

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Снегирев Андрей Вячеславович

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Расчет и измерение магнитного поля магнита-сепаратора
анализатора быстрых нейтронов**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа 18308

Научный руководитель:

к. ф-м. н. С. В. Полосаткин

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

к. ф-м. н. А. Г. Харламов

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к.т.н. Астрелин В.Т.

Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Новосибирск, 2019 г.

Аннотация

Целью данной работы являлось изучение методов расчета и измерения магнитных полей и применение их для расчета и измерения поля магнита-сепаратора анализатора быстрых нейтронов. В программе COMSOL были смоделированы магнитные поля постоянного магнита и магнита анализатора. Были произведены измерения полей с помощью датчика Холла. Результаты измерений хорошо согласуются с рассчитанными. Полученные результаты для поля в магните анализатора предполагается использовать при работе с собранным датчиком-анализатором быстрых нейтронов.

Ключевые слова: магнитное поле, постоянный магнит, моделирование магнитного поля.

Оглавление

1.Введение.....	4
2.Теоретическая часть	5
1.1.Постоянный магнит	5
1.2.Анализатор	8
2.Экспериментальная часть	10
3.Заключение.....	12

1. Введение

В настоящее время анализаторы быстрых нейтралов широко используются при изучении свойств горячей плазмы, например, распределения частиц в ней по скоростям. Схема эксперимента с таким анализатором выглядит так: пучок нейтральных атомов инжектируется в поток плазмы, за счет перезарядки с ионами образуются нейтральные атомы (нейтралы). Нейтралы затем попадают в анализатор, где на специальной обдирочной фольге превращаются в ионы и ускоряются под действием разности потенциалов. Затем, это ионы попадают в магнит-сепаратор и отклоняются под действием магнитного поля и, в конечном итоге, попадают на детектор, за счет чего можно определить угол отклонения, а, следовательно, и скорость ионов.

Очевидно, что для расчета скорости частицы по углу отклонения необходимо знать магнитное поле в магните-сепараторе. Этому и посвящена данная работа.

Для начала в программе Comsol Multiphysics было смоделировано поле в магните-сепараторе. Затем, с помощью измерителя магнитного поля - тесламетра была измерена зависимость индукции магнитного поля от расстояния. Экспериментальные данные хорошо совпали с теоретическими.

Также было смоделировано и измерено поле постоянного магнита результаты также совпали с теоретическими.

2. Теоретическая часть

1.1. Постоянный магнит

Как известно, магнитное поле создается движущимися зарядами. По закону Био-Савара-Лапласа магнитное поле, создаваемое элементом тока равно

$$d\mathbf{B} = \frac{I}{c} \frac{[\mathbf{dl} \times \mathbf{r}]}{r^3}$$

Следовательно, зная распределение тока, можно найти величину магнитного поля в любой точке пространства

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \frac{1}{c} \int \frac{[\mathbf{j}(\mathbf{r}') \times (\mathbf{r} - \mathbf{r}')] }{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3} dV'$$

Т. к. не существует магнитных зарядов, то силовые линии магнитного поля будут замкнуты.

Для описания поля витка с током удобно ввести магнитный момент

$$\mathbf{m} = \frac{I}{c} \mathbf{S}$$

Где I – величина тока, протекающего в витке, $\mathbf{S}$ – вектор, равный по величине площади витка и направленный по нормали к ней.

Если известен магнитный момент, то можно определить магнитное поле в пространстве:

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = -\frac{\mathbf{m}}{r^3} + \frac{3(\mathbf{m}\mathbf{r})\mathbf{r}}{r^5}$$

Магнитным моментом можно также описывать магнитные свойства отдельных атомов, введя, так называемые, молекулярные токи. Если взять макроскопический объем вещества, то, в силу молекулярного хаоса суммарный магнитный момент его атомов будет равен 0, однако, если поместить это вещество во внешнее магнитное поле $\mathbf{H}$, то магнитные моменты атомов начнут выстраиваться по этому полю, за счет этого у всего

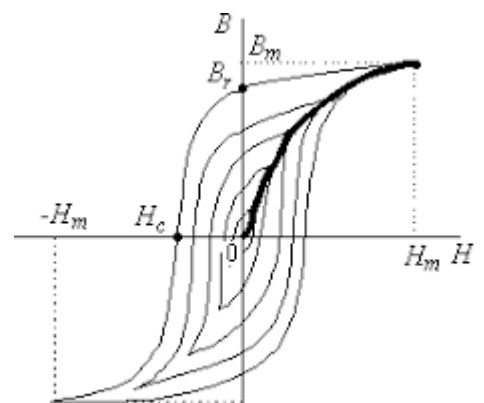


Рис 1. Примерный вид кривой гистерезиса

объема также появится магнитный момент, причем, у некоторых классов веществ (ферромагнетики) он будет оставаться даже после отключения внешнего поля – образуется постоянный магнит. На практике постоянные магниты описывают не магнитными моментами, а кривыми намагничивания – зависимость $B(H)$ при намагничивании, а также остаточной индукцией (B_r) – и коэрцитивной силой (H_c).

В данной работе использовался неодимжелезоборный магнит (NdFeB) марки N38SH размером $30 \times 32 \times 4,5$ мм, остаточная индукция – 1,22 Тл. В программе Comsol было смоделировано его магнитное поле и построены графики зависимости индукции поля вблизи магнита (по оси x, в зависимости от расстояния до края магнита) и зависимости индукции поля от расстояния до магнита по оси z. Результаты представлены на графиках.

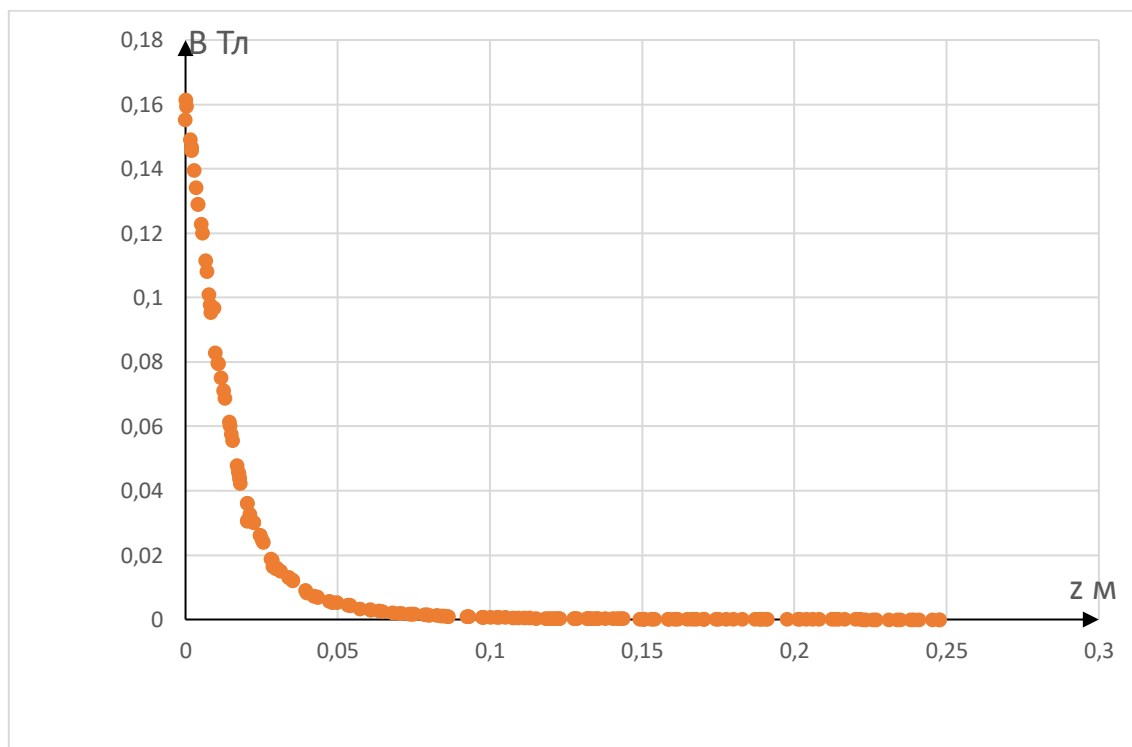


Рис 2. График теоретической зависимости индукции магнитного поля в зависимости от расстояния до магнита

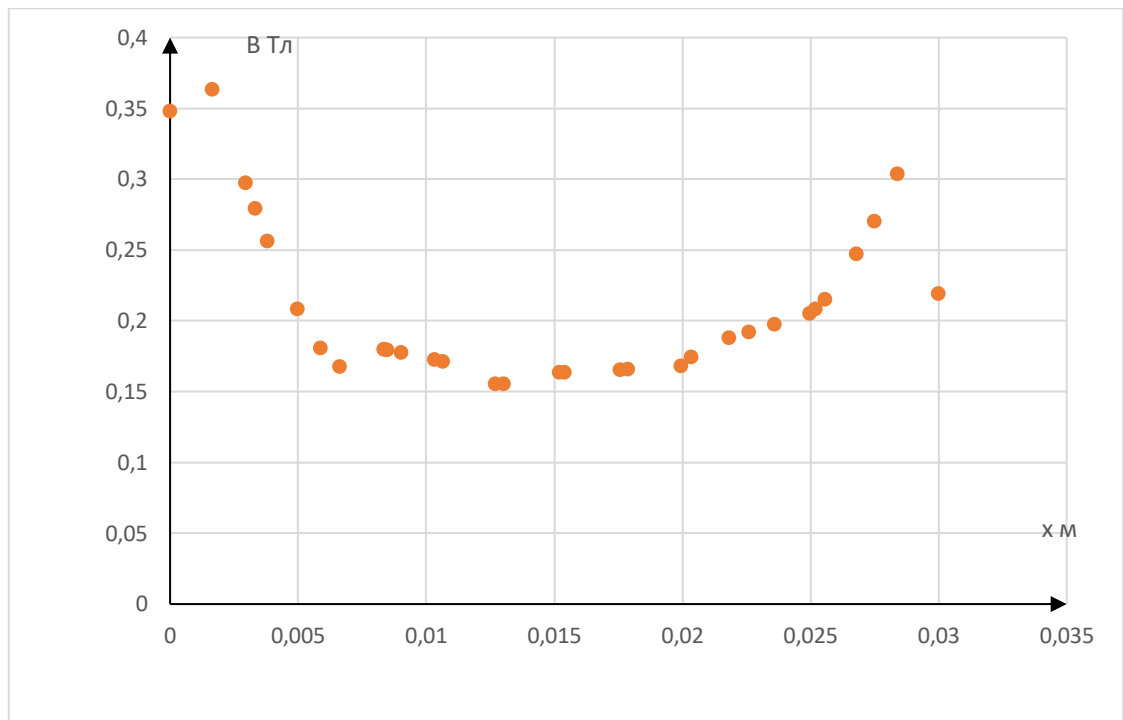


Рис 3. График теоретической зависимости индукции магнитного поля вблизи магнита от расстояния до края магнита

1.2.Анализатор

Рассмотрим подробнее устройство и принцип работы анализатора. Упрощенная схема устройства представлена на рисунке. Основным элемент анализатора – железный сердечник, в который встроены по три постоянных магнита, аналогичных рассмотренному в предыдущем пункте (магниты-сепараторы). Также в анализаторе имеется обдирочная фольга из графита толщиной около 10 нм, попадая на которую, нейтральные атомы с некоторым шансом могут потерять электрон и стать ионом. Далее ионы фокусируются электростатической линзой и ускоряются разностью потенциалов около 2 кВ. Затем ионы попадают в поле магнита-сепаратора, где за счет силы Лоренца изменяют свою траекторию

$$\mathbf{F} = \frac{q}{c} [\mathbf{v} \times \mathbf{B}]$$

Отклоненные ионы затем попадают на детектор, благодаря чему можно определить угол отклонения.

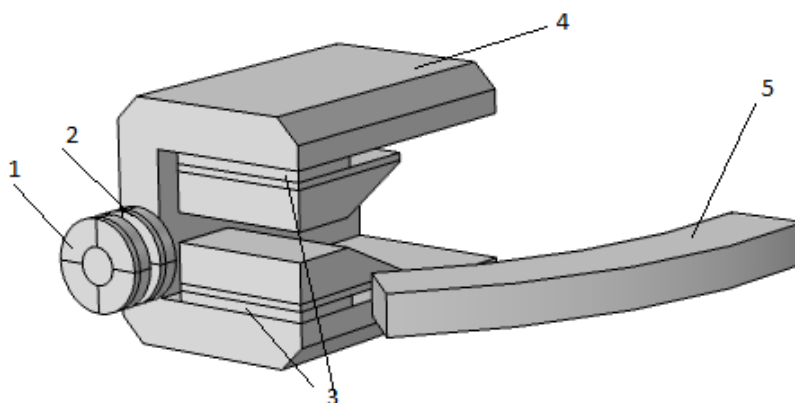


Рис 4. Упрощенная схема анализатора: 1 - обдирочная фольга, 2 - ускоряющие электроды, 3 - магниты, 4 - железный сердечник, 5 - детекторы

Из-за большой магнитной проницаемости железа, магнитное поле в основном сосредоточено внутри сердечника, поэтому будем измерять поле вдоль первоначального движения ионов (ось x)

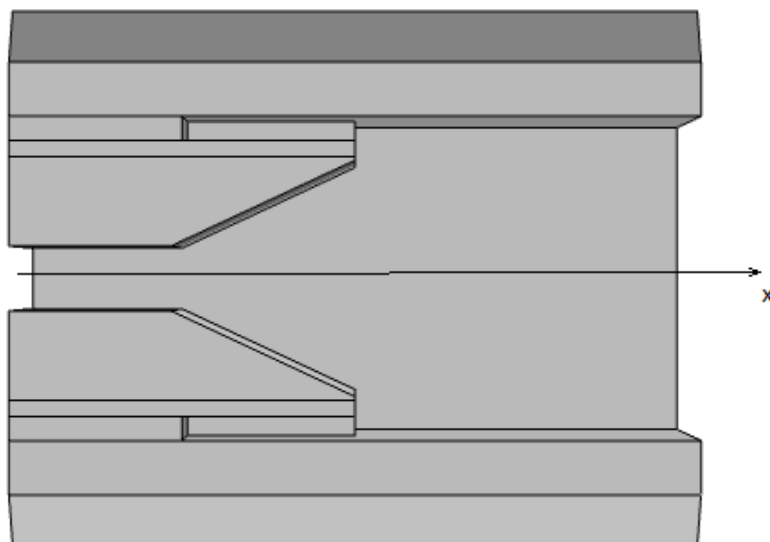


Рис 5. Железный сердечник

Для моделирования поля, также, как и в предыдущем случае, были заданы параметры магнитов, а также магнитные свойства вещества сердечника.

Был построен график теоретической зависимости поля индукции поля B от расстояния по оси x .

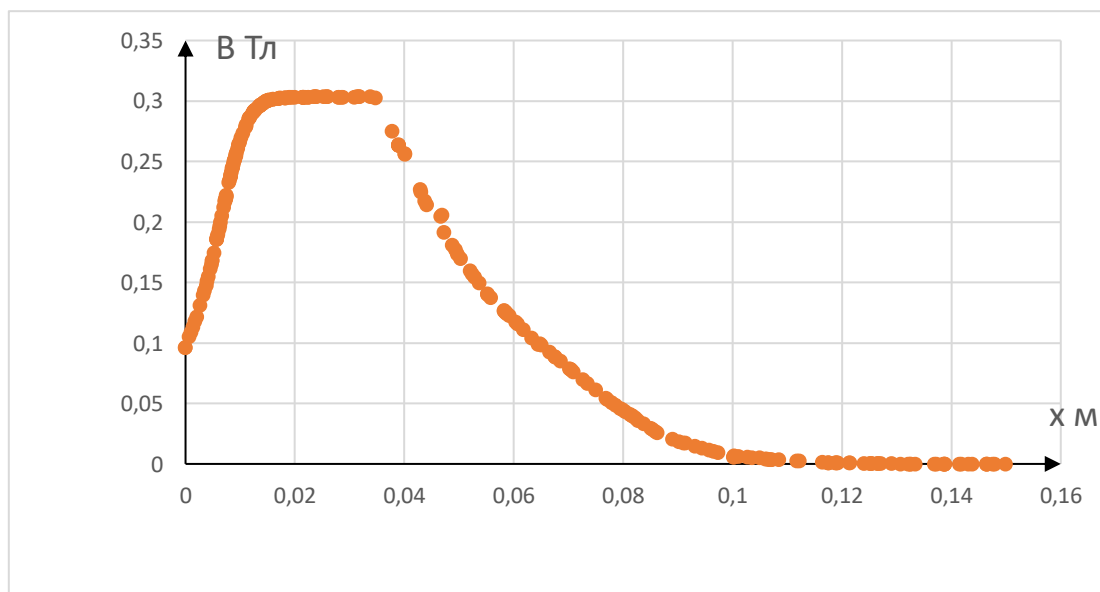


Рис 6. График теоретической зависимости индукции магнитного поля в анализаторе от расстояния по оси x

2. Экспериментальная часть

Измерение величины магнитного поля производилось с помощью специального прибора – тесламетр универсальный 43205. Принцип его работы основан на эффекте Холла[1]. Для проведения измерений датчик тесламетра был зафиксирован, и помощью линейки измерялось расстояние от датчика до магнита, или расстояние по оси x в анализаторе.

Измеренные значения индукции, представлены на графиках ниже.

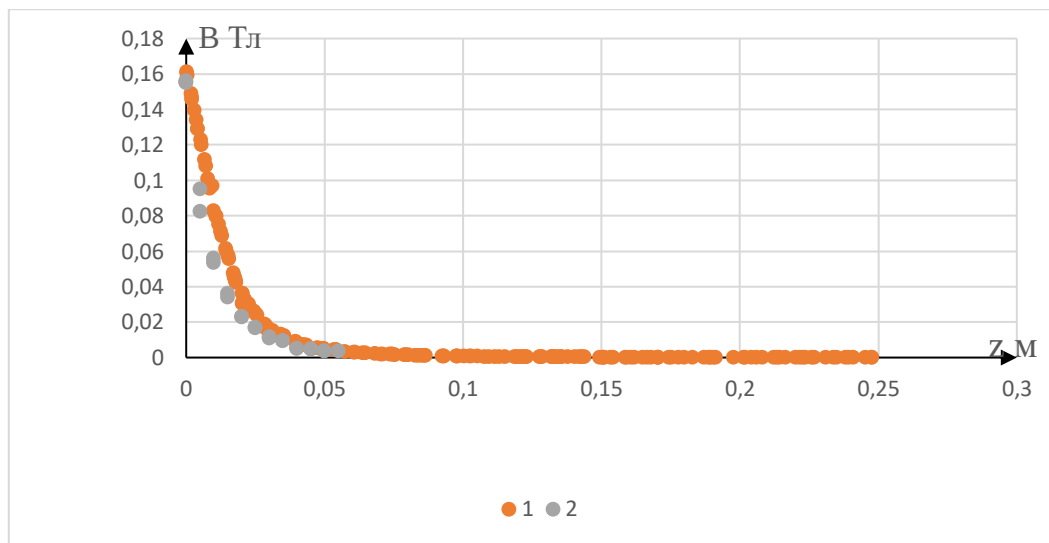


Рис 7. Графики зависимости индукции магнитного поля от расстояния до магнита: 1 - теоретический, 2 - экспериментальный

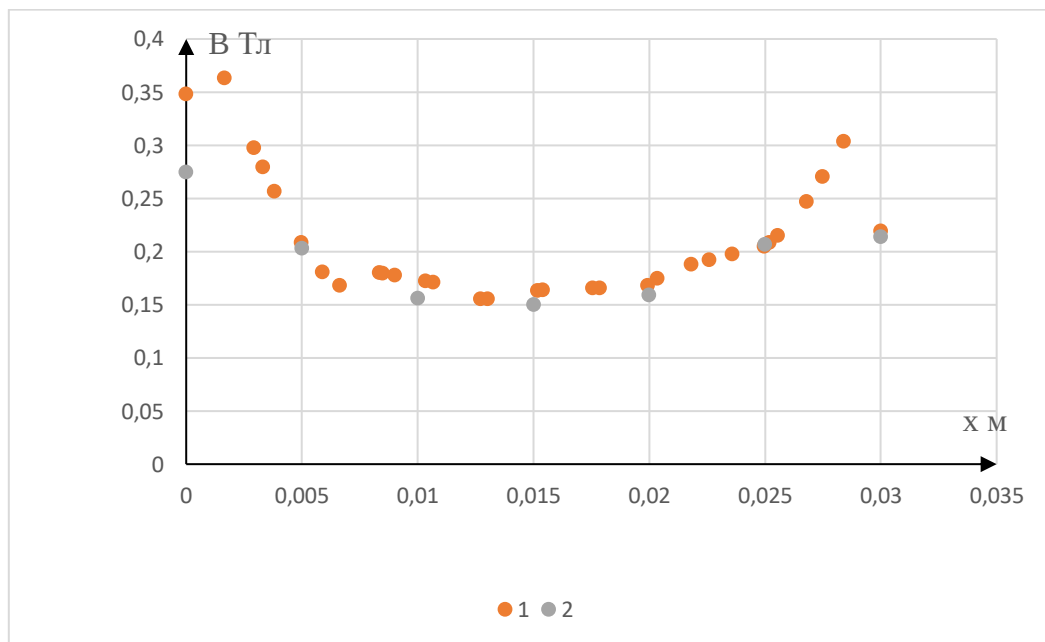


Рис 8. Графики зависимости индукции поля вблизи магнита от расстояния до края магнита: 1 - теоретический, 2 - экспериментальный

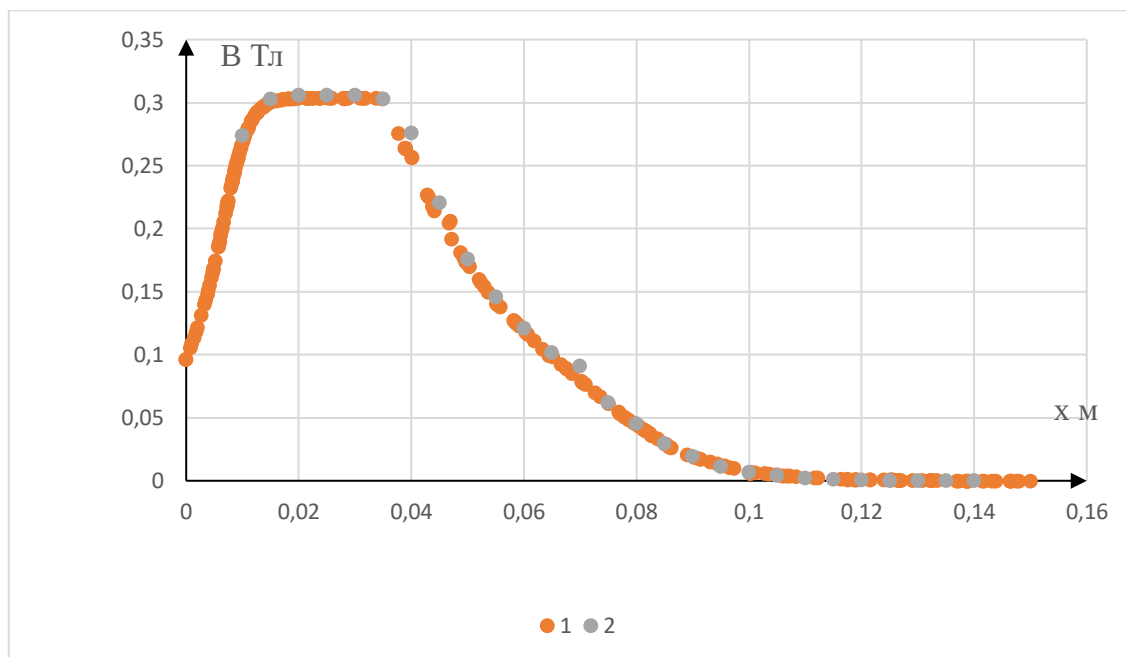


Рис 9. Графики зависимости индукции магнитного поля в анализаторе в зависимости от расстояния по оси x : 1 - теоретический, 2 – экспериментальный

Как видно из графиков, экспериментальные данные хорошо согласуются с теоретическими

3. Заключение

В результате выполнения данной работы были построены модели магнитных полей постоянного магнита и магнита анализатора. В ходе построения моделей мною были освоены основы моделирования электромагнитных полей. Также были измерены зависимости индукции поля магнита и поля внутри анализатора. Полученные результаты очень хорошо согласуются с теоретическими. Эти результаты могут быть полезны для написания программного обеспечения для анализатора для определения начальной энергии влетающих частиц по углу отклонения.

4. Список литературы

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Учеб. пособие: Для вузов. В 5 т. Т III. Электричество. – 6-е изд., стереот. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2018. – 656 с.
2. В.И. Давыденко, А.А. Иванов, Г. Вайсен. Экспериментальные методы диагностики плазмы
3. Анализаторы нейтральных атомов и их применение для диагностики горячей плазмы. ФИЗИКА ПЛАЗМЫ, 2009, том 35, № 7, с. 585–602