

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВА-
ТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИ-
ВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Козенко Ксения Валерьевна

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Исследование скин-эффекта на металлической пластине в поперечном
магнитном поле**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19301

Научный руководитель:

Гришин Юрий Акимович

Гольшева Елена Александровна

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

Виталий Тимофеевич Астрелин

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к.т.н. В.Т. Астрелин

Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Новосибирск 2020

Аннотация

Целью работы являлось исследование скин-эффекта на металлической пластине в поперечном магнитном поле и сопоставления полученных данных с теоретическим расчетом, несовпадение может быть вызвано сразу несколькими факторами.

Во-первых, ощутимый вклад вносят геометрические особенности пластины, так как расчеты будут более точным образом описывать эффект в проводах.

Во-вторых, это наблюдаемые в ходе эксперимента осцилляции, обоснование которым введенная нами математическая модель не дает.

Ключевые слова: скин слой, магнитное поле, скин-эффект.

Оглавление

1. Введение.....	4
2. Теоретическая часть.....	4
3. Экспериментальная часть.....	7
3.1. Описание установки.....	7
3.2. Методика проведения эксперимента	8
3.3. Результаты.....	8
4. Заключение	11
5. Список литературы	12

1. Введение

Скин-эффект — это эффект уменьшения амплитуды электромагнитных волн в зависимости от степени их проникновения внутрь среды проводника. Явление находит свое применение в разных сферах, его изучение в различных металлах, например, позволяет исследовать структуру горных пород. Несмотря на то, что эффект был открыт довольно давно, в конце 19 века, полного теоретического обоснования он так и не получил, что связано со сложностями составления математической модели, учитывающей достаточное количество факторов.

В рамках курсовой работы будет представлен один из вариантов описания, а также проведено сопоставление полученных в ходе эксперимента данных с теоретической моделью.

2. Теоретическая часть

Для построения теоретической модели сначала рассмотрим преломление волны на границе сред. Самое явление основывается на том, что в среде присутствуют частицы, либо связанные друг с другом, либо свободные. Тогда, при попадании в среду, поле волны действует на заряженные частицы, которые начинают двигаться, в результате чего и излучают электромагнитные волны. Как следствие, внутри среды мы наблюдаем интерференцию первоначальной и вторичных волн, что и приводит к определённым свойствам, которые мы наблюдаем. Рассмотрим ситуацию, когда на среду действует электрическое поле.

$$E = E_0 e^{-i(\omega t - kz)} \quad (1)$$

В силу большой инертности положительные частицы не успевают изменить своё положение. Как следствие запишем уравнения, в котором положительные ионы не изменяют своего положения, а смещение электрона описывается уравнением (2), где z — это смещение электрона под действием поля, e - заряд электрона, $(-kz)$ — это возвращающая сила, описывающая колебание электрона относительно положения равновесия, а $(-b\dot{z})$ — эффективная сила трения, важно отметить, что никакого классического объяснения этой силе нет, однако мы понимаем, что даже

если мы выведем электрон из равновесия в конце, он все равно вернется в исходное положение, а это значит, что он потеряет энергию.

$$m\ddot{z} = -kz - b\dot{z} + eE_0 e^{-i(\omega t - kz)} \quad (2)$$

Перепишем уравнение (2) с учетом замены ($p = e^*z$). Дипольный момент возникает из-за смещения электрона относительно ядра.

$$\ddot{p} + 2\sigma\dot{p} + \omega_0 p = \frac{eE_0}{m} e^{-i(\omega t - kz)} \quad (3)$$

Ищем решение в виде $p = p_0 e^{-i\omega t}$, с учетом предположения, что смещение электрона небольшое, то есть kz – это практически константа. Получим

$$p = \frac{eE_0}{m} \frac{e^{-i(\omega t - kz)}}{\omega_0^2 - \omega^2 - 2\sigma\omega i} \quad (4)$$

$$D = E + 4\pi N p \quad (5)$$

Из уравнений (4), (5) составим (6)

$$p = E \left(1 + \frac{4\pi N e^2}{m} \frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2 - 2\sigma\omega i} \right) = E \varepsilon \quad (6)$$

Перейдем к проводнику. Так как в нем электроны свободны, то возвращающая сила будет отсутствовать $\omega_0 = 0$, также необходимо обговорить, что в данном случае означает σ , $2\sigma = \frac{1}{\tau}$ (задает характерное время затухания), когда же речь о проводнике характерное время затухания – это фактически характерное время столкновения с частицами на которых происходит рассеяние энергии, то есть τ – это время свободного пробега электрона в проводнике. Из формул (7), (8), (9) найдем τ (10), где σ – проводимость, v – скорость частицы.

$$i = \sigma E \quad (7)$$

$$i = Ne v \quad (8)$$

$$v = \frac{m\sigma}{Ne^2} \quad (9)$$

$$\tau = \frac{m\sigma}{Ne^2} \quad (10)$$

Откорректируем выражение (4) с учетом вышеупомянутых рассуждений

$$n^2 = \varepsilon = 1 - \frac{4\pi\sigma}{\omega i(1 - i\omega\tau)} \quad (11)$$

Рассмотрим предельный случай $\omega\tau \ll 1$

$$n^2 \approx 1 - \frac{4\pi\sigma}{i\omega} \approx i \frac{4\pi\sigma}{\omega} \quad (12)$$

$$n = \frac{1+i}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{4\pi\sigma}{\omega}} = \sqrt{\frac{2\pi\sigma}{\omega}} (1+i) \quad (13)$$

$$k = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon\mu} = \frac{\omega}{c} n \quad (14)$$

Подставим в уравнение (1), волновое число (14), показатель преломления (13)

$$E = E_0 e^{-i\omega(t - \frac{n}{c}z)} = E_0 e^{-i\omega t} e^{\frac{i\omega}{c} \sqrt{\frac{2\pi\sigma}{\omega}} z} e^{-\frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{2\pi\sigma}{\omega}} z} \quad (15)$$

Рассмотрим выражение 15, первые 2 множителя с exp колебательного характера, однако последний множитель несет чисто действительный характер. Следовательно мы можем сказать, что чем дальше волна проходит вглубь среды, тем меньше становится её амплитуда. Магнитное поле обладает такими же характеристиками ввиду свойств электромагнитной волны, как следствие мы можем записать зависимость величины магнитного поля от глубины проникновения волны с поправкой на магнитную проницаемость среды. Данная связь подробно описана в задачнике (Скин-эффект в задачах — И. А. Котельников, В. С. Черкасский)

$$B = B_0 e^{-\frac{\sqrt{2\pi\sigma\mu\omega}}{c^2} z} \quad (16)$$

Из выражение (16) определил характерную глубину проникновения сигнала в среду

$$\delta_{\text{теор}} = z_0 = \sqrt{\frac{c^2}{2\pi\sigma\mu\omega}} \quad (17)$$

Подобный вариант теоретического описания был взят ради упрощения математический выкладок.

Далее приведем рассуждения необходимые для вычисления экспериментальной глубины.

Пусть $U_o(f) = \gamma B_o(f)$, где γ — это некий коэффициент, зависящий от характеристик металла, и его размеров пластины, U_o — входное напряжение, B_o — магнитное поле без пластины. Тогда

$$U_i(f) = \gamma B_i(f) \quad (18)$$

Ссылаясь на ур-ние (16) можем записать

$$\frac{U_i(f)}{U_o(f)} = \frac{\gamma B_i}{\gamma B_o} = e^{-\frac{z}{\delta_{\text{эксп}}}} \quad (19)$$

$$\delta_{\text{эксп}}(f) = \frac{z}{\ln\left(\frac{U_o(f)}{U_i(f)}\right)} \quad (20)$$

Где z – толщина пластины.

3. Экспериментальная часть

3.1. Описание установки

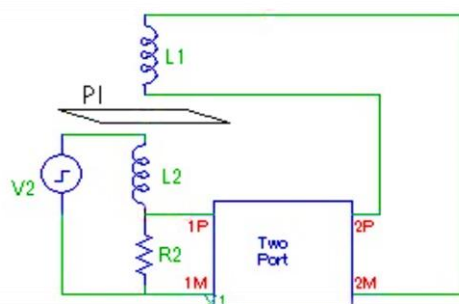


Рис1. Схема установки: L1, L2 – катушки индуктивности, V2 – источник переменного напряжения, P1 – пластина (образец), Two Port – осциллограф.

Принцип работы следующий: источник переменного напряжения создает переменный ток в нижней части цепи, что приводит к изменению потока в катушке L2, и как следствие к созданию магнитного поля, пронизывающего пластину P1 и катушку L1. В ходе этого, в катушке L1 возникает ЭДС индукции. Данное явление подробно описаны в учебнике (Сивухин Д.В. **Общий курс физики. Т. III. Электричество.** — М.: Наука, 1983).

Принцип измерения: для измерения показаний магнитного поля нам необходимо измерить ток, сделать это напрямую через катушку будет проблематично, так как для этого необходимо будет учитывать индуктивное сопротивление, зависящие от частоты тока, которая меняется в ходе эксперимента. Поэтому для измерения тока мы последовательно к катушке L2 подключаем резистор и снимаем показания напряжения уже с него. В верхней же катушке мы

измеряем ЭДС – производную от потока по времени. ЭДС пропорциональна частоте (от нее мы избавимся, когда будем делить ЭДС при одной и той же частоте с пластиной и без) и магнитному полю, параметры которого нам и необходимо установить. Еще присутствует коэффициент, связанный с геометрией катушки (число витков, площадь), но он и вовсе во всех измерениях постоянный.

3.2. Методика проведения эксперимента

Измерения проводились с 4 пластинами разной толщины из трех разных материалов: медной 0.01 см, пластины из нержавеющей стали 0.05 см, алюминиевой 0.05 см, алюминиевой 0.01 см, а также при отсутствии пластины на разных частотах. Измерения проводились на 2кГц, 5кГц, 10кГц и далее с интервалом в 10кГц до 200кГц включительно. При снятии показаний следует держать входное напряжение на определённой величине, однако практически это становится невозможным из-за наплыва напряжения, вызванного токами Фуко в пластине. В таком случае необходимо откалибровать полученные измерения относительно какого-то значения напряжения.

3.3. Результаты

Сравнения экспериментальной глубины скин-слоя с теоретической будем проводить с помощью графиков $\frac{\delta_{\text{эксп}}(f)}{\delta_{\text{теор}}(f)}$, $\delta_{\text{эксп}}(f)$, $\delta_{\text{теор}}(f)$.

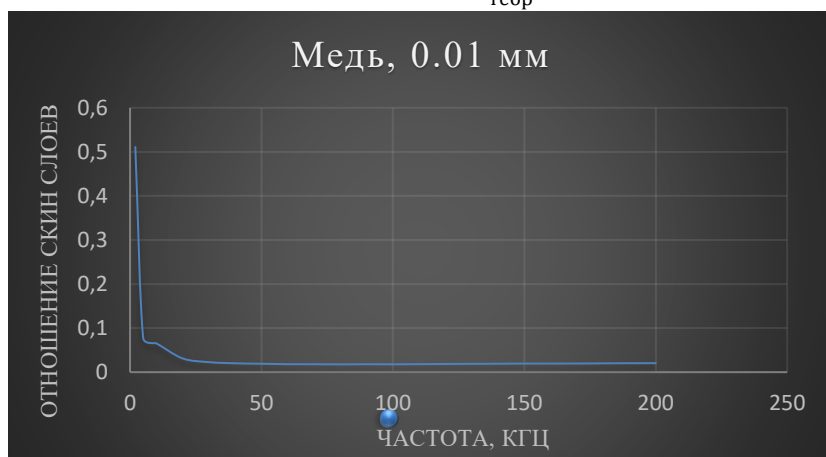


Рис.2. Зависимость отношения теоретической глубины скин-слоя к экспериментальной от частоты электромагнитной волны. В медной пластине толщиной 0.01 мм.

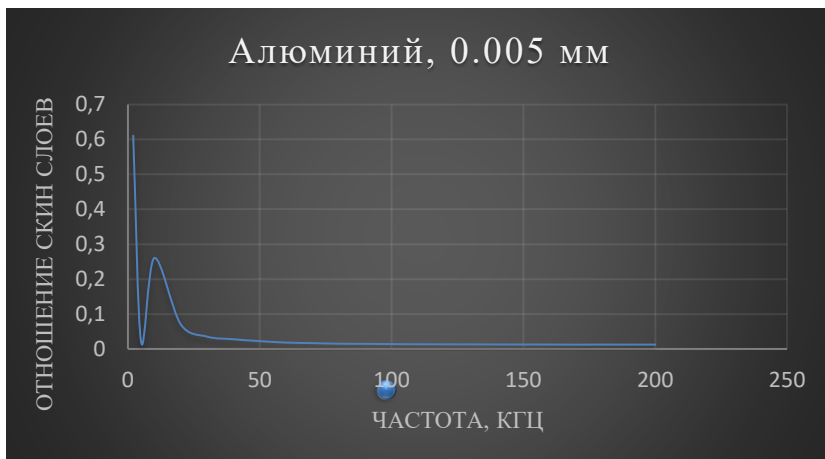


Рис.3. Зависимость отношения теоретической глубины скин-слоя к экспериментальной от частоты электромагнитной волны. В алюминиевой пластине толщиной 0.005 мм.

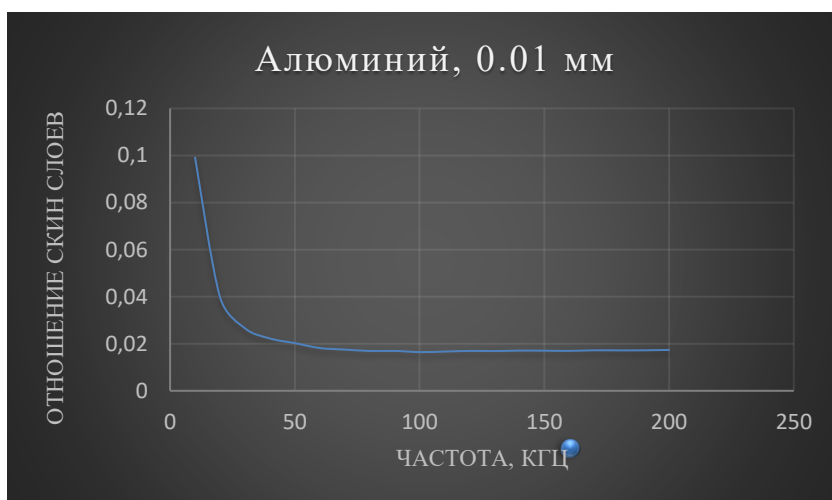


Рис.4. Зависимость отношения теоретической глубины скин-слоя к экспериментальной от частоты электромагнитной волны. В алюминиевой пластине толщиной 0.01 мм.

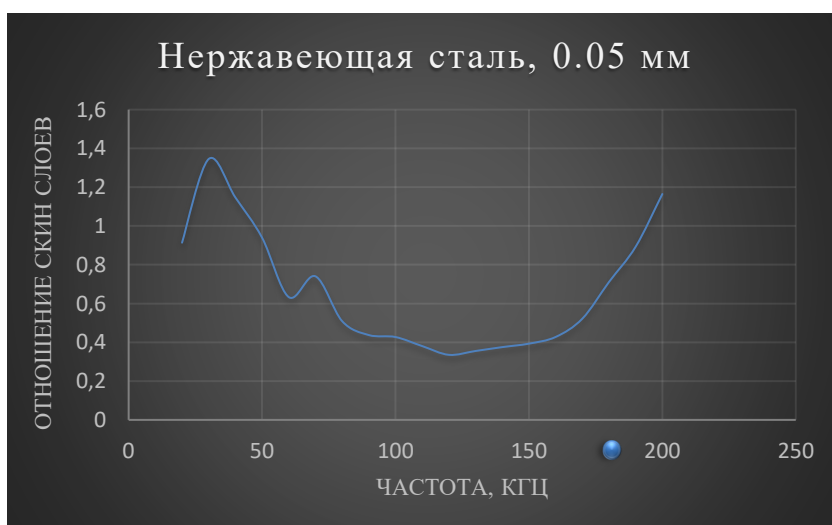


Рис.5. Зависимость отношения теоретической глубины скин-слоя к экспериментальной от частоты электромагнитной волны. В пластине из нержавеющей стали толщиной 0.05 мм

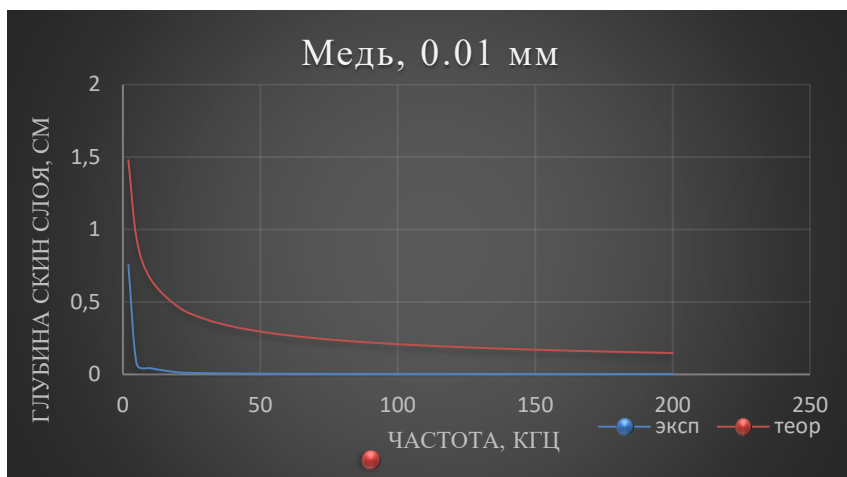


Рис.6. Зависимость теоретической и экспериментальной глубины скин-слоя от частоты электромагнитной волны. В медной пластине толщиной 0.01 мм.



Рис.7. Зависимость теоретической и экспериментальной глубины скин-слоя от частоты электромагнитной волны. В алюминиевой пластине толщиной 0.005 мм

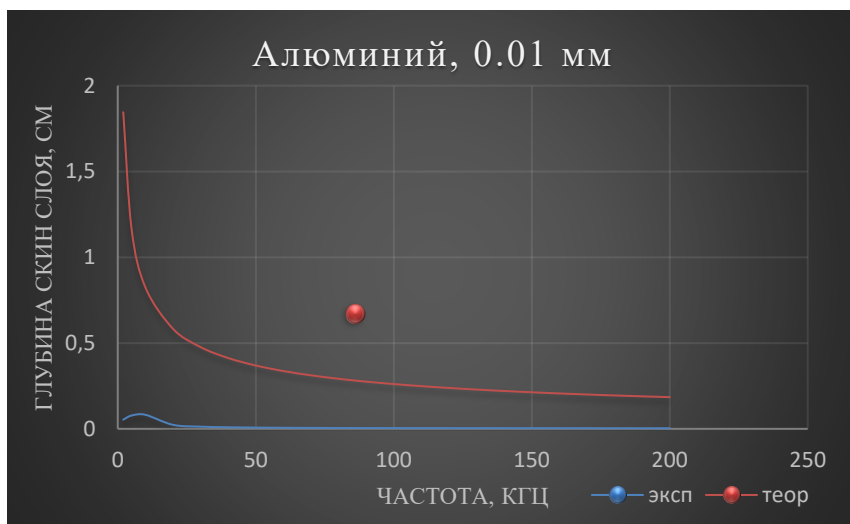


Рис.8. Зависимость теоретической и экспериментальной глубины скин-слоя от частоты электромагнитной волны. В алюминиевой пластине толщиной 0.01 мм



Рис.9 Зависимость теоретической и экспериментальной глубины скин-слоя от частоты электромагнитной волны. В пластине из нержавеющей стали толщиной 0.05 мм

4. Заключение

В результате исследования было рассмотрено 4 образца. Установлено, что для меди и алюминия характерно быстрое затухание волны, что совпадает с теоретическими данными, однако экспериментальные результаты показывают, что затухание происходит быстрее, чем ожидалось. Это может быть связано с геометрическими параметрами исследуемого материала. Никаких осцилляций не наблюдается. О возможности их появления мы можем судить, благодаря данным представленным в статье ([Radio frequency skin depth concerts in magnetic resonance — Richard R. Mett, Jason W. Sidebars, James S. Hyde](#)). Графики монотонны за исключением одной точки, представленной на рис. 3, измерение которой можно объяснить промахом в измерениях. В нержавеющей же стали все не так однозначно. В ней наблюдается смена характера монотонности, которая объясняется скачком $\delta_{\text{эксп}}$, связанный со скачком амплитуды, подобный эффект может

быть связан с особенностями прохождения электромагнитной волны через металл, в алюминии и меди мы такого эффекта не наблюдаем, в виду слишком быстрого затухания волны.

5. Список литературы

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. III. Электричество. — М.: Наука, 1983. § 144.
2. Radio frequency skin depth concepts in magnetic resonance — Richard R. Mett, Jason W. Sidebars, James S. Hyde
3. Скин-эффект в задачах — И. А. Котельников, В. С. Черкасский