

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

Физический факультет

Кафедра общей физики

Коновалова Виктория Дмитриевна

КУРСОВАЯ РАБОТА

Измерение магнитного поля на установке КОТ

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19303

Научный руководитель:

с. н. с., к. ф.-м. н. Мурахтин С.В.

Оценка научного руководителя

5 (отл.)

«20» ноября 2020г.

Преподаватель практикума

к. ф.-м. н. Максимов В.В

Оценка преподавателя практикума

« _____ » _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к.т.н. В.Т. Астрелин

Итоговая оценка

« _____ » _____ 20__ г.

Новосибирск 2020

Аннотация

На осесимметричной ловушке КОТ (Компактный Осесимметричный Торонд) готовятся эксперименты, направленные на изучение удержания горячей плазмы с высоким относительным давлением β^1 в осесимметричном пробкотроне малого объема с мощной атомарной инжекцией, демонстрацию диамагнитного удержания и обращения ведущего магнитного поля [1]. Важной задачей является установить соответствие ожидаемых параметров магнитной системы с ее реальными значениями. Целью данной курсовой работы является измерение магнитного поля на экспериментальной установке КОТ и определение его соответствия расчетным параметрам. Для этого был изготовлен магнитный зонд, позволяющий локально измерять параметры ведущего магнитного поля на оси экспериментальной установки. Приобретённые с помощью него данные сравнивались с результатами аналитических оценок для напряженности магнитного поля. Полученные результаты хорошо согласуются с ожидаемыми.

Ключевые слова: магнитное поле, атомарная инжекция, горячая плазма, термоядерный синтез, магнитный зонд.

¹ $\beta = 8\pi P_{\perp}^2 / B^2$ – отношение поперечной составляющей давления плазмы к давлению магнитного поля.

Оглавление

Аннотация	
1. Введение.....	3
2. Основная часть	4
2.1 Экспериментальная установка.....	4
2.2 Измерение магнитного поля	6
2.3 Обработка экспериментальных данных.....	9
3. Заключение	11
4. Благодарности.....	12
5. Список литературы	13
Приложения	14

Введение

В ИЯФ СО РАН ведутся работы по строительству новой экспериментальной установки КОТ (Компактный Осесимметричный Тороид) или САТ (Compact Axisymmetric Toroid) [2]. На производственных мощностях института были изготовлены элементы магнитной системы новой экспериментальной установки. При этом могли быть допущены ошибки в изготовлении и сборке соленоидов, необходимых для создания ведущего магнитного поля. Так же могли быть допущены ошибки при монтаже магнитной системы, а именно коммутации соленоидов. Все это могло привести к тому, что магнитное поле, создаваемое на экспериментальной установке, может не соответствовать необходимым для успеха эксперимента значениям. Поэтому исключение этих ошибок является целью данной курсовой работы.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи: разработать методику измерения магнитного поля в экспериментальной установке КОТ, сконструировать и изготовить прибор, который позволит получить экспериментальные данные, произвести аналитические расчеты ожидаемого магнитного поля на оси установки и обработать полученные экспериментальные данные.

Для решения поставленных задач мной был сконструирован и собран магнитный зонд, позволяющий локально измерять направление и абсолютную величину импульсного магнитного поля в экспериментальной установке. Измерения проводились на оси магнитной системы в области расположения каждого соленоида. Результаты измерений сравнивались с аналитической моделью, построенной в приближении бесконечно тонкого витка с током. Анализ полученных данных позволяет говорить о хорошем соответствии выбранной аналитической модели с реальностью.

Основная часть

Экспериментальная установка

Экспериментальная установка КОТ состоит из центральной ячейки вакуумной камеры в которой расположен соленоид пробкотрона 4 (рис. 1), пушечного бака 5 с расположенным в нем генератором стартовой плазмы 12, соленоидом плазмоведа и термобарьерным сленоидом 13. Мишенная плазма в ловушке создается за счет заполнения термоизолированной плазменной струёй с развитой турбулентностью, центральной ячейки ловушки. Эта струя генерируется газоразрядным источником 12, расположенным в пушечном баке 5. Ожидается получение в центральной ячейке установки плазмы с плотностью 10^{13} см⁻³ и температурой до 50 эВ. В результате процессов ионизации и перезарядки мощных атомарных пучков, инжестируемых в центральной плоскости, на электронах и ионах мишенной плазмы происходит накопление популяции горячих ионов со средней энергией 9 кэВ. Экспериментальная программа направлена на оптимизацию сценария получения плазмоида 1 и развитие методов его стабилизации. Вакуумная система установки состоит из трех турбомолекулярных насосов, установленных в основной камере и в инжекторных трактах 10, системы титанового пыления и бака криооткачки 8. Она позволяет получить стартовый вакуум лучше 10^{-5} Па, что необходимо для успешного накопления достаточного азимутального тока.

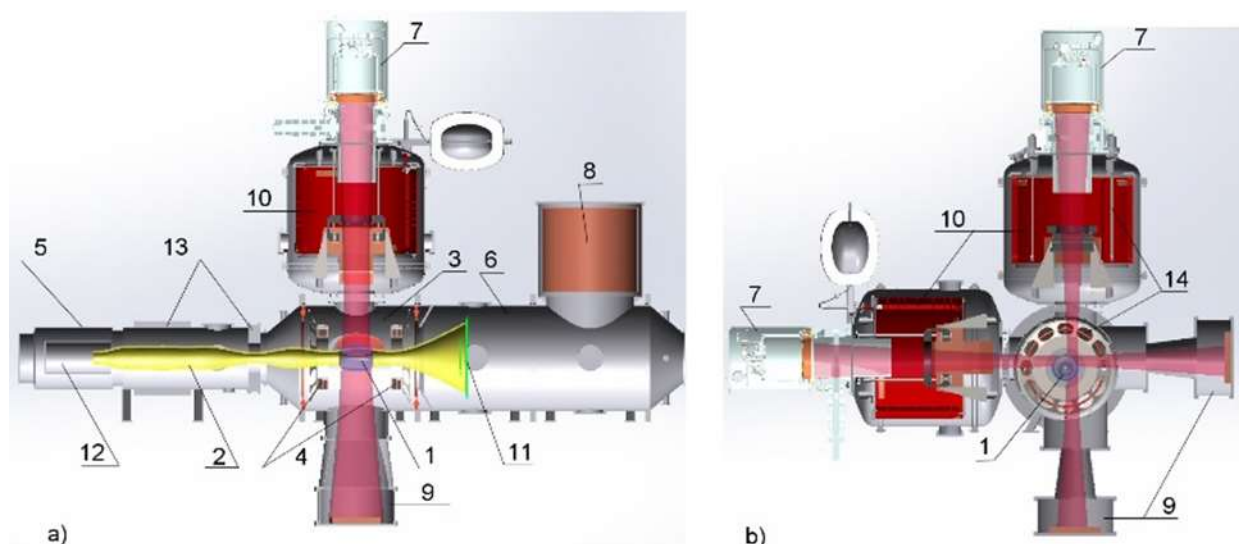


Рис.1 Экспериментальная установка САТ.

1 – FRC, 2 – мишенная плазма, 3 – центральная вакуумная камера, 4 – соленоиды пробкотрона, 5 – пушечный бак, 6 – камера плазмopриёмника, 7 – система атомарной инъекции, 8 – крионасос, 9 – баки приёмников атомарных пучков, 10 – инжекторный объём, 11 – плазмopриёмник, 12 – плазменная пушка, 13 – соленоиды формирования термобарьера, 14 – система титанового напыления.

Магнитная система установки состоит из шести соленоидов: двух пробкотронных 4, термобарьерного, двух плазмоводных 13 и соленоида пушки 12. Пушечный соленоид и термобарьерный питаются отдельно от остальных четырех соленоидов, соединенных последовательно. Технические характеристики системы катушек представлены в приложении 1.

2.2 Измерение магнитного поля

Для того, чтобы измерить магнитное поле в экспериментальной установке было принято решение использовать магнитный зонд. Эксперимент строился следующим образом: зонд перемещался вдоль магнитной оси экспериментальной установки. Плоскость тестовой катушки располагалась перпендикулярна магнитной оси. Затем производился «выстрел» (подача тока на систему катушек установки), в это время в тестовой катушке наводилась индукционная ЭДС, регистрируемую цифровым осциллографом. С использованием этих данных мы определили абсолютную величину магнитного поля и его направление.

Измерения магнитного поля было решено проводить в нескольких точках на оси установки. Количество и координаты этих точек определялись расположением портов, через которые было возможно поместить тестовую катушку и расположением соленоидов магнитной системы экспериментальной установки.

На рис.2 представлена характерная временная зависимость тока в соленоидах экспериментальной установки. Величина магнитного поля в точках измерения на оси установки примерно одинакова и находится в области 2 кГс. Этот факт позволил мне использовать один датчик для проведения всего комплекса измерительных работ.

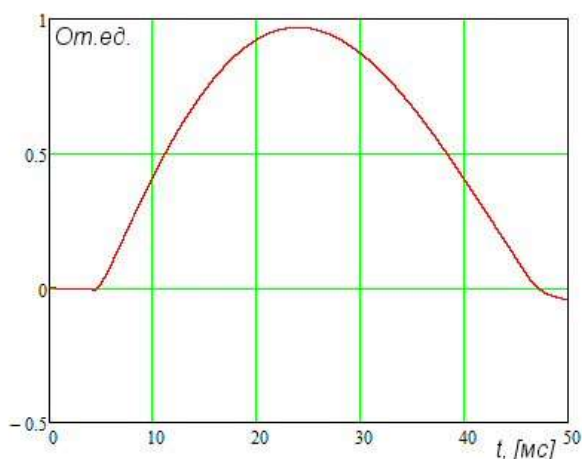


Рис.2 Временная зависимость амплитуды магнитного поля на оси в центральной плоскости установки.

Конструкция магнитного зонда была выбрана исходя из требований, предъявляемых к амплитуде измеряемого сигнала ($\sim 1\text{В}$) и геометрии диагностических портов. Самый маленький диаметр, который необходимо было преодолеть катушке, чтобы оказаться в нужном месте – 48 мм. Было решено изготовить катушку радиусом $R=18$ мм.

Изменение магнитного потока через тестовую катушку определяется следующим образом:

$\frac{d\Phi}{dt} = sN \frac{dB}{dt}$, здесь B – индукция магнитного поля в экспериментальной установке, а s – площадь поверхности катушки.

Преобразовывая это уравнение приходим к следующему:

$$\Phi = N \frac{T}{2\pi^2 R^2 B_0}$$

Магнитный поток мы принимаем равным единице (рассчитываем такие параметры тестовой катушки, чтобы на один вольт ЭДС самоиндукции, возникающего в катушке, приходилась $B = 1$ Тл). T – длительность импульса тока в соленоиде. Отсюда можно определить количество витков, необходимых для того, чтобы катушка имела нужные нам характеристики: $N = \frac{T}{SB_0 2\pi}$

После вычислений было получено, что катушка должна иметь 53 витка.

Зонд было решено изготовить из непроводящего материала – капролон и прикрепить его к деревянной основе, на которой нанести измерительную шкалу, для возможности установить тестовую катушку на нужные координаты на магнитной оси установки. Ниже на рис. 3 представлены фотографии изготовленного магнитного зонда.



Рис. 3 Магнитный зонд

2.3 Обработка экспериментальных данных.

Перед началом измерений, были проведены аналитические расчеты для оценки магнитного поля в установке в среде моделирования Mathcad. В каждой из выбранных точек на оси установки были рассчитаны значения магнитного поля в соответствии с аналитической формулой, которая отражает зависимость индукции магнитного поля соленоида от продольной координаты z на оси витка:

$$B(z) = \frac{1}{2} \frac{\mu I R^2}{(z^2 + R^2)^{3/2}}, \mu = 4\pi \times 10^{-7}, R - \text{радиус соленоида.}$$

При расчетах был использован тот факт, что вклады от различных соленоидов аддитивны.

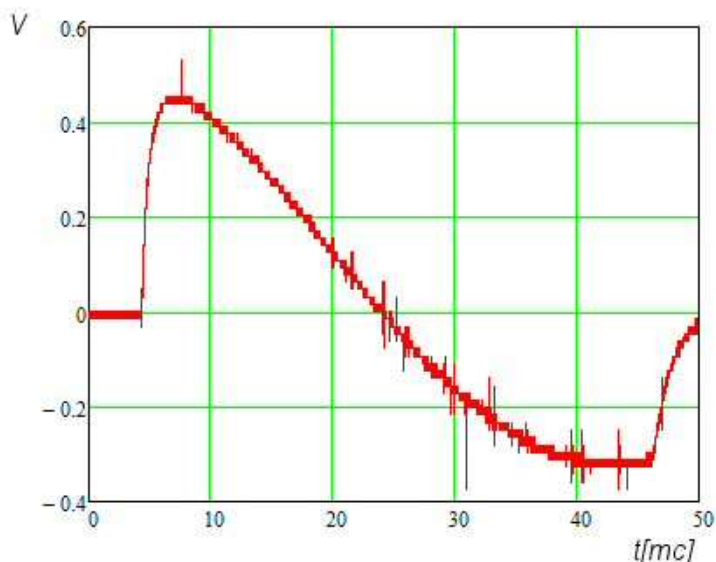


Рис.4 Сигнал с магнитного зонда

На рис.4 представлена характерная временная зависимость амплитуды напряжения, снимаемая с магнитного зонда. Восстановление локального значения магнитного поля производилось путем численного интегрирования данного временного ряда. Для восстановления значения магнитного поля, используя показания ЭДС индукции катушки, использовалась следующая формула:

$$B_i = \frac{1}{\pi R^2 N} \sum_{j=0}^i \varepsilon_j \Delta t$$

где $R = 1,8$ см, $N = 53$, $\Delta t = 10^{-7}$ с, i — номер отсчета.

На рис. 5 приведены результаты измерений магнитного поля. Красной линией нанесены значения магнитного поля в экспериментальной установке, вычисленные аналитически. Синими маркерами обозначены значения магнитного поля, полученные путем прямого измерения тестовой катушкой. Из графика можно сделать вывод о хорошем совпадении экспериментальных данных с расчетными.

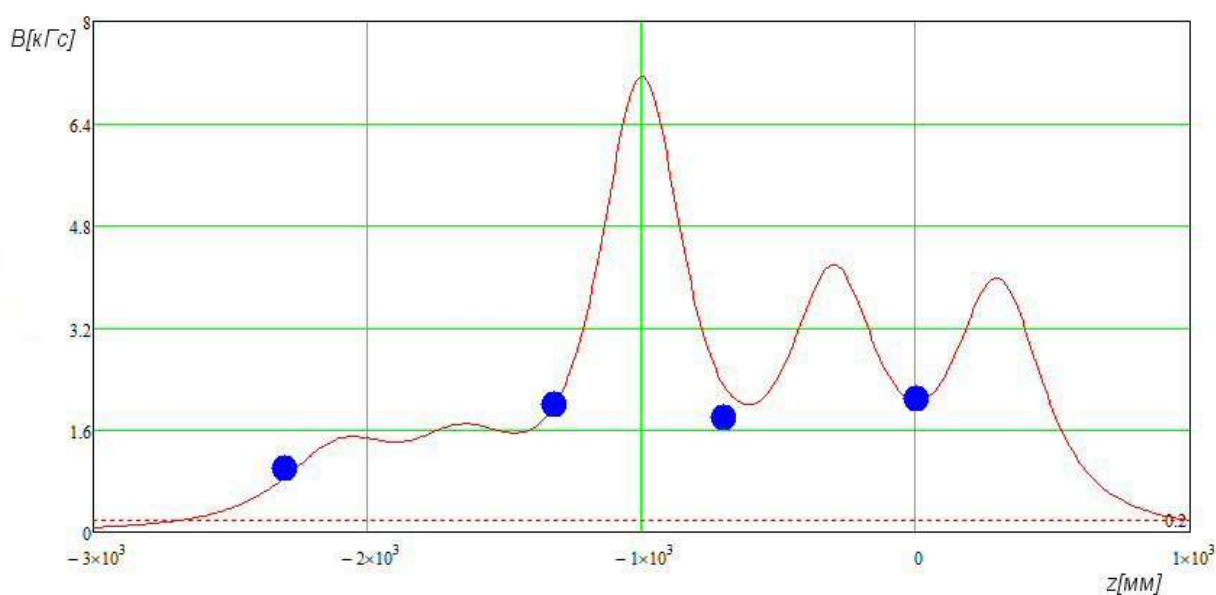


Рис.5. Напряженность магнитного поля на оси экспериментальной установки КОТ.

Полученные экспериментальные данные позволяют сделать вывод о соответствии параметров магнитной системы экспериментальной установки с техническим заданием. Это позволяет утверждать, что при изготовлении соленоидов магнитной системы на экспериментальном производстве не было допущено критических ошибок и при монтаже соленоидов не было ошибок, связанных с их коммутацией.

Заключение

В ходе выполнения курсовой работы в ИЯФ СО РАН мной были изучены основные методики измерения магнитного поля, получены практические навыки работы по конструированию магнитного зонда в среде SolidWorks и его изготовлению. Были проведены эксперименты по измерению магнитного поля на действующей установке. Полученные данные были обработаны в среде Mathcad и сравнивались с результатами численного моделирования. Полученные результаты говорят об отсутствии ошибок в изготовлении магнитной системы и коммутации каждого соленоида, входящего в эту систему.

Благодарности

Выражаю благодарность коллективу сотрудников лаборатории 9-1 за ценные дискуссии и советы. Особенно Бахареву П.А за помощь в работе при сборке зонда и проведении измерений.

Список литературы

1. A. V. Anikeev, P. A. Bagryansky, I. S. Chernoshtanov, M. S. Korzhavina, V. V. Prikhodko, and Yu. A. Tsidulko. Study of Microinstabilities in Anisotropic Plasmoid of Thermonuclear Ions, Proceedings of 8th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, 5-9 July, 2010, Novosibirsk, Russia, 2010, p.37.
2. P. A. Bagryansky, T. D. Akhmetov, I. S. Chernoshtanov, P. P. Deichuli, A. A. Ivanov, A. A. Lizunov, V. V. Mishagin, S. V. Murakhtin, V. V. Pikhodko, A. V. Sorokin, Status of the experiment on magnetic field reversal at BINP, 11th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, Book of Abstracts, p.15, 2016.

Приложения

Приложение 1. Основные параметры соленоидов установки КОТ

Катушки	R _{вн} утр., см	Z _{цен} тр, см	dR, см	dZ, см	IN, кА·вит ков	I, кА	N, витк ов	L, мГн	длин а шин ы L, м	R, мОм	$\Delta U =$ IR, В	сила F _z , Н
1. пробкотрон	20	30	10	8	148	1,85	80	3,88	126	27,0	50,0	-2303
2. пробкотрон	20	-30	10	8	148	1,85	80	3,88	126	27,0	50,0	-152
3. пробка/термо- барьер	15	-100	17,5	8	259	1,85	14 0	9,07	209	44,9	83,1	526
4. плазмовод	30	-165	4	8	59, 2	1,85	32	1,06	64	13,8	25,6	144
5. плазмовод	30	-210	4	8	59, 2	1,85	32	1,06	64	13,8	25,6	609
6. соленоид пушки	13,4	-260	0,9	41,5	186	3,0	62	0,53				1180