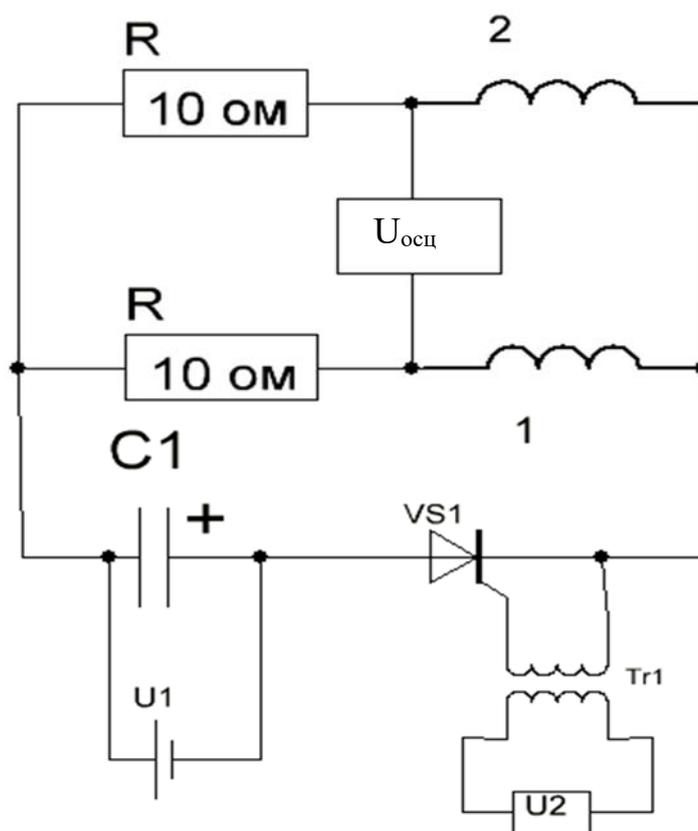


Рисунок 14 - Схема эксперимента по определению скорости открывания клапана. Клапаны обозначены как индуктивности. 2 – калибруемый клапан, 1- точно такой же клапан, зафиксированный в открытом положении,  $U_{осц}$  - напряжение, измеряемое с помощью осциллографа

Когда на клапан подаётся напряжение, он начинает открываться. В этот момент начинает изменяться индуктивность системы и появляется

сигнал на осциллографе. Тот момент, когда сердечник достигает крайнего положения и ударяется о стенку, на осциллограмме виден как излом. Время от начала изменения сигнала до излома и будет являться временем полного открытия клапана. На рис. 15 представлен результат измерения для напряжения 199 В.

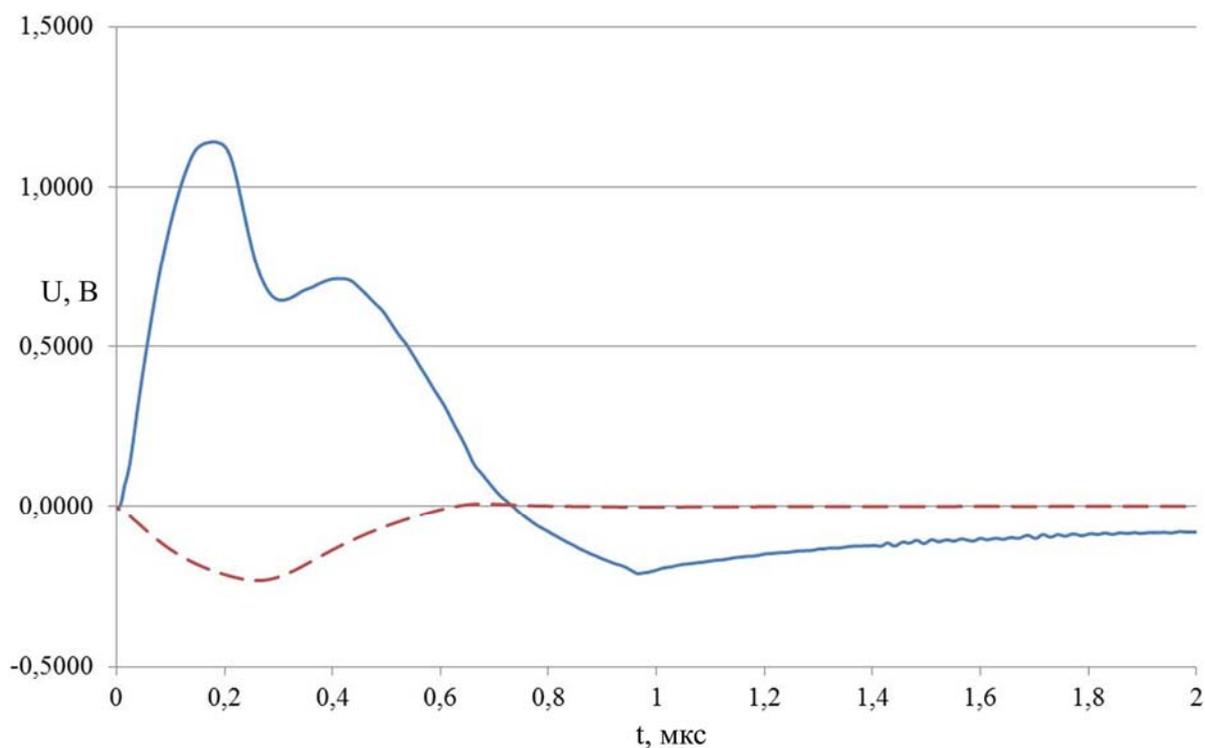


Рисунок 15 – Определение времени открытия клапана при напряжении  $U = 199$  В. Сплошная линия соответствует измеряемому напряжению, штриховая – току через клапан. Момент открытия клапана виден на графике напряжения как излом.

### **2.3 Моделирование вторично-эмиссионных датчиков**

Если вся система вторично-эмиссионных датчиков находится во внешнем магнитном поле, её работа может исказиться. Как известно, в скрещенных ортогональных электрическом и магнитном полях электрон начинает дрейфовать перпендикулярно полям. В случае, если магнитное поле направлено параллельно поверхности датчика и достаточно сильно, электрон может вместо экрана попасть на соседний датчик. Это вызывает перекрёстные помехи, или, иначе, "кросстолкинг". Существует несколько способов борьбы с этим явлением.

Во-первых, можно уменьшить магнитное поле. Это можно сделать, увеличив расстояние от источника магнитного поля до системы диагностики, или же поставив магнитную изоляцию. Однако увеличение расстояния отрицательно скажется на разрешающей способности диагностики, а магнитная изоляция может внести помехи в работу установки.

Альтернативный способ - сделать так, чтобы электрическое и магнитное поля были не ортогональны. Это позволит направить дрейф его в сторону от соседних датчиков. В данной работе предложен вторично-эмиссионный датчик особой формы, задача которой - направить дрейф электрона не параллельно поверхности датчика, а частично под некоторым углом к ней. На рис. 16 представлен общий вид такого датчика.

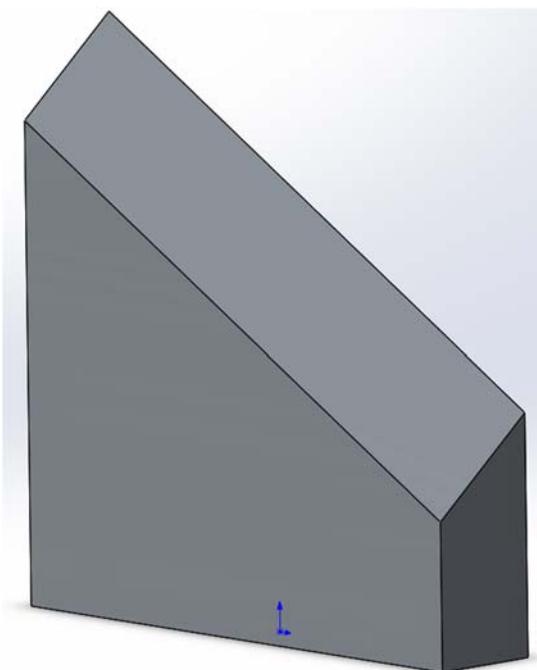


Рисунок 16 - Общий вид вторично-эмиссионного датчика.

Было проведено моделирование движения электронов с поверхности такого датчика на экран. Моделирование выполнялось в программе Comsol Multiphysics. На рис. 17 и 18 представлены сравнительные результаты моделирования движения вторично-эмиссионных электронов с поверхности датчика на экран для прямоугольных электродов и для предлагаемых датчиков сложной формы в различных полях.

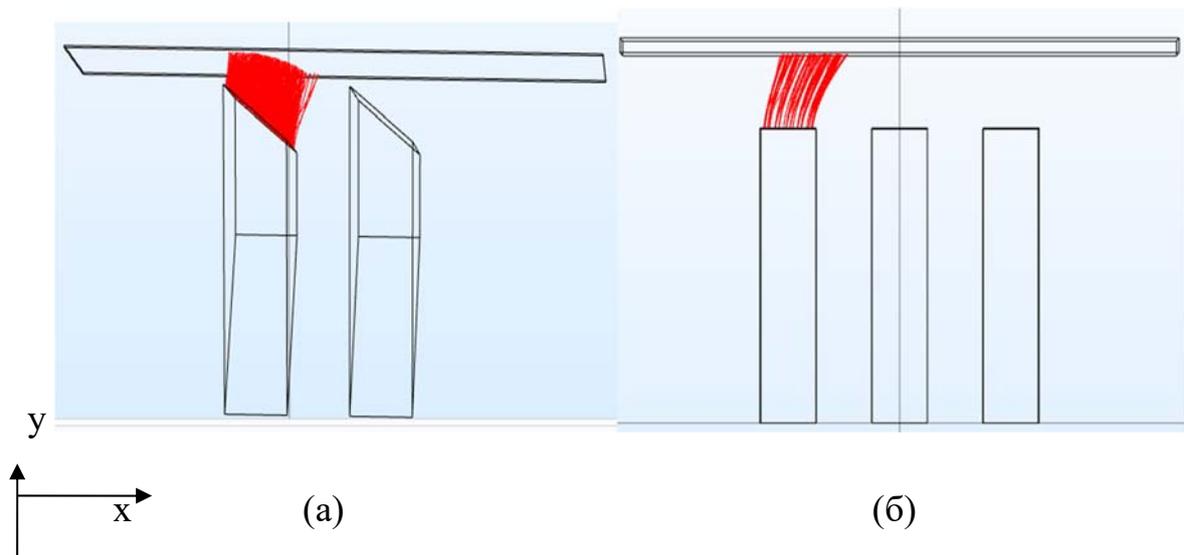


Рисунок 17 - Результаты моделирования движения вторично-эмиссионных электронов в поле  $B = 0,04\text{Тл}$ . а - новый датчик,  $B_y=0,035\text{Тл}$ ,  $B_z= 0,02\text{Тл}$ ; б - плоский датчик,  $B_z=0,04\text{Тл}$ .

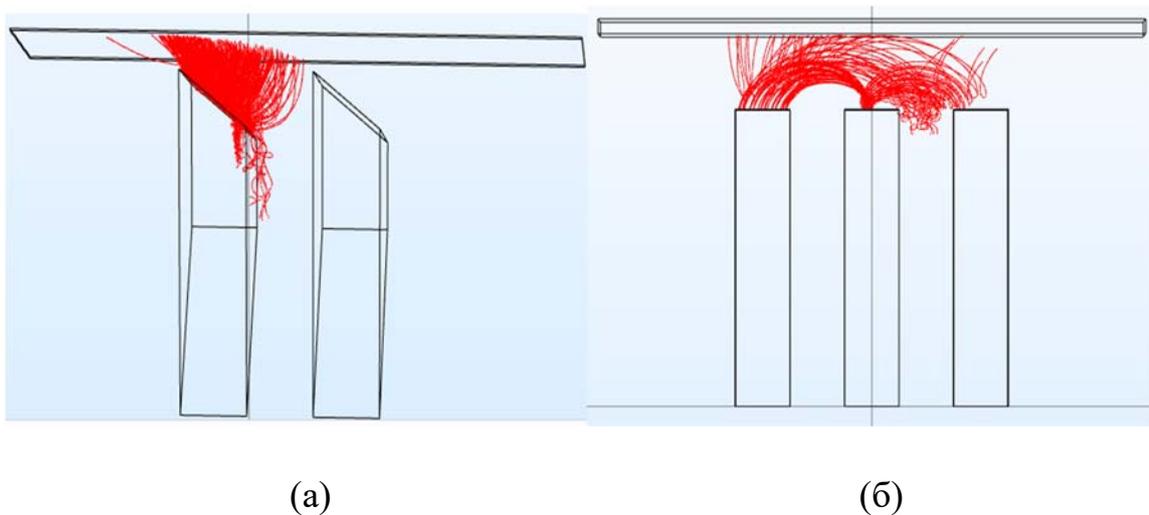


Рисунок 17 - Результаты моделирования движения вторично-эмиссионных электронов в поле  $B = 0,1\text{Тл}$ . а - новый датчик,  $B_y=0,087\text{Тл}$ ,  $B_z= 0,05\text{Тл}$ ; б - плоский датчик,  $B_z=0,1\text{Тл}$ . Оси расположены так же, как на рис. 11.

Видно, что при небольших магнитных полях новые датчики не дают заметного выигрыша, однако при  $B=0,1\text{Тл}$  и выше разница в количестве перекрёстных помех становится достаточно значительной. Таким образом, главным преимуществом новых вторично-эмиссионных датчиков является их универсальность, т.е. их можно устанавливать очень близко к магнитной системе установки.

## **Заключение**

В ходе данной работы была подготовлена к работе система многохордовой диагностики плазмы пучком нейтральных атомов для установки ГОЛ-NB. Существовавший диагностический инжектор был откалиброван и модифицирован для работы в условиях улучшенного вакуума. Также была спроектирована и разработана система диагностики нейтрального пучка, способная работать в магнитных полях до 1кГс. В настоящее время идёт процесс сборки первой очереди установки ГОЛ-NB, и провести измерения не представляется возможным. Сама диагностика в настоящий момент находится в стадии заключительной сборки и вскоре будет установлена на ГОЛ-NB.

## Список литературы

---

1. Г. И. Будкер, В. В. Мирнов, Д. Д. Рютов, Влияние гофрировки магнитного поля на расширение и остывание плотной плазмы. Письма в ЖТЭФ, 1971, 14, с.320.
2. А. В. Аржанников, В. Т. Астрелин, А. В. Бурдаков, Исследование механизма быстрого нагрева ионов в многопробочной ловушке ГОЛ-3, Физика плазмы, 2005, том 31, №6, с 506 – 520.
3. В. В. Поступаев, В. И. Баткин, А. В. Бурдаков, Эксперименты по транспортировке замагниченной плазменной струи на установке ГОЛ-3, Физика плазмы, 2016, том 42, № 4, с. 321–330
4. В. И. Давыденко, А. А. Иванов, Г. Вайсен, Экспериментальные методы диагностики плазмы, Новосибирск, 1999, с 81 - 93.
5. I.D. Kaganovich, et al., Nucl. Instr. and Meth. A (2009), doi:10.1016/j.nima.2009.03.084.
6. Д. Медвед, Й. Штрассер, Кинетическая эмиссия электронов с твёрдых тел, Успехи физических наук, том 91, вып.3.
7. А. М. Борисов, Е.С. Машкова, Физические основы Ионно-лучевых технологий, I. Ионно-электронная эмиссия, Москва, Университетская книга, 2011, с 86.8.
8. I. A. Ivanov, V. I. Batkin, A. V. Burdakov, Transportation of cold plasma jet in multiple-mirror magnetic field, AIP ADVANCES 7, 125121 (2017)