

Содержание

1. Введение	Ошибка! Закладка не определена.
2. Принцип работы и конструкция анализатора	3
2.1 Поведение заряженных частиц в электрических и магнитных полях.....	4
2.2 Описание и схема работы анализатора атомов перезарядки.....	8
3. Моделирование анализатора атомов перезарядки для диагностики плазмы	11
3.1 Расчет прохождения атомов через обдирочную фольгу.....	12
3.2 Расчет электрических и магнитных полей в анализаторе.....	16
3.3 Построение и анализ результатов моделирования.....	19
4. Заключение	25
Список использованной литературы.....	26

1. Введение

Эффективность установок, предназначенных для нагрева и удержания горячей плазмы, во многом характеризуется функцией распределения быстрых ионов, а также ионной температурой, которая позволяет оценить эффективность нагрева и времени удержания плазмы. В работе [1] показано, что энергетическое распределение потока быстрых нейтралов перезарядки, покидающих плазменный шнур, отражает распределение по энергии ионов в плазме, что и позволяет определить ионную температуру, а также, в более общем случае, изучить их функцию распределения. Таким образом, анализ спектра атомов перезарядки проводится с целью измерения данных параметров.

В экспериментах по управляемому термоядерному синтезу в большинстве случаев плазма достаточно горячая и вследствие этого является полностью ионизованной. Появление атомов в плазме может быть вызвано тремя причинами.

Первая из них – проникновение атомов с периферийной области. Молекулы водорода, попадая в периферийную плазму, с некоторой вероятностью диссоциируют, в результате чего образуются франк-кондоновские атомы с энергией 2 - 4эВ. Для этих атомов основным процессом взаимодействия с плазмой является резонансная перезарядка на горячих ионах плазмы, которая приводит к появлению потока вторичных атомов, более глубоко проникающих в плазму. Пусть длина пробега атома относительно ионизации λ_i , а длина пробега относительно перезарядки λ_{ch} . Тогда количество актов перезарядки

$$N = \frac{\lambda_i}{\lambda_{ch}}$$

Вследствие того, что после каждого акта перезарядки атом меняет направление движения случайным образом, процесс проникновения атома

вглубь плазмы имеет диффузионный характер, и длину проникновения можно оценить следующим образом:

$$l \sim \lambda_{ch} \sqrt{N} = \sqrt{\lambda_i \lambda_{ch}}$$

В плотной горячей плазме длина проникновения мала, и атомы ионизируются на периферии плазмы. В центральных областях плазмы атомы образуются в основном за счет фоторекомбинации. Для водорода скорость фоторекомбинации определяется выражением[2]:

$$\gamma = \frac{4 \cdot 10^{-13}}{T_e^{1/2}} \text{ см}^3/\text{с}$$

Равновесная плотность атомов, при которой скорости фоторекомбинации и ионизации электронами равны:

$$n_a = \frac{n_e}{\sigma_i V_e}$$

Где σ_i - сечение процесса, V_e - скорость электронов. Тогда для плазмы с плотностью $n_e \approx 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и электронной температурой $T_e \approx 1 \text{ кэВ}$, равновесная плотность атомов оценивается как $n_a = 10^8 \text{ см}^{-3}$.

Третья причина появления атомов в плазме - инжекция пучков быстрых атомов для нагрева или диагностики (активная корпускулярная диагностика плазмы).

Стандартный сценарий эксперимента по определению ионной температуры обычно следующий (рис.1): в плазму инжектируется диагностический пучок быстрых атомов, который приводит к появлению вторичных атомов, образовавшихся в результате перезарядки ионов плазмы на атомах пучка. Нейтралы перезарядки, покидающие плазму, попадают в анализатор, с помощью которого производится анализ энергетического спектра ионов плазмы.

Инжекция нагревного атомарного пучка может также привести к образованию в плазме популяции быстрых ионов, функция распределения которых представляет интерес для диагностики.

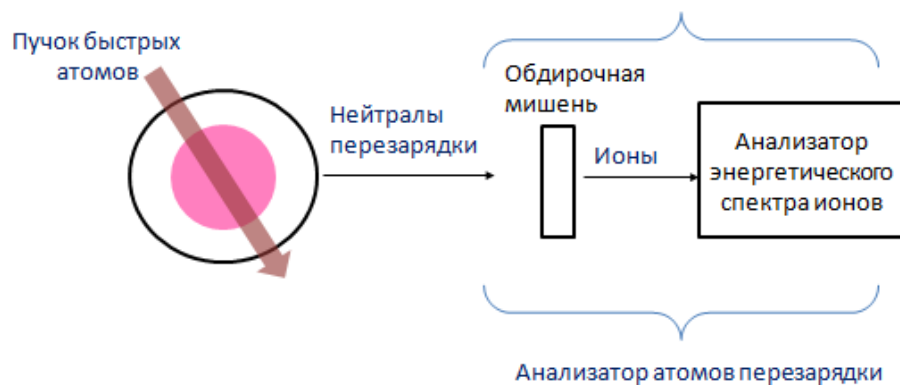


Рисунок 1 Анализ спектра энергий нейтралов перезарядки

Целью данной работы является разработка анализатора нейтралов перезарядки для регистрации спектра быстрых ионов водорода и дейтерия в диапазоне от 5 до 40 кэВ.

Задачи работы:

- 1) Построить компьютерную модель анализатора.
- 2) Подобрать оптимальные для поставленной цели параметры анализатора.
- 3) Исследовать полученные результаты.

1. Принцип работы и конструкция анализатора.

2.1 Поведение заряженных частиц в электрическом и магнитном полях. Использование полей в анализаторе.

Работа анализатора атомов перезарядки основана на движении частиц в магнитных и электрических полях. В разрабатываемом анализаторе магнитное поле будет использоваться для разделения ионов по энергиям и фокусировки потока ионов в детектор. Предполагается также использование электростатической линзы в целях угловой фокусировки ионного потока, а также использование электрического поля для ускорения

ионов низкой энергии. Фокусировка потока позволяет значительно увеличить количество частиц, попадающих в анализатор.

Рассмотрим движение заряженной частицы в однородном поперечном магнитном поле. Положим, что частица влетает в поле в направлении, перпендикулярном силовым линиям. Тогда на частицу действуют сила Лоренца:

$$F = \frac{qV}{c}H$$

Так как направление действия силы перпендикулярно скорости частицы, сила не совершает работы и не изменяет кинетическую энергию частицы. Таким образом, величина скорости частицы в магнитном поле остается постоянной. При этом частица имеет центростремительное ускорение и движется по окружности в плоскости, перпендикулярной силовым линиям. Тогда, согласно второму закону Ньютона, радиус поворота частицы в поле запишется следующим образом:

$$R = \frac{mc}{qH}V$$

Таким образом, радиус поворота зависит от скорости частицы, что и обеспечивает разделение по энергиям.

Магнитное поле обладает также фокусирующим действием. Рассмотрим движение пучка частиц с одинаковой скоростью и движущихся перпендикулярно магнитному полю из точки А (рис.2). Если угловая расходимость пучка невелика, то пучок сфокусируется после поворота траектории на 180° [7]. Фокусирующее действие поперечного однородного поля широко используется в экспериментальной физике (разделение изотопов, масс-спектрокопия и т.д.).

В данной работе задача нахождения траектории частиц в заданном магнитном поле решается численными методами.

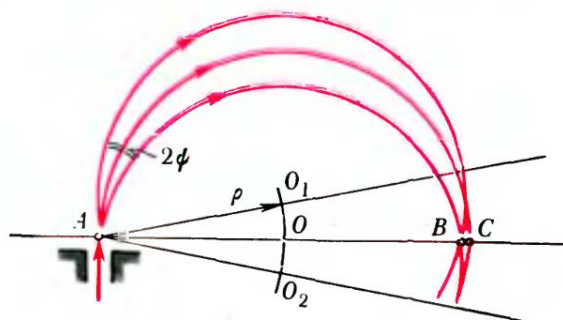


Рисунок 2 Фокусировка пучка заряженных частиц в поперечном однородном магнитном поле

Рассмотрим фокусировку ионов в электростатической линзе с аксиально-симметричным полем. Такая линза обычно состоит из двух трубчатых электродов с совместной осью. Между электродами находится диафрагма с отверстием для прохождения пучка (рис.3). Положим потенциал с обеих сторон трубчатых электродов равным нулю, а потенциал электрода-диафрагмы положительным.

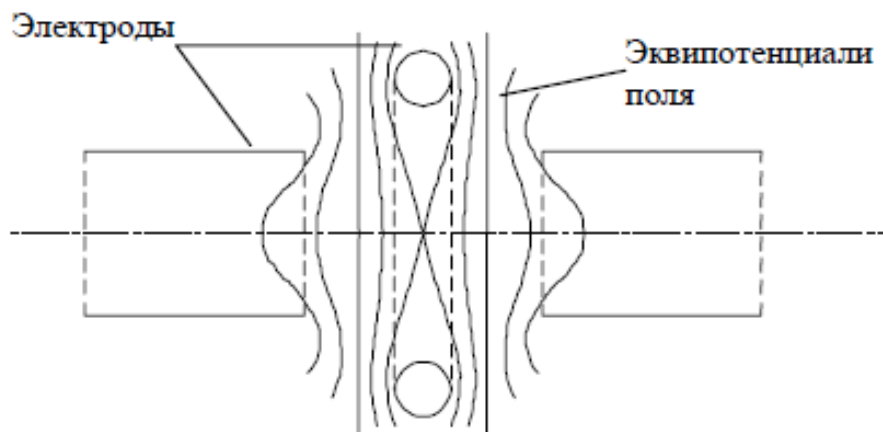


Рисунок 3 Фокусирующая электростатическая линза

Фокусировка достигается за счет того, что в центральной части линзы скорость заряженной частицы уменьшается, в результате чего ее суммарный поперечный импульс становится направленным к оси.

Найдем траекторию заряженной частицы в такой линзе. Положим энергию иона на входе линзы eU_0 . Используем уравнение движения в параксиальном приближении и закон сохранения энергии:

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} = eE_r \quad (1)$$

$$e(U_0 - \varphi) = \frac{mV^2}{2} \quad (2)$$

В уравнении (1) преобразуем левую часть, подставив скорость, выразив ее через значение потенциальной функции $U(r=0, x)$ на оси:

$$\frac{d^2 r}{dt^2} = \frac{d}{dt} \frac{dr}{dt} = V \frac{d}{dx} \left(V \frac{dr}{dx} \right) = 2 \frac{e}{m} \sqrt{U} \frac{d}{dx} \left(\sqrt{U} \frac{dr}{dx} \right)$$

Далее воспользуемся соотношением:

$$E_r = -\frac{r}{2} \frac{\partial^2 \varphi(r=0, x)}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 U}{\partial^2 x}$$

Заменим правую часть уравнения движения. В результате получаем:

$$\frac{d}{dx} \left(\sqrt{U} \frac{dr}{dx} \right) = \frac{r}{4} \frac{U''^2}{\sqrt{U}}$$

Продифференцировав произведение и перенеся все в левую часть, получим уравнение, описывающие траекторию заряженной частицы в электрическом поле (основное уравнение электронной оптики):

$$\frac{d^2 r}{dx^2} + \frac{U'}{2U} \frac{dr}{dx} + \frac{U''}{4U} r = 0 \quad (3)$$

Это дифференциальное уравнение второго порядка с переменными коэффициентами. Данное уравнение позволяет при заданных значениях потенциала определить траекторию иона в рассматриваемом поле. В данной работе эта задача решается численно.

Уравнение (3) можно решать в различных приближениях. Для оценки траектории воспользуемся приближением тонкой линзы. Для этого проинтегрируем данное уравнение, считая изменение радиуса малым, и получим выражение для угла наклона траектории к оси [7]

$$\frac{dr}{dx} = \frac{r}{4\sqrt{U_0}} \int \frac{U''}{\sqrt{U}} dx = -\frac{r}{f}$$

Где f – фокусное расстояние линзы.

2.2 Описание и схема работы анализатора атомов перезарядки.

Конструкция разрабатываемого анализатора основывается на конструкции анализаторов, использовавшихся на установках MST (Madison Symmetric Torus, University of Wisconsin) и C-2 (рис.4)[8, 9]

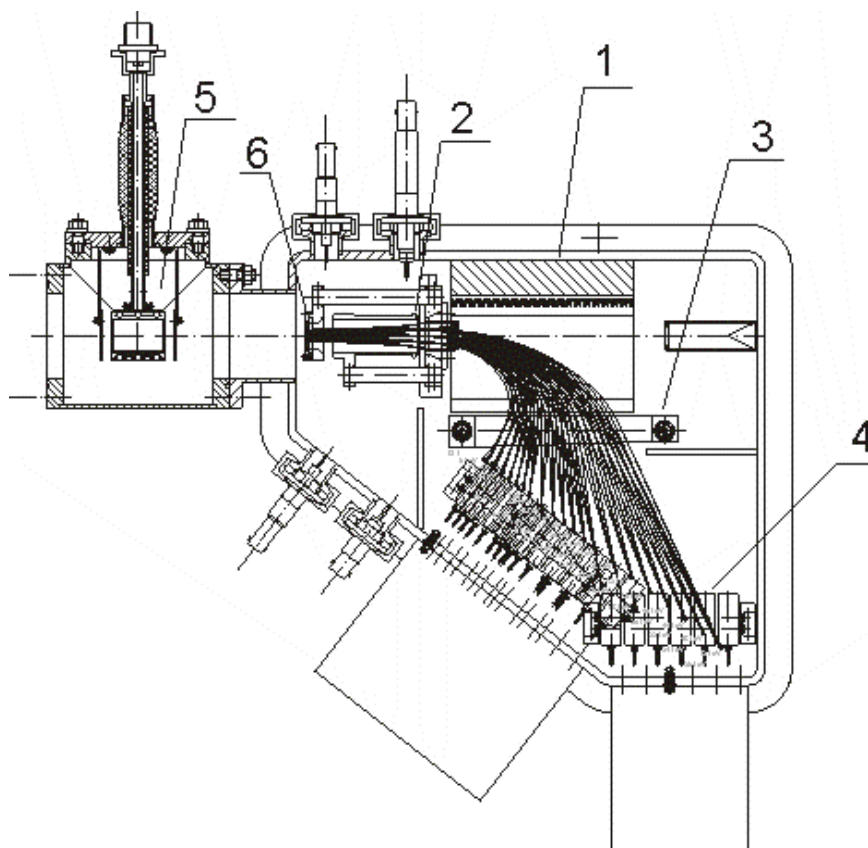


Рисунок 4 Конструкция анализатора

Основными элементами анализатора являются:

- 1 – магнит-сепаратор
- 2 – электростатическая линза
- 3 – конденсатор
- 4 – детекторы
- 5 – калибровочный ионный источник
- 6 – обдирочная фольга

Принцип работы анализатора состоит в следующем: нейтралы перезарядки, покидающие плазму, проходят через вакуумный канал и попадают на обдирочную фольгу анализатора. Обдирочная фольга представляет собой пленку из углерода толщиной 10 нм, при прохождении которой быстрые атомы с вероятностью 10-40% отдают электрон и становятся ионами. Обдирочная фольга находится под потенциалом, который ускоряет образовавшиеся в результате обдирки ионы. Эти ионы фокусируются электростатической линзой и направляются в магнит-сепаратор. Магнит-сепаратор на основе постоянных магнитов создает стационарное поле, поперечное к направлению движения ионов. Радиус поворота ионов в магнитном поле зависит от скорости иона, что обеспечивает разделение ионов по энергиям.

Если ставится задача разделения ионов по массам, то после магнито-сепаратора устанавливается конденсатор, с помощью которого частицы, движущиеся по одинаковым траекториям, но имеющие разную массу приобретают различный поперечный импульс.

Пространственно разделенные ионы с различной энергией и массой принимаются и регистрируются двумя линейками детекторов, каждая из которых регистрирует ионы определенной энергии. В качестве детекторов

могут быть использованы токовые коллекторы (цилиндры Фарадея), вторично-эмиссионные умножители или полупроводниковые детекторы.

Базовыми понятиями, характеризующими анализатор атомов перезарядки, являются:

- Энергетический диапазон – диапазон энергий частиц, который способен зарегистрировать анализатор.
- Разрешение – отношение минимальной разности энергий двух монохроматических пучков, при которой спектральные линии еще не пересекаются (ΔE), к энергии настройки (E):

$$\rho = \frac{\Delta E}{E}$$

- Дисперсия – величина, определяющаяся как отношение смещения изображения моноэнергетического источника при малом изменении энергии настройки к относительному изменению этой энергии:

$$D = \left. \frac{dx}{dE} \right|_{0,E}$$

По сравнению с предыдущими моделями анализаторов, использующихся на установках MST и С-2, в разрабатываемом анализаторе требуются следующие изменения:

- Увеличение рабочей энергии с 30 кэВ до 40 кэВ
- Исключение разделения по массам
- Увеличение энергетического разрешения

3. Моделирование анализатора атомов перезарядки для диагностики плазмы

Перед непосредственным изготовлением анализатора ставится задача построить его компьютерную модель и произвести расчет движения частиц, с целью подбора оптимальной конфигурации полей и расположения рабочих элементов.

Моделирование состоит из следующих этапов (рис.5):

- В программе Comsol Multiphysics конструируется 3D модель анализатора и производится расчет электромагнитных полей.
- Методом Монте-Карло с помощью программы SRIM рассчитывается прохождение частиц через обдирочную фольгу.
- Используя данные моделирования SRIM, в программе Comsol Multiphysics производится расчет траекторий частиц в анализаторе.
- Конечным этапом моделирования является написание программы на языке Matlab, в которой производится анализ полученных траекторий и определение эффективности и энергетического разрешения анализатора.



Рисунок 5 Блок-схема этапов моделирования

3.1 Расчет прохождения атомов через обдирочную фольгу

Для анализа по энергиям атомов перезарядки, покидающих плазму, их необходимо ионизовать. В целях ионизации атомов производится их обдирка при прохождении через тонкую углеродную пленку, толщиной 100 Å (рис.6). Использование углеродной фольги для обдирки позволяет уменьшить создаваемую анализатором газовую нагрузку и проводить измерения низкоэнергетичной части спектра с помощью подачи напряжения смещения на мишень. В то же время при этом при прохождении через обдирочную фольгу ионы приобретают энергетический и угловой разброс, который необходимо учитывать при разработке анализатора и определении его энергетического разрешения.

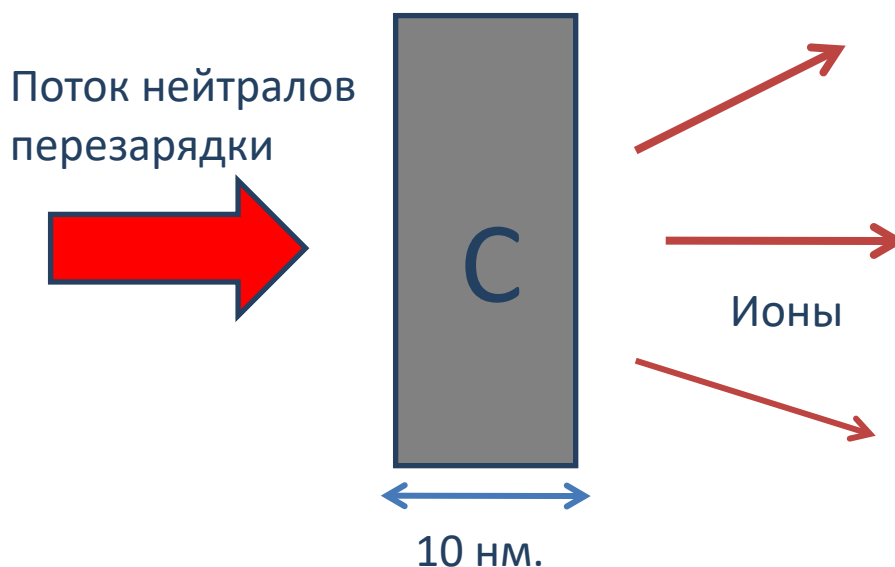


Рисунок 6 Схема прохождения атомов через обдирочную фольгу

Данная задача решалась численно методом Монте-Карло с помощью программы SRIM (stopping and range of ions in matter) (рис.7). Для набора частиц с постоянной энергией, приходящих на вход фольги по нормали к поверхности, определялись энергии и направление движения после прохождения фольги.

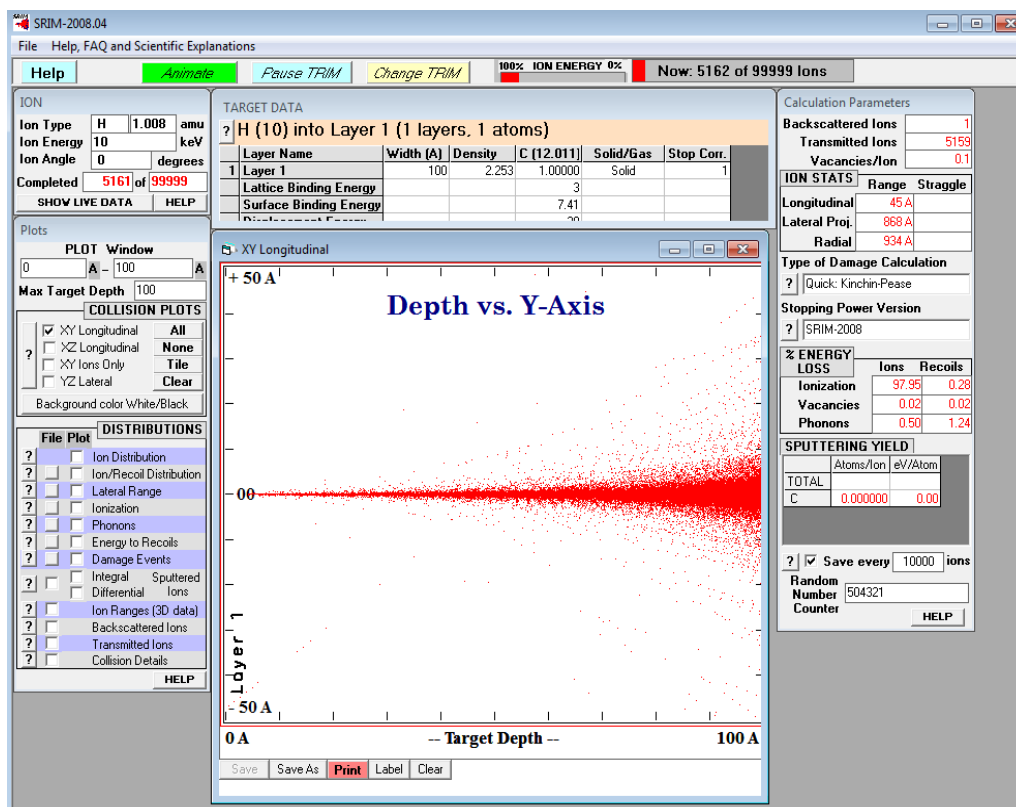


Рисунок 7 Программа SRIM

В результате моделирования для каждой энергии в диапазон от 1 до 40 кэВ для атомов водорода и дейтерия были получены угловые распределения прошедших через фольгу ионов (рис.8)

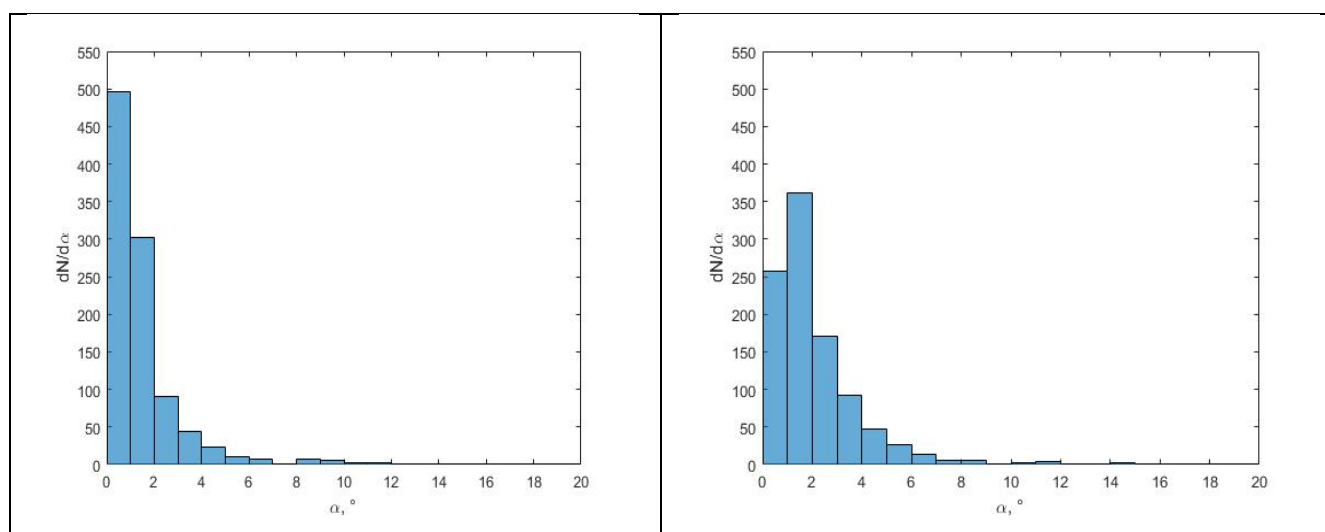


Рисунок 8 Гистограммы углового разброса, слева – дейтерий 30 кэВ, справа – водород 20 кэВ.

Для оценки величины углового разброса и последующего подбора параметров фокусирующей электростатической линзы были построены

графики зависимости отношения количества частиц, рассеявшихся под определенным углом, к общему числу частиц (N/N_0) от угла (рис.9, 10).

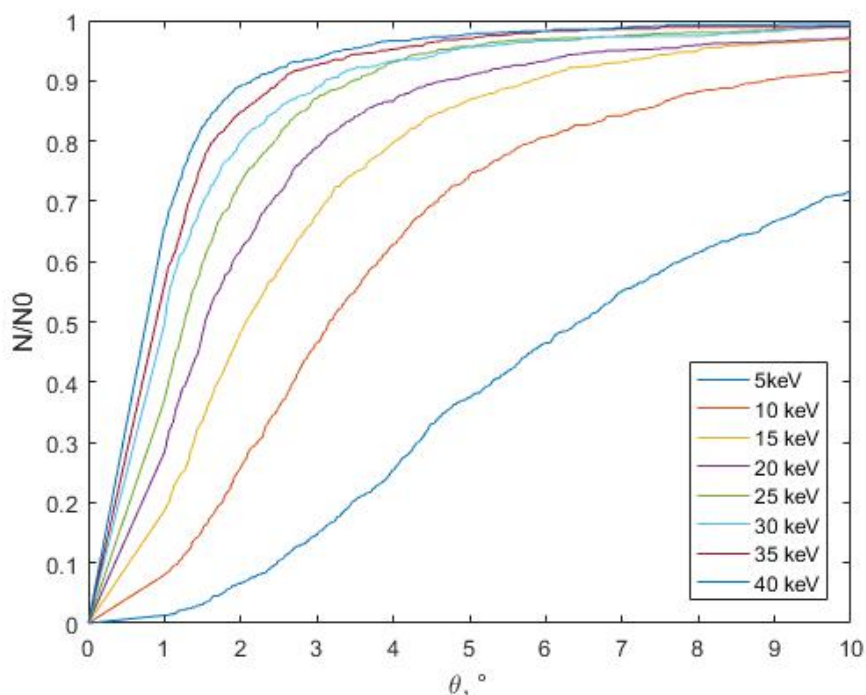


Рисунок 9 Угловой разброс после прохождения фольги для ионов дейтерия

Из графиков видно, что угловой разброс для атомов низких энергий достаточно существенный. Отсюда возникает необходимость использования электростатической линзы в целях фокусировки частиц низкой энергии.

Также в целях анализа результата моделирования прохождения ионов через обдирочную фольгу были построены графики разброса по энергиям для атомов дейтерия и водорода соответственно (рис.11, 12). Из графиков видно, что энергетический разброс как для ионов водорода, так и для ионов дейтерия достигает 0,45 кэВ, что принципиально ограничивает разрешение анализатора.

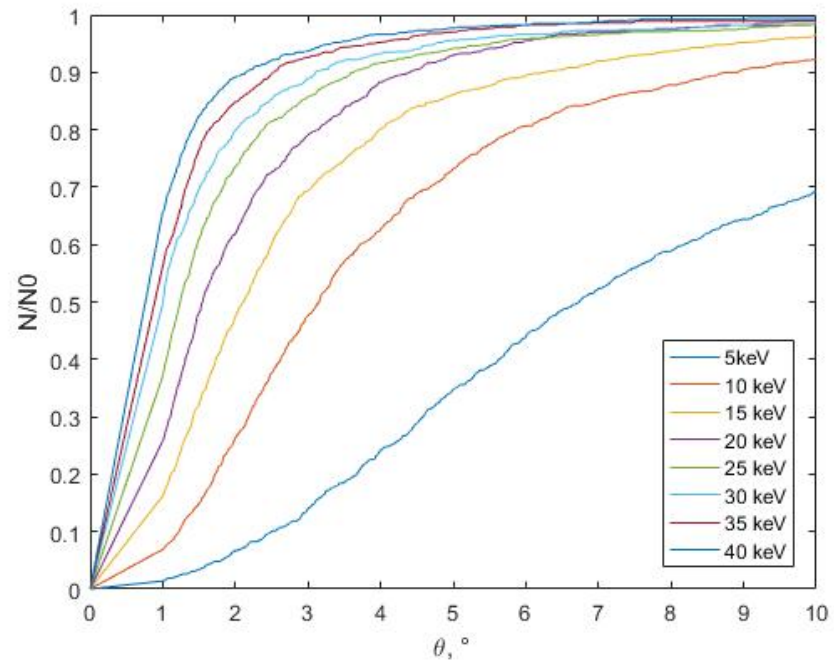


Рисунок 10 Угловой разброс после прохождения фольги для ионов водорода

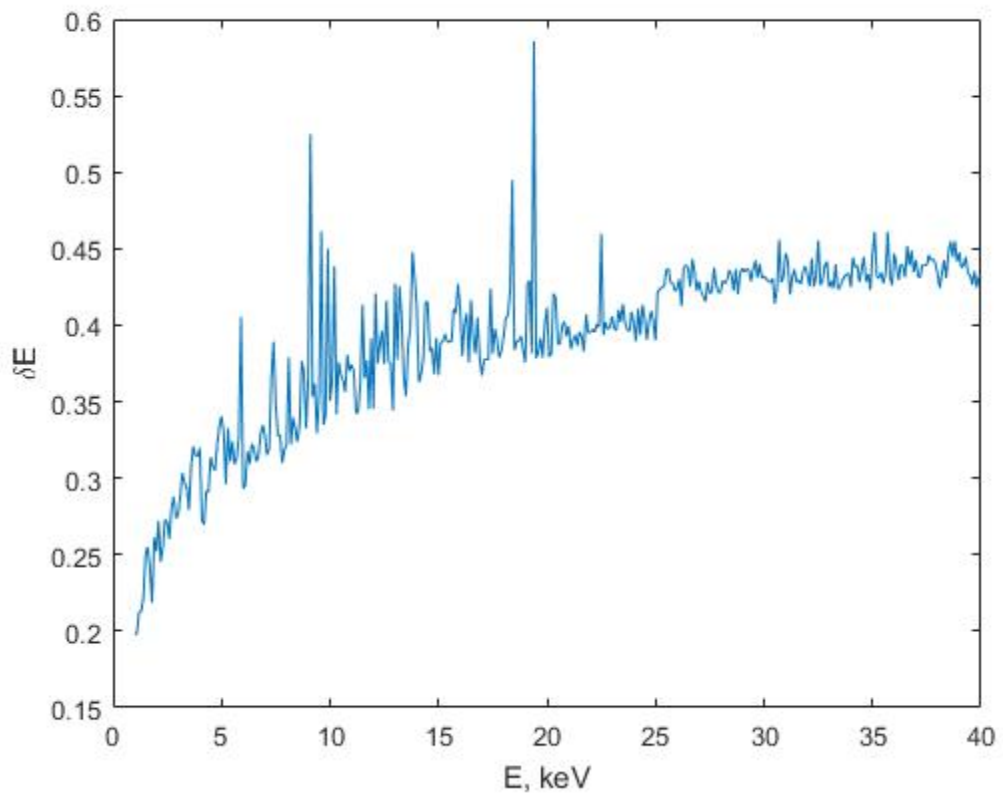


Рисунок 11 Энергетический разброс ионов дейтерия после прохождения обдирочной фольги

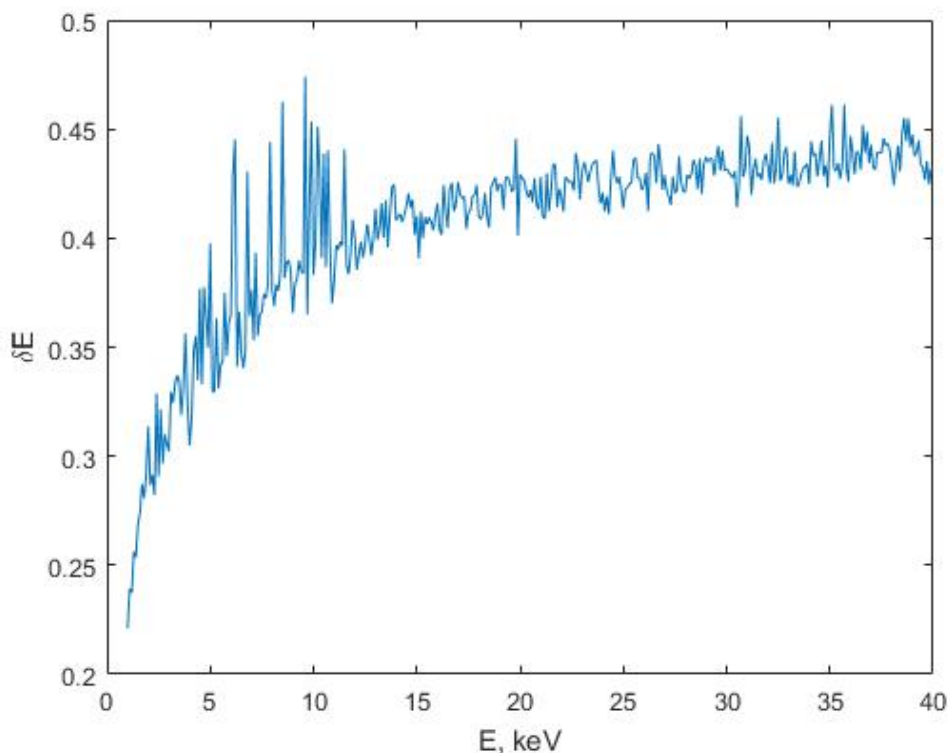


Рисунок 12 Энергетический разброс ионов водорода после прохождения обдирочной фольги

3.2 Расчет электрических и магнитных полей в анализаторе

На рис.13 показана используемая в расчетах геометрия анализатора, включающая в себя линейку детекторов, электростатическую линзу и магнит-сепаратор, состоящий из ярма на основе конструкционной стали, постоянных магнитов и алюминиевых вставок.

Зазор между полюсами магнита составляет 12,6 мм, толщина постоянных магнитов 8,2 мм, напряжения на электродах анализатора равны: +5кВ (фольга), -20кВ (линза). Диаметр обдирочной фольги 5 мм, диаметр апертуры линзы 20 мм.

Для расчета магнитного и электрического поля в 3D геометрии, включающей в себя корпус анализатора, узел линзы и магнит-сепаратор, использовался программный пакет COMSOL 5.2.

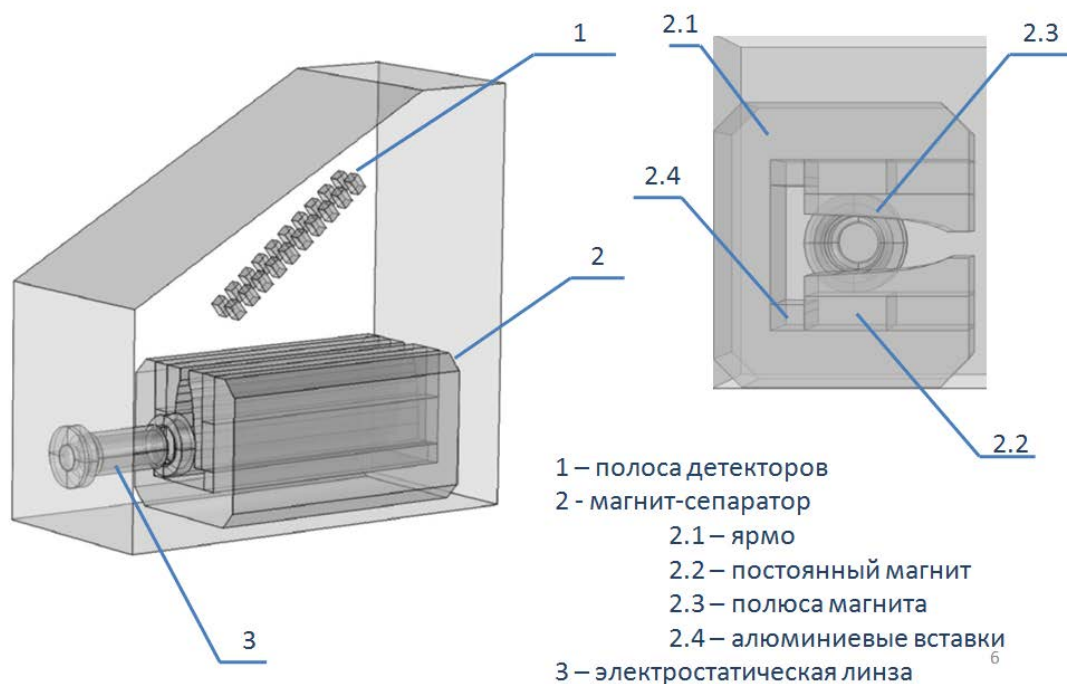


Рисунок 13 Геометрия разрабатываемого анализатора

В результате моделирования были рассчитаны магнитное (рис.14, 15) и электрическое поле (рис.16) в анализаторе. Магнитные свойства материалов брались из библиотеки данных Comsol.

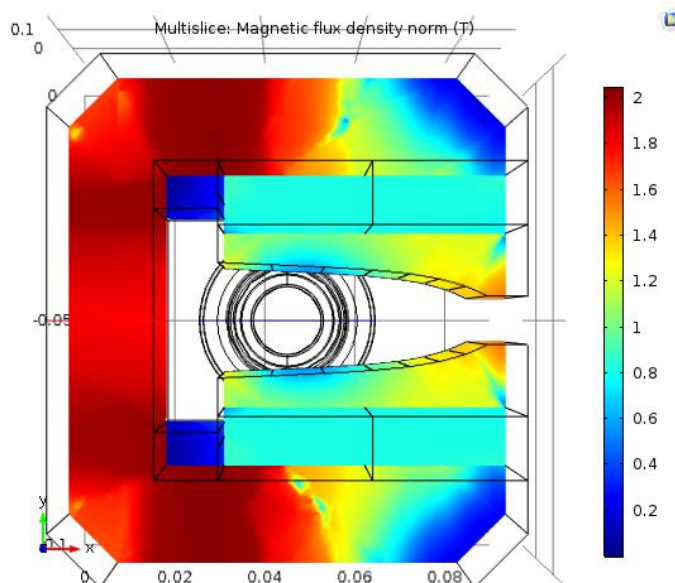


Рисунок 14 Магнитное поле внутри анализатора

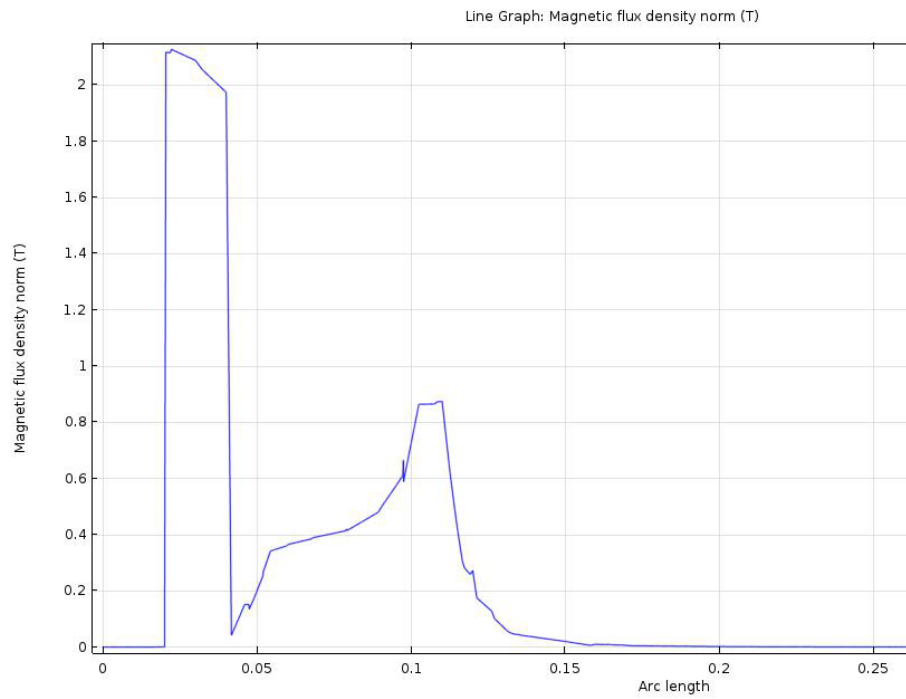


Рисунок 15 Распределение магнитного поля вдоль центральной плоскости анализатора

Electric potential (V)

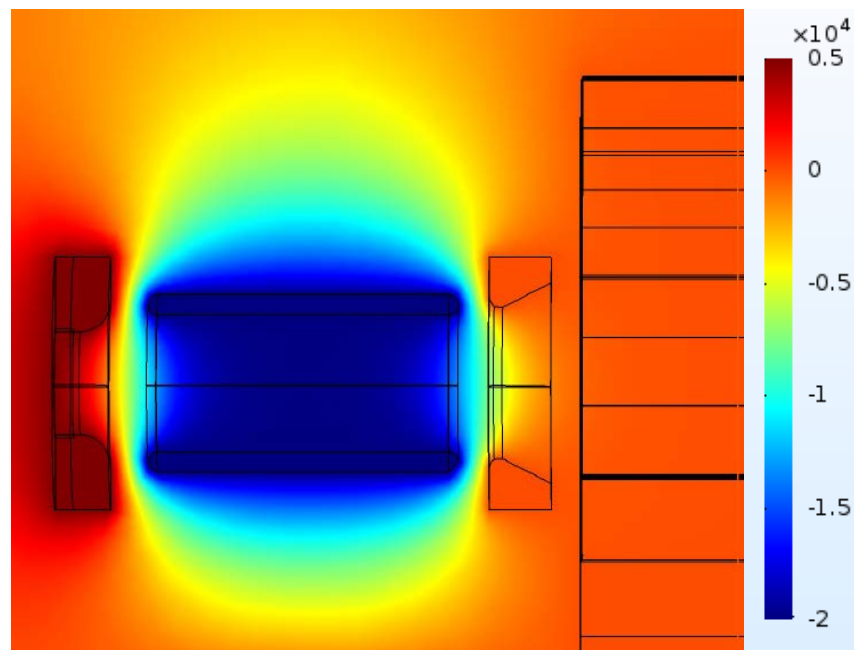


Рисунок 16 Электрическое поле внутри анализатора

3.3 Построение и анализ результатов моделирования

Траектории ионов в анализаторе вычислялись с помощью специальной программы на языке Matlab, интегрированной в среду Comsol 5.2. Для расчета траекторий использовался специально написанный скрипт, который рассчитывает траектории ионов с различными начальными энергиями и направлениями скорости, стартующими из мишени, и сохраняет полученные траектории в файл для дальнейшего анализа. В проведенных расчетах ионы эмитировались из центральной точки мишени. Для каждой энергии в диапазоне от 5 до 40 кэВ с шагом 5 кэВ рассчитывалось по 200 траекторий частиц, начальные энергии и направление движения которых брались из результатов моделирования программой SRIM. Рассчитанные траектории показаны на рисунках 17, 18

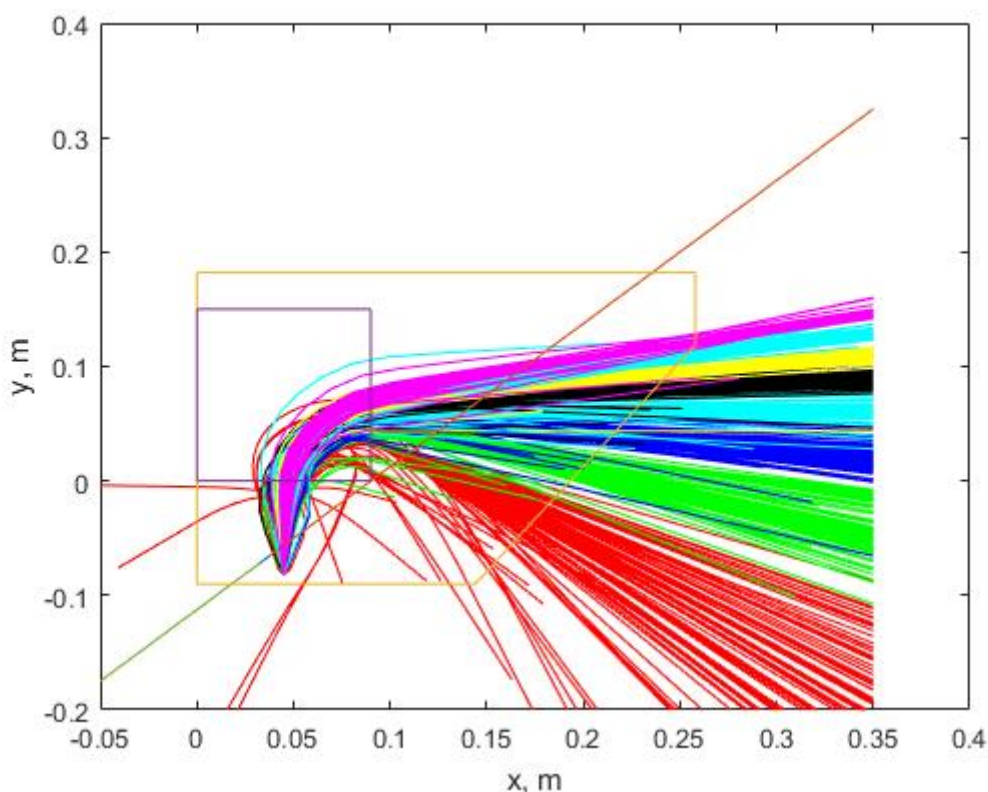


Рисунок 17 Траектории ионов дейтерия в анализаторе

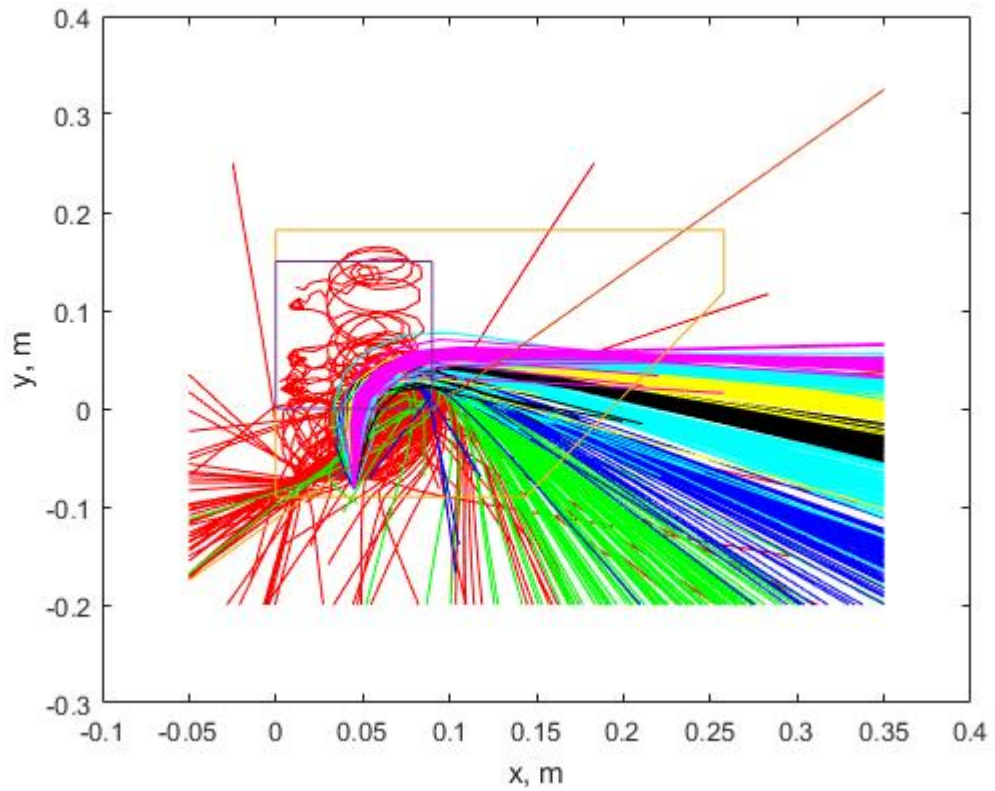


Рисунок 18 Траектории ионов водорода в анализаторе

Чтобы убедиться в необходимости электростатической линзы для частиц низких энергий, аналогичные расчеты были произведены при отключенной линзе. Рассчитанные траектории показаны на рисунке 19

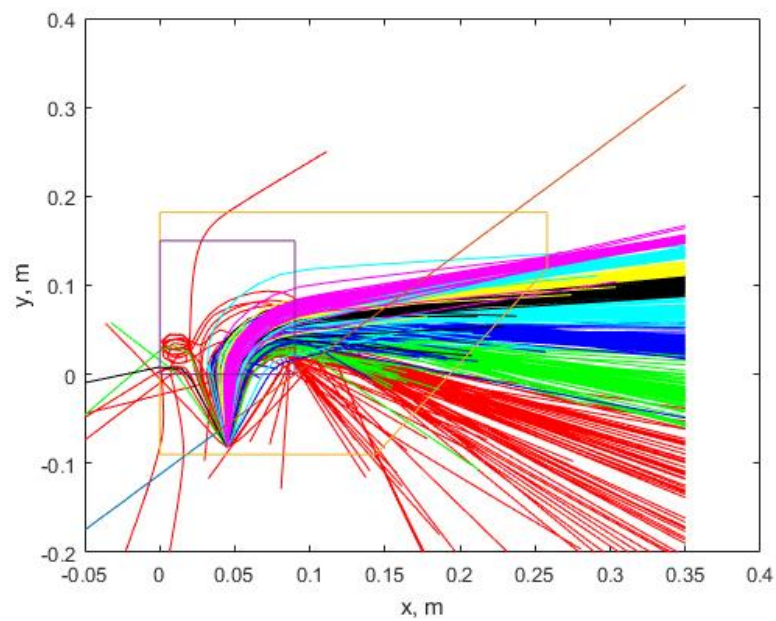


Рисунок 19 Траектории ионов дейтерия в анализаторе при отключенной линзе

Полученные траектории анализировались с помощью специальной программы на языке Matlab. Эта программа анализирует точки пересечения траекторий ионов с апертурами линзы и магнита и исключает траектории ионов, которые гибнут на этих апертурах. Для ионов, прошедших через ограничивающие апертуры, программа находит точки пересечения с плоскостью детекторов и строит распределения плотности точек вдоль линии детекторов (рис.20, 21; 22 – при отключенной линзе) Также программа возвращает количество частиц с определенной начальной энергией, прошедших через линзу и магнит.

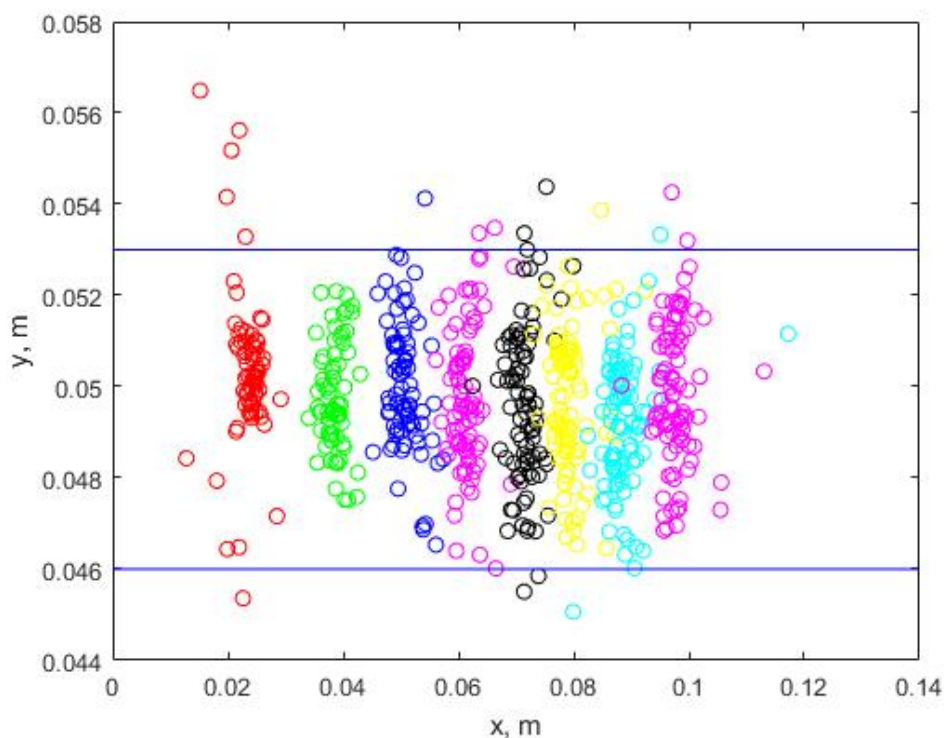


Рисунок 20 Точки пересечения траекторий ионов дейтерия с плоскостью детектора (синие линии – плоскость детектора)

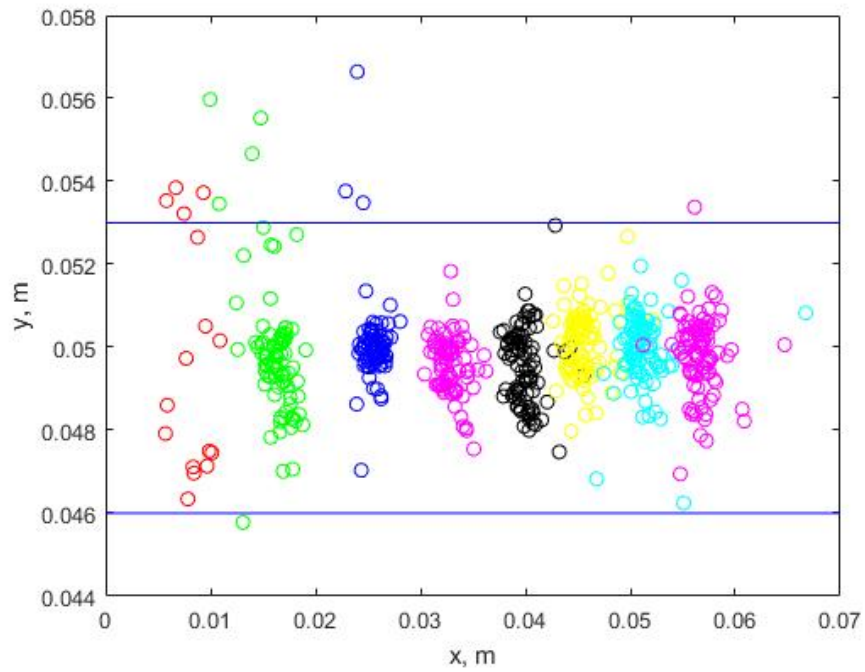


Рисунок 21 Точки пересечения траекторий ионов водорода с плоскостью детектора (синие линии – плоскость детектора)

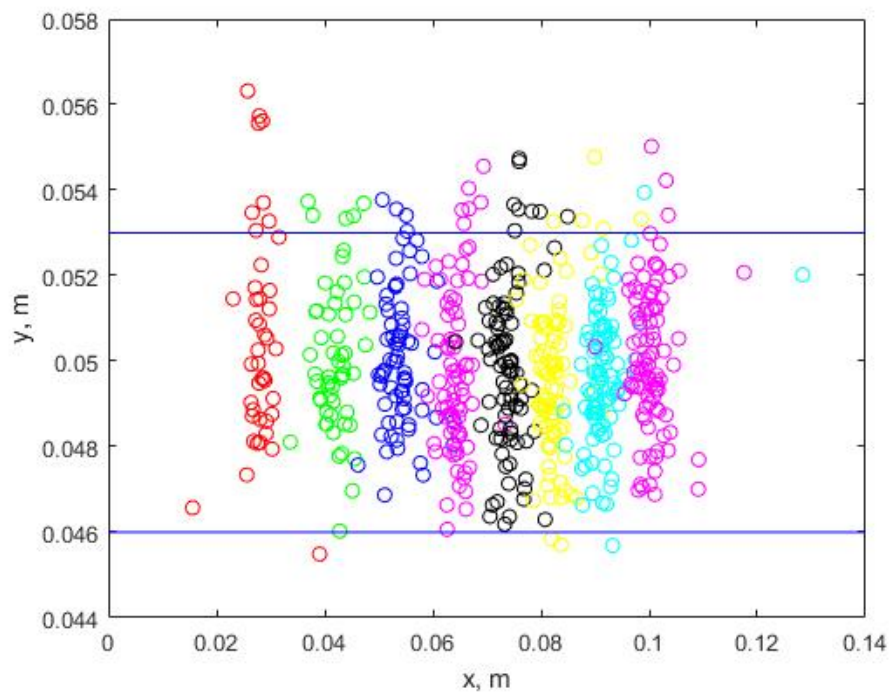


Рисунок 22 Точки пересечения траекторий ионов дейтерия с плоскостью детектора при отключенной линзе

Из полученных распределений плотности точек видно, что достаточная доля частиц в диапазоне от 5 до 40 кэВ попадают в плоскость детектора. Также из графиков видно, что при включенной линзе большее число частиц попадают в плоскость детектора.

Сравнение плотности точек пересечения в плоскости детектора для ионов с близкими энергиями позволяет определить пространственную дисперсию и оценить энергетическое разрешение анализатора на данной энергии. С этой целью были построены распределения плотности частиц (5 – 40 кэВ) в плоскости детекторов и проведена аппроксимация этих распределений гауссовскими функциями (рис.23, 24). Математическое ожидание и дисперсия полученных аппроксимирующих функций использованы для определения пространственной дисперсии и разрешения анализатора.

Дисперсия анализатора на заданной энергии определяется по сдвигу математических ожиданий аппроксимирующих функций для ионов с различающимися на 5 кэВ начальными энергиями. Величина пространственной дисперсии приведена в столбце 4 на рис.25, 26. Столбец 5 содержит величину энергетического разрешения по ширине на полувысоте (FWHM), найденную с использованием ранее полученных значений пространственной дисперсии анализатора и ширины аппроксимирующей функции.

Результаты анализа траекторий представлены в таблицах (рис 23, 24). Полученные данные свидетельствуют о том, что разработанный анализатор имеет параметры, соответствующие выбранным конфигурациям рабочих элементов.

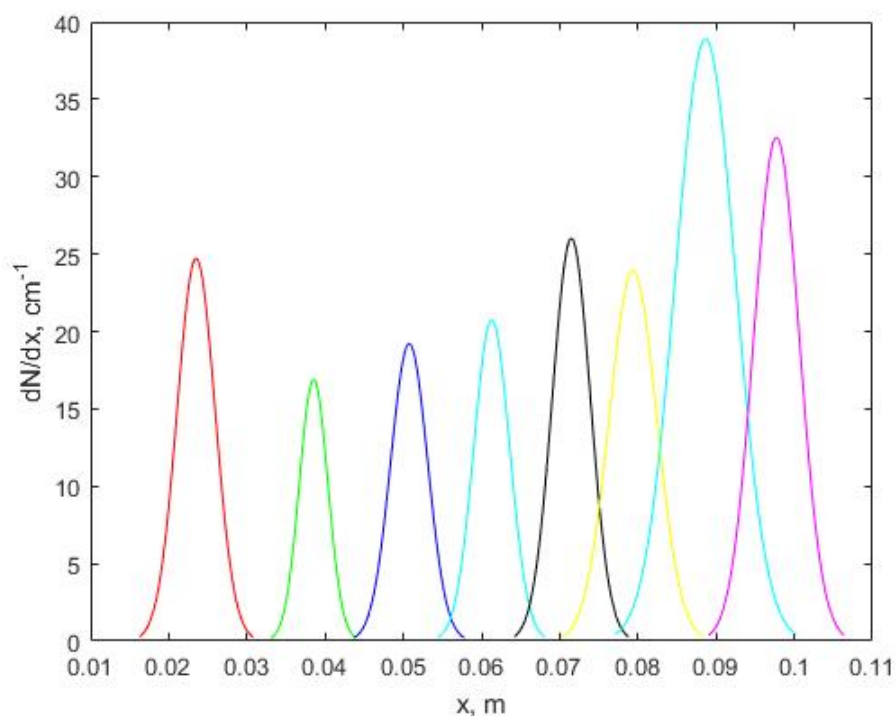


Рисунок 23 Аппроксимирующие гауссовские функции плотности распределения частиц дейтерия в плоскости детекторов

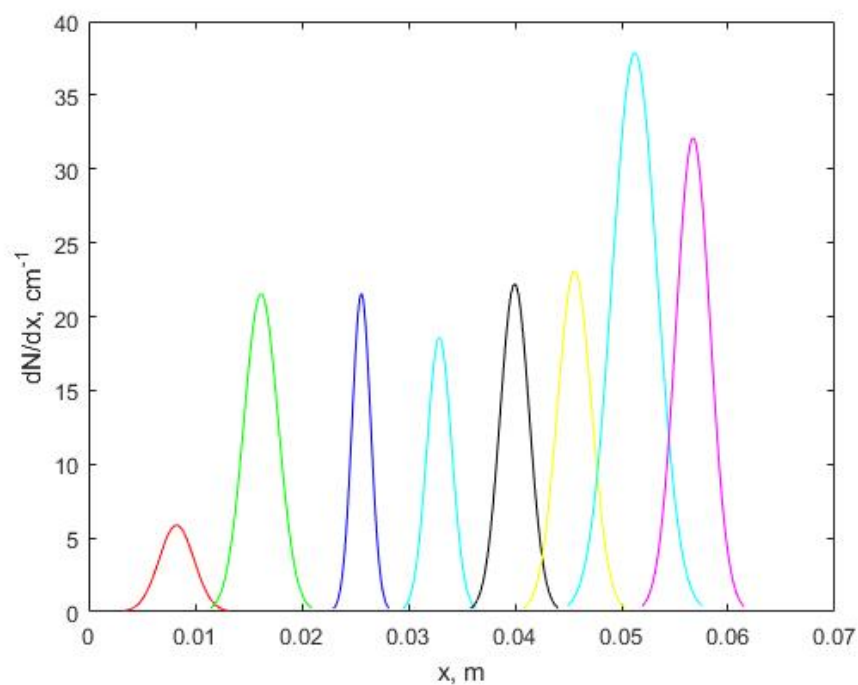


Рисунок 24 Аппроксимирующие гауссовские функции плотности распределения частиц дейтерия в плоскости детекторов

Энергия, кэВ	Количество частиц	Количество частиц, попавших в детектор	Пространственная дисперсия, мм/кэВ	Энергетическое разрешение FWHM, кэВ
5	200	75	3.01	1.90
10	200	70	3.01	1.42
15	200	81	2.11	2.63
20	200	85	2.11	2.56
25	200	88	1.58	3.63
30	200	91	1.58	4.53
35	200	94	1.82	5.00
40	200	91	1.82	3.76

Рисунок 25 Таблица результатов для ионов дейтерия

Энергия, кэВ	Количество частиц	Количество частиц, попавших в детектор	Пространственная дисперсия, мм/кэВ	Энергетическое разрешение FWHM, кэВ
5	200	16	1.59	2.42
10	200	86	1.59	2.37
15	200	83	1.46	1.39
20	200	85	1.46	1.85
25	200	89	1.12	2.85
30	200	92	1.12	3.33
35	200	95	1.09	4.52
40	200	92	1.09	3.45

Рисунок 26 Таблица результатов для ионов водорода

Заключение

В результате работы смоделирована конструкция анализатора, произведен расчет электромагнитных полей и траекторий движения частиц для заданного диапазона энергий. Полученные данные использованы для подбора оптимальной конфигурации полей и расположения рабочих элементов анализатора и определения технических характеристик анализатора: пространственной дисперсии и энергетического разрешения.

Список использованной литературы

1. Константинов О.В., Перель В.И. // ЖТФ. 1960.Т. 30. С. 1485.
2. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1992.
3. Анализаторы нейтральных атомов и их применение для диагностики горячей плазмы. ФИЗИКА ПЛАЗМЫ, 2009, том 35, № 7, с. 585–602
4. С.Я. Петров, В.И. Афанасьев, А.Д. Мельник, М.И. Миронов, А.С. Наволоцкий, В.Г. Несеневич, М.П. Петров. Особенности конструкции системы диагностики по потокам атомов изотопов водорода для международного термоядерного реактора ИТЭР.
5. Михайлов Г.А., Войштек А.В. Методы Монте-Карло.
6. В.И. Давыденко, А.А. Иванов, Г. Вайсен. Экспериментальные методы диагностики плазмы
7. Л.А. Арцимович, С.Ю. Лукьянов. Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях.
8. S.Polosatkin et al., Advanced neutral particle analyzer for fusion plasma diagnostic // Fusion science and technology v.59 N1T pp. 259-261 (2011).
9. S.Polosatkin et al., Neutral particle analyzer for studies of fast ion population in plasma // Nuclear instruments & methods in physics research section A- Accelerators spectrometers detectors and associated equipment V:720 pp. 42-44 (2013).