

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

Физический факультет

Кафедра общей физики

Колесниченко Константин Сергеевич

КУРСОВАЯ РАБОТА

Калибровка диамагнитных зондов на установке ГДЛ

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №18303

Научный руководитель:

д. ф.-м. н. Багрянский П.А.

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

к.ф.-м.н. Симонов А.А.

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к.т.н. Астрелин В.Т.

Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Новосибирск, 2019

Аннотация

Основная цель работы заключалась в проверке калибровки диамагнитных петель, установленных на газодинамической ловушке (ГДЛ) в ИЯФ СО РАН.

Для этого был создан соленоид, который входил в колебательный контур и генерировал величину магнитного потока, сравнимую с потоком, создаваемым плазмой при ее удержании. Параметры соленоида, были оценены теоретически, а затем, создан макет диамагнитной петли, находящейся на установке, на котором были подтверждены расчеты для необходимого магнитного потока в соленоиде. Затем соленоид был помещен в диамагнитную петлю на установке.

Были получены величины потоков через две петли, находящиеся на установке.

Сравнив данные полученные с петель, находящихся на установке, и вспомогательной петли можно сделать вывод о том, что петли откалиброваны правильно. В дальнейшем планируется оценивать энергию плазмы по данным полученным с диамагнитных петель.

Ключевые слова: диамагнитная петля, колебательный контур.

Оглавление

1. Введение	3
2. Теоретическая часть	4
2.1. Устройство и принцип работы диамагнитных зондов.	4
2.2. Устройство и принцип работы диамагнитных зондов с компенсатором.....	4
2.3. Колебания в RLC - контуре.....	5
2.4. Давление магнитного поля.	7
2.5. Расчет параметров RLC - контура.	8
3. Экспериментальная часть	9
4. Результаты и обсуждение	11
5. Выводы.....	13
6. Благодарности	14
7. Список литературы	14

1. Введение

Диамагнитные зонды являются актуальной методикой для вычисления газокINETического давления плазмы с помощью измерения магнитного поля, которое вытесняет удерживаемая плазма.

Простейший диамагнитный зонд представляет контур или катушку, внутри которых находится плазма. При изменении магнитного потока через зонд на выводах контура или катушки индуцируется ЭДС самоиндукции, пропорциональная производной магнитного потока, пронизывающего зонд. Таким образом, можно измерить магнитное поле, создаваемое плазмой.

Основная теория по поводу измерений с помощью диамагнитного зонда приведена в статье М.С. Чащина и И.А. Котельникова [1]. В данной статье показано, что по измерениям диамагнитного зонда можно вычислить энергосодержание плазмы, что является очень важной ее характеристикой. С помощью нее, зная, например, среднюю энергию частиц плазмы можно узнать концентрацию плазмы.

Цель данной работы – калибровка диамагнитных зондов, измеряющих магнитное поле, вытесняемое плазмой при ее удержании в газодинамической ловушке.

2. Теоретическая часть

2.1. Устройство и принцип работы диамагнитных зондов.

С помощью диамагнитного зонда производится измерение магнитного потока, пронизывающего контур. По закону Фарадея:

$$|\varepsilon| = \frac{1}{c} \left| \frac{\partial \Phi}{\partial t} \right|$$

Где ε – ЭДС индукции, возникающее при изменении потока, Φ – поток, пронизывающий контур. В свою очередь поток определяется интегральной формулой:

$$\Phi = \oint_S \vec{B}(t) \vec{dS}$$

Где $\vec{B}$ – магнитное поле, $\vec{dS}$ – вектор по модулю равный площади элементарной площадки, и направленный перпендикулярно ей.

Значит,

$$|\varepsilon| = \frac{1}{c} \left| \frac{\partial}{\partial t} \oint_S \vec{B}(t) \vec{dS} \right| = \frac{1}{c} \left| \oint_S \frac{\partial}{\partial t} \vec{B}(t) \vec{dS} \right| = \frac{1}{c} \left| \left\langle \frac{\partial}{\partial t} B_n \right\rangle S \right|$$

Где $\langle B_n \rangle$ – среднее значение проекции вектора магнитной индукции, перпендикулярной поверхности.

Таким образом, зная начальное поле в контуре, можно определить среднее значение в любой другой момент времени.

2.2. Устройство и принцип работы диамагнитных зондов с компенсатором.

В некоторых случаях требуется определить не абсолютное значение магнитного поля, а его отклонение от какого-то фонового поля. В частном случае требуется

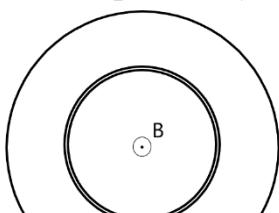


Рисунок 1. Схема диамагнитного зонда с компенсатором. 1 - основная петля, 2 - компенсатор.

найти поле, которое создает плазма, удерживаемая в более сильных полях по сравнению с полями, которые создает она сама.

Компенсатор – это катушка или контур, не охватывающий столб плазмы. На рис. 1 он обозначен цифрой 2. Количество витков в компенсаторе и основной петле подбирается так, чтобы в однородном поле потоки через них были равны. Таким образом, можно измерить поле, создаваемое плазмой, вычтя поток, пронизывающий компенсатор, из потока через основной диамагнитный зонд.

2.3. Колебания в RLC - контуре.

Пусть имеется контур с последовательно включенными индуктивностью L , емкостью C , сопротивлением R . На рис. 2 представлена схема такого контура:

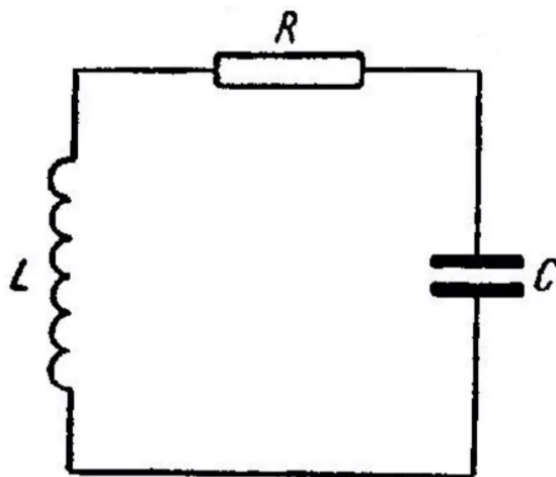


Рисунок 2. Колебательный контур

Тогда по второму правилу Кирхгофа:

$$0 = IR + L \frac{dI}{dt} + \frac{1}{C} \int I dt$$

Где I – сила тока в контуре, L – индуктивность катушки, C – емкость конденсатора, R – сопротивление резистора, t – время.

Найдем решения однородного уравнения. Будем искать решения в виде

$I = Ae^{\omega t}$, где A и ω – комплексные числа. Тогда

$$0 = Ae^{\omega t}R + LA\omega e^{\omega t} + \frac{1}{C} \frac{Ae^{\omega t}}{\omega} = R + L\omega + \frac{1}{C\omega}$$

Корнями данного уравнения являются:

$$\omega = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}$$

Общее решение этого уравнения – это линейная комбинация двух найденных решений.

$$\begin{aligned} I &= A_1 \exp\left(-\frac{R}{2L} + \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}\right)t + A_2 \exp\left(-\frac{R}{2L} - \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}\right)t \\ &= \exp\left(-\frac{R}{2L}t\right) \left(A_1 \exp\left(\sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}t\right) + A_2 \exp\left(-\sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}t\right) \right) \end{aligned}$$

В данной ситуации возможны два принципиально различных варианта:

$$1. (R/2L)^2 > 1/LC$$

В этом случае под знаком корня положительное число, следовательно, экспонента возводится в действительную степень, но при этом обе степени отрицательны. Значит решение будет иметь аperiодичный вид, и ток будет убывать, экспоненциально затухая.

$$2. (R/2L)^2 < 1/LC$$

В данном случае под знаком корня отрицательно число, следовательно, экспонента возводится в комплексную степень. Используя формулу Эйлера решение можно переписать в другом виде:

$$I = e^{-\frac{R}{2L}t} \left(C_1 \cos\left(\sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}t\right) + C_2 \sin\left(-\sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}t\right) \right)$$

Отсюда видно, что будут возникать затухающие колебания с частотой

$$\omega = \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}, \text{ при малом омическом сопротивлении контура } \omega \approx \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \text{ где } \omega_0 - \text{собственная частота контура.}$$

2.4. Давление магнитного поля.

Для понимания того, как с помощью измерения магнитного поля можно оценить энергосодержание плазмы, найдем давление магнитного поля на одну из стенок протяженного соленоида. Идея доказательства взята из учебника “Электричество и магнетизм” [2] (стр. 252-255). На рис. 3 представлена схема такой системы:

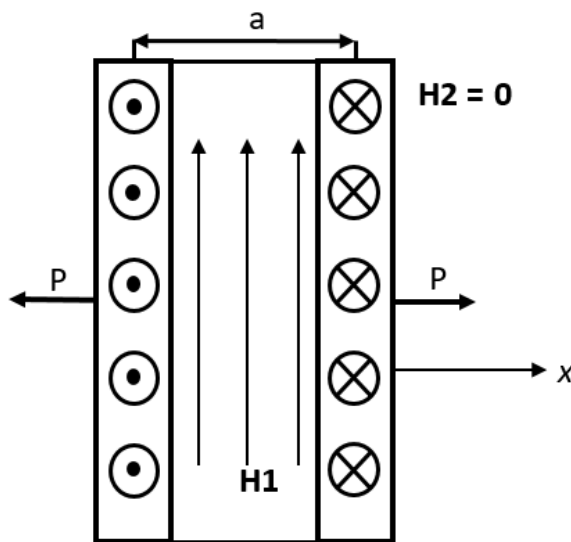


Рисунок 3. Давление магнитного поля на лист с током. H_1 – магнитное поле внутри между пластинами, H_2 – магнитное поле вне пластин, P – давление магнитного поля, действующее на лист с током.

Решить задачу можно, используя метод виртуальных перемещений. Пусть произведение $H_1 a = \text{const}$, для того чтобы поток через поперечное сечение соленоида был постоянным. Значит, ЭДС индукции возникать не будет при виртуальном изменении a на δa . Тогда изменять энергию поля

будет только внешние силы, уравнивающие давление магнитного поля. Энергия магнитного

поля на единицу площади определяется формулой:

$$W = \frac{a H_1^2}{8\pi}$$

Тогда изменение энергии:

$$\delta W = -p \delta a, \text{ где } p - \text{давление магнитного поля.}$$

С другой стороны:

$$\delta W = \delta \left(\frac{aH_1^2}{8\pi} \right) = \frac{H_1}{8\pi} a \delta H_1 = -\frac{H_1^2}{8\pi} \delta a$$

Тогда давление определяется выражением:

$$p = \frac{H_1^2}{8\pi}$$

А так как давление магнитного поля уравнивается газокинетическим давлением плазмы, то, зная разность давлений, можно определить энергосодержание плазмы.

2.5. Расчет параметров RLC - контура.

Необходимо было получить поток магнитного поля порядка Φ , и длительность порядка τ , потому что именно такие параметры потока и времени создает плазма при удержании.

Учитывая то, τ – это полупериод колебаний, тогда частота колебаний в контуре должна быть $\omega = \pi/\tau$. Значит, при условии, что омическое сопротивление цепи мало по сравнению с волновым $\rho = \sqrt{L/C}$, частота колебаний $\omega^2 = 1/LC$, следовательно, $LC = (\tau/\pi)^2$.

Если используется конденсатор с емкостью C , следовательно, индуктивность соленоида должна быть порядка $L = (\tau/\pi)^2/C$. Число витков соленоида находится по формуле $N = Lb/(\mu_0 S)$, где b – длина соленоида, S – площадь поперечного сечения соленоида, μ_0 – магнитная постоянная.

Пусть конденсатор заряжается до напряжения $U_{\max}$, тогда из закона сохранения энергии сила тока амплитуда силы тока, протекающего через контур, равна $I_{\max} = \sqrt{C/L} U_{\max}$.

Задав такие параметры системы, можно ожидать, что внутри соленоида будет величина напряженности магнитного поля $B = \mu_0 N I_{\max} / b = \mu_0 L b \sqrt{C/L} U_{\max} / (\mu_0 S b) = \sqrt{LC} U_{\max} / S = \sqrt{\frac{N \mu_0 C}{b S}} U_{\max}$.

Из всего вышесказанного, можно найти поток магнитного поля внутри соленоида и время импульса:

$$\Phi = BS = \sqrt{\frac{N\mu_0 SC}{b}} U_{max}; \tau = \pi\sqrt{LC} = \pi \sqrt{\frac{N\mu_0 SC}{b}}$$

3. Экспериментальная часть

Для калибровки диамагнитного зонда была собрана схема, представленная на рис.4.

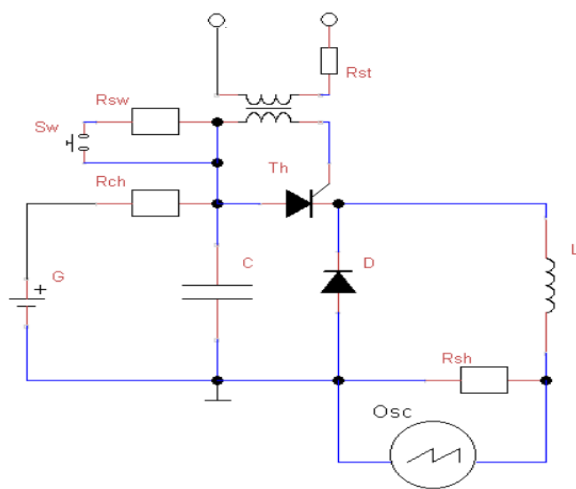


Рисунок 4. Схема колебательного контура для создания необходимого потока магнитного поля в диамагнитном зонде. G – источник постоянного напряжения, заряжающий конденсатор, C – конденсатор, L – соленоид, Osc – осциллограф HDO 4024AR, или АЦП, измеряющее ток в цепи, D – диод, Rsh, Rch, Rsw, Rst – известные сопротивления, Sw – кнопка запуска, Th – тиристор.

Для получения потока магнитного поля, сравнимого с потоком, который создает плазма, был собран RLC – контур. Регулируемый источник питания G может подавать на конденсатор постоянное напряжение до 300 В. Экспериментально была измерена индуктивность собранного соленоида $L = 1,3 \pm 0,01$ мГн. Зарядное сопротивление $R_{ch} = 3,2 \pm 0,2$ кОм подобрано так, чтобы характерное время зарядки электролитического конденсатора емкостью $C = 1100$ мкФ с погрешностью 20%, равное $RC = 3,5 \pm 0,8$ с, было много больше

$$2\pi\sqrt{LC} = 9 \pm 0,7 \text{ мс.}$$

Для запуска процесса формирования импульса тока в контуре в качестве ключа использовался тиристор ТЧ 125-10-464, открывающийся либо с помощью ручного запуска, либо посредством электрического импульса.

Также параллельно соленоиду был включен диод ДЧ 181-80Х-10, для того чтобы полярность напряжения на конденсаторе не изменялась.

Был собран соленоид диаметром $a = 16$ см и длиной $b = 106$ см. На него были равномерно накручены $N = 240$ витков медного провода, сечением $1,4 \text{ мм}^2$. Далее он был включен в схему, изображенную на рис. 4.

Поле соленоида было смоделировано на компьютере, и выяснено, что при данном количестве витков, длине и диаметре отношение потока магнитного поля через компенсатор к магнитному потоку через основную петлю не превышает 8%.

Осциллографом измерялось напряжение на шунтирующем сопротивлении $R_{sh} = 25 \pm 1 \text{ мОм}$. Зная это сопротивление, можно найти силу тока в контуре $I = U/R_{sh}$, где U – напряжение на шунтирующем сопротивлении.

Позже был создан макет диамагнитной петли с компенсатором, которую требуется откалибровать. Снята зависимость потока магнитного поля через петлю от силы тока в соленоиде. Также были получены зависимости потока через петлю от его расположения относительно соленоида. Макет перемещался по соленоиду, увеличивая количество витков, находящееся над ним от 0 до 100.

После необходимых предварительных измерений соленоид был помещен в вакуумную камеру ГДЛ для калибровки диамагнитных петель. Петля располагалась равноудаленно от концов соленоида. На соленоид было намотано несколько витков провода, с помощью которого измерялось истинное поле в соленоиде. С помощью осциллографа были измерены сигналы: тока соленоиде, ЭДС индукции на петле, ЭДС



В

10

Рисунок 5.
Экспериментальная установка
для калибровки петли.

индукции на петле после ее обработки АЦП, а поток магнитного поля в петле был посчитан программой, принимающей данные с АЦП, с учетом прошлой калибровки петли.

Схема диамагнитной петли, установленной на ГДЛ представлена на рис. 6. В данной схеме сопротивление R_d подобрано так, чтобы $R_1 + R_d = R_2$, где R_1 – сопротивление основной петли, R_2 – сопротивление компенсатора. Тогда по второму закону Кирхгофа:

$$E_1 + E_2 = Ir$$

где E_1 , E_2 – ЭДС индуцируемые в основной петле и компенсаторе соответственно, I – сила тока в этом контуре, $r = R_2 = R_1 + R_d$. Из этого уравнения можно получить, что $U_{32} = (E_1 - E_2)/2$, то есть половина той величины, которую необходимо проинтегрировать, чтобы получить поток магнитного поля.

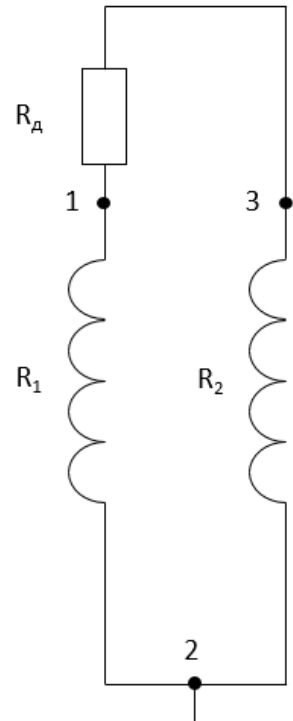


Рисунок 6. Схема диамагнитной петли на установке ГДЛ.

4. Результаты и обсуждение

Была снята зависимость амплитуды силы тока в соленоиде от начального напряжения на конденсаторе.

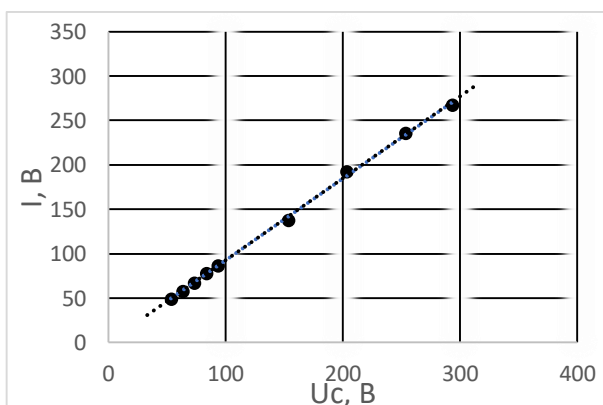
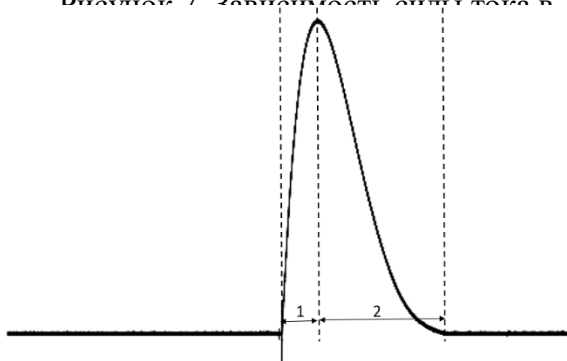


Рисунок 7. Зависимость силы тока от

Коэффициент наклона аппроксимирующей прямой $k = 0,92$ А/В, согласно теоретическим выкладкам из пункта 2.5 $k_{\text{теор}} = \sqrt{C/L} = 0,9 \pm 0,2$ А/В.

Зависимость силы тока через соленоид была такой же, как и



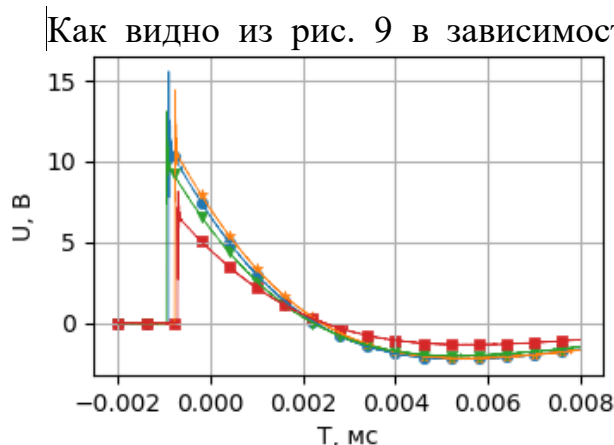
предсказывалось теоретическими выкладками.

На рис. 8 представлен характерный вид зависимости силы тока, протекающей через соленоид от времени. Участок 1 соответствует колебаниям в RLC – контуре, а точнее одной четвертой периода этих колебаний, т.е. процессу разрядки конденсатора с максимального значения до нуля. Участок 2 соответствует экспоненциально затухающему току,

Рисунок 8. Характерный вид зависимости силы тока через соленоид от времени. 1 – процесс разрядки конденсатора и синусоидального увеличения тока через соленоид, 2 – экспоненциальное затухание тока в соленоиде, замкнутого диодом.

протекающему через соленоид, так как после полной разрядки ток будет течь через диод, подключенный к нему параллельно (рис. 4). Такой же

вид имеет и зависимость потока магнитного поля в соленоиде от времени.

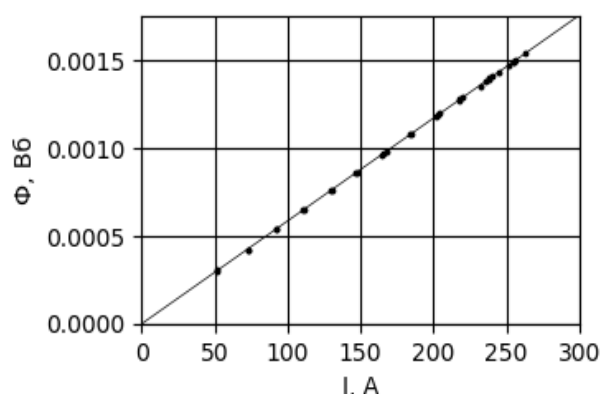


центру соленоида, тем поток больше (центр соленоида соответствует 120 виткам). Это явление возникает потому, что соленоид не идеальный и

Рисунок 9. Зависимость ЭДС индукции возникающей на концах диамагнитного зонда от времени. Квадратом помечен график при высоте зонда 0 витков, треугольником – 50, звездочкой – 80, кругом – 100.

часть магнитных линий выходит не через торец соленоида, а через его боковую поверхность, тем самым уменьшая поток через зонд. Поэтому, калибруя зонды на установке, я располагал соленоид так, чтобы петля была расположена над его серединой.

Также, измеряя отдельно потоки через основную петлю и через



компенсатор, выяснено, что отношения этих потоков не превышают 6%, что на 2% точнее, чем теоретическая оценка.

Была получена калибровочная зависимость потока магнитного поля в соленоиде от тока в нем (рис. 10). Зависимость линейная и аппроксимирована методом наименьших квадратов.

$$\Phi = 5,86 \cdot 10^{-6} \frac{B\phi}{A} I - 10^{-7} B\phi$$

Но для более точного расчета поток в соленоиде также был измерен при

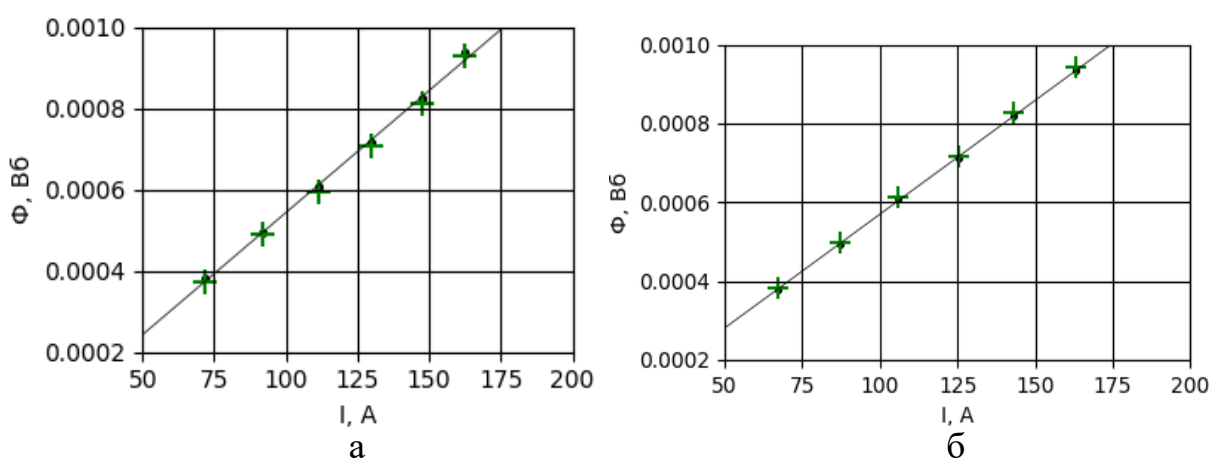


Рисунок 11. Зависимость потока от тока. Φ – поток в петле, I – ток в соленоиде. Крестом обозначены показания петли, точками обозначены показания катушки, намотанной непосредственно на соленоид. По данным катушки на соленоиде построена аппроксимирующая прямая. На рисунке а – центральная петля, б – петля, располагающая ближе к краю установки.

калибровке петли, так как в камере могли возникнуть токи Фуко, изменившие поток. Результаты показаний петель и измеренных потоков представлены на рис.11. Все показания прибора лежат в пределах погрешности 6%, вносимой компенсатором. Следовательно, петли были откалиброваны верно и введение дополнительных калибровочных множителей не требуется.

5. Выводы

В результате работы:

1. Исследованы характеристики, собранного соленоида.

2. Выяснено, что поток через диамагнитную петлю, зависит от ее положения относительно соленоида.
3. Найдена зависимость магнитного потока, пронизывающего соленоид, от силы тока в нем.
4. Выяснено, что калибровка диамагнитных зондов, работающих на установке ГДЛ верная и дополнительных коррекций не требует.

6. Благодарности

Автор выражает благодарность Субботину Валерию Германовичу за техническую помощь в создании соленоида и электрической схемы, используемой в эксперименте, а также Савкину Валерию Яковлевичу за теоретическую поддержку и разработку электрической схемы, используемой в эксперименте.

7. Список литературы

- [1] Котельников И. А. К теории диамагнитных измерений //Препринт/Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера (Новосибирск). – 2003.
- [2] Мешков И. Н., Чириков Б. В. Электромагнитное поле. Часть 1. Электричество и магнетизм. – Изд. 2-е, испр. и доп. // М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2014. – 544 с.