



Рис. 3 Фотографии железных опилок вокруг листового проводника с током. Внешняя сторонагиба листа (слева). Внутренняя сторонагиба листа (справа)

Обнаружена форма силовых линий внутри проводника, зависящая от радиусагиба листа. При уменьшении радиусагиба появляются дополнительные полюса меняющие направления и начала линий магнитной индукции во внутреннем объеме проводника с током. Эксперимент показал, что силовые линии магнитного поля вокруг сложного профиля проводника с током не являются замкнутыми, и не лежат в перпендикулярной плоскости оси проводника.

Список литературы

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. М.: Высшая школа. 1988. 263 с.
2. Тамм И.Е. Основы теории электричества. Учебное пособие для вузов. М.: ФИЗМАЛИТ. 2003. 613 с.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Том 3. Электричество. Учебное пособие. 2009. 656 с.
4. Иродов И.Е. Электромагнетизм. Основные законы. М.: Бинум. Лаборатория знаний. 2009. 319 с.
5. Ландсберг Г.С. Элементарный учебник физики, Электричество и магнетизм. Том 2. М.: ФИЗМАЛИТ. 2019. 488 с.

ИЗМЕРЕНИЕ ОТКЛОНЕНИЙ СТРЕЛКИ КОМПАСА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ ПРЯМОЛИНЕЙНОГО С КРУГЛЫМ СЕЧЕНИЕМ ПРОВОДНИКА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Карякин А.А., Карякин А.В.

Георгиевский региональный колледж «Интеграл»,
Георгиевск, e-mail: kavo545@mail.ru

Уточнен опыт Ханса Кристиана Эрстеда с прямолинейным проводником постоянного тока и отклонением стрелки компаса тем, что величина тока увеличена до 2100 А, а в качестве стрелки использована длинная магнитная стрелка от буссоли. Уменьшено влияние магнитного поля Земли на отклонение стрелки расположением горизонтального проводника перпендикулярно силовым линиям магнитного поля Земли в направлении восток-запад, вместо

направления север-юг. Определены углы отклонения устойчивого положения концов стрелки компаса в магнитном поле проводника от плоскости перпендикулярной оси прямолинейного проводника в зависимости от направления тока. Экспериментально подтверждено, что силовые линии магнитного поля вокруг прямолинейного проводника не являются замкнутыми, не являются окружностями и не лежат в перпендикулярной плоскости оси проводника. Обнаружена пространственная форма силовых линий в виде конической винтовой линии, зависящая от направления тока в проводнике. Установлен шаг винтовой линии и направление развертывания силовых линий магнитного поля. Обнаружен принцип действия, на котором основано правило буравчика, приводящее к тому, что при вращении винта с правой нарезкой, происходит продольное перемещение винта в направлении тока, в направлении разворачивающихся силовых линий магнитного поля проводника.

В магнитном поле проводника с током магнитная стрелка компаса отклоняется. Впервые связь между электрическими и магнитными явлениями установил Ханс Кристиан Эрстед в 1820 году, проведя известный опыт [1]. Согласно наблюдению при включении тока в проводнике расположенная рядом магнитная стрелка устанавливалась перпендикулярно проводу. При изменении направления тока стрелка поворачивалась на 180°.

Стрелка компаса позволяет определить в пространстве направление вектора магнитной индукции в отличие от визуализации с помощью железных опилок или мнемонических правил: правила левой руки, правила буравчика. Погрешность от использования железных опилок для визуализации магнитного спектра вызвана появлением вторичной намагниченности железа и изменению формы силовых линий проводника, представлено на рис. 1.



Рис. 1. Искривления силовых линий железными опилками над горизонтальным проводником.
 А – искажение в центре между полюсами магнита из цепочек железных опилок.
 Б – искажение силовых линий в перпендикулярной плоскости к оси проводника

Железные опилки представляют собой маленькие магниты, которые под воздействием внешнего магнитного поля поворачиваются и группируются в цепочки магнитов. Образующиеся группы магнитов формируют собственное поле, которое взаимодействует с другими магнитными полями. В результате появления дополнительного магнитного поля силовые линии проводника искривляются в двух направлениях. Погрешности при использовании железных опилок не могут быть устранены и их использование в исследованиях силовых линий нецелесообразно.

Целью исследования является уточнение классического опыта Эрстеда с достижением предельного уровня тока в проводнике и измерение направления силовых линий магнитного поля с помощью магнитной стрелки с точностью до $0,5^\circ$.

Материалы и методы исследования

Магнитное поле, как одна из компонент электромагнитного поля, создается неизменными во времени токами, протекающим по проводящему телу, неподвижному в пространстве по отношению к наблюдателю [2]. Индукция магнитного поля бесконечного прямолинейного проводника с током согласно [3], описывается уравнением:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I}{b}, \quad (1)$$

где b – соответственно кратчайшее расстояние до проводника, а I – ток в проводнике.

Повышение тока в проводнике приводит к нескольким важным положительным результатам. С ростом тока пропорционально возрастает напряженность магнитного поля вокруг проводника. Известно, что общая напряженность магнитного поля складывается из различных магнитных полей. При малом уровне тока в проводнике необходимо учитывать влияние естественного магнитного поля Земли на отклонение стрелки. Магнитное поле Земли на широте 44° составляет величину 45-55 мкТл. Увеличение уровня тока позволяет достичь уровня

магнитного поля проводника на порядок выше уровня магнитного поля Земли, и дополнительному снижению погрешности от влияния других «второстепенных» магнитных полей.

Известно, что большая напряженность магнитного поля увеличивает момент сил, влияющих на стрелку, и приводит к уменьшению колебательных переходных процессов при повороте стрелки. При низкой напряженности поля стрелка компаса аналогична медленно затухающему маятнику, где любое внешнее воздействие приводит к появлению колебаний.

Магнитная стрелка компаса ориентируется вдоль силовых линий магнитной индукции. Линиями магнитной индукции называют кривые, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора B в этой точке [4]. Известно, момент сил, действующих на стрелку или контур с током, зависит от угла α между силовыми линиями и направлением стрелки.

$$M = p_m \cdot B \cdot \sin \alpha,$$

где p_m – магнитный момент стрелки.

В классическом опыте Эрстеда проводник и стрелка располагались в направлении север-юг. При включении тока стрелка поворачивалась перпендикулярно проводнику. Однако, именно такое расположение приводит к большей погрешности, т.к. на стрелку в таком положении действует максимальный магнитный момент поля Земли. В данном исследовании минимизация влияния магнитного поля Земли достигается первичным расположением проводника перпендикулярно силовым линиям магнитного поля Земли. При включении тока стрелка поворачивается параллельно направлению север-юг и тогда момент поля Земли минимален, $\sin \alpha \rightarrow 0$. Таким образом, рассчитывать и находить магнитный момент стрелки не требуется.

Размещение стрелки рядом с горизонтальным проводником и ориентированной вдоль силовых линий магнитного поля Земли приводит к интересному парадоксу. Обнаружено, что существует устойчивое состояние стрелки компаса противоположное направлению силовых линий магнитного поля проводника. Для начала поворота стрелки на 180° необходим дополнительный внешний импульс. Данный парадокс появляется в случае, когда северный конец стрелки указывает на северный магнитный полюс Земли, и остается прежним даже при появлении противоположного более сильного магнитного поля.

Известно, что стрелка компаса является магнитом, поэтому использование одновременно нескольких стрелок может привести к взаимодействию их полюсов [5]. В эксперименте используется только одна магнитная стрелка вокруг одножильного медного проводника круглого сечения 50 мм^2 . Медь выбрана в качестве токоведущей части проводника из-за её низкой намагничиваемости. Использование стальных

или алюминиевых токоведущих частей приводит к вторичной намагничиваемости самого проводника, поэтому они не используются в эксперименте. Наружное размещение проводника снижает влияние магнитных полей металлических конструкций зданий, внутренней проводки, мебельной фурнитуры. Для исключения влияния намагничивающихся сред горизонтальный проводник размещен на высоте 2 метра от поверхности Земли. Окружающая температура воздуха 22 °С. Источником тока являются аккумуляторные батареи 12В 100А/ч в количестве 8 единиц, соединенных параллельно. В качестве тесламетра использован датчик АК09918 с диапазоном измерения 0-4911 мкТл в устройстве Asus ZB-602KL. Измерения индукции проведены в программе phyphox versia 1.1.2, ОС: Android v.9.

Индукция магнитного поля бесконечного прямолинейного проводника с током рассчитывается по формуле (1). Для 4 метрового проводника в середине участка на расстоянии 10 см от оси проводника индукция магнитного поля рассчитывается по формуле:

$$B_k = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I}{b} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2).$$

Здесь α_1 и α_2 – углы между элементами тока на концах проводника и точки, в которой определяется магнитная индукция. $\alpha_1 = 1,43^\circ$, $\alpha_2 = 178,57^\circ$.

При токе 950А на расстоянии 10 см от оси проводника абсолютная погрешность $\Delta B = B - B_k$ составит $5 \cdot 10^{-7}$ мкТл. Абсолютная погрешность при длине проводника более 4 метров пренебрежительно мала. Теоретическая и экспериментальная индукция магнитного поля, представлены на графике рис. 2. Теоретические значения рассчитаны только для магнитного поля проводника. Экспериментальные значения включают суммарную индукцию всех магнитных полей, обнаруженных тесламетром в пространстве. Превышение экспериментальных значений над теоретическими вызвано, вторичной намагничиваемостью корпуса и деталей измерительного устройства. При проведении измерений с магнитной стрелкой корпус устройства с датчиком тесламетра удален на расстояние 10 метров.

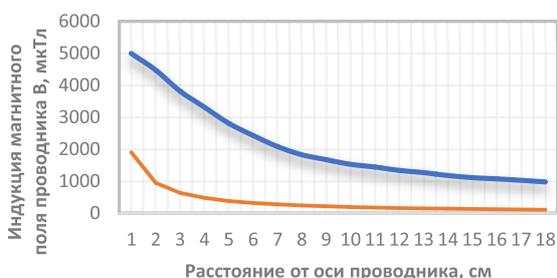


Рис. 2. Теоретическая (нижняя) и экспериментальная (верхняя) индукция магнитного поля при величине постоянного тока 950 А

В исследовании использована магнитная стрелка от буссоли ОБК. В ходе эксперимента выявлена намагничиваемость корпуса буссоли, которая приводит к случайному отклонению положения стрелки. Данная погрешности не может быть устранена при проведении измерений с помощью цельного комплекта буссоли. При измерениях стрелка извлечена из намагничивающегося корпуса буссоли и используется отдельно. Стрелка представляет собой длинную узкую железную полосу, с выраженными полюсами на конце. В качестве оси стрелки используется медная игла длиной 7 мм, закрепленная на пластиковом немагнитном основании. Длина стрелки составляет 140 мм, цена деления 0,5°. Обычные туристические компасы со стрелками длиной 4 см имеют цену деления 5-10°. Точность измерений обычными компасами на порядок ниже применяемой стрелки от буссоли ОБК.

Для снижения погрешности вызванной неправильной балансировкой и разной длиной северного и южного конца стрелки производилось перемагничивание полюсов стрелки и измерения повторялись.

Рассмотрены два варианта закрепления стрелки компаса на игле сверху и на нитяном подвесе. Использование иглы в качестве оси, позволяет точнее установить расстояние до проводника, провести измерения ближе к проводнику. Использование нитяного подвеса стрелки приводит к тому, что при включении тока стрелка отклоняется и притягивается к проводнику, появляются качания и проведение измерения усложняется.

Результаты исследования и их обсуждение

В ходе эксперимента подтверждено что, как и в опыте Эрстеда при горизонтальном положении проводника стрелка туристического компаса, размещенная над или под проводником с током, поворачивается в устойчивое положение близкое к перпендикулярной плоскости оси проводника [6]. Обнаружено, что при использовании более точной стрелки от буссоли, проявляется отклонение северного конца стрелки в сторону направления тока, а южного конца в сторону противоположную направлению тока (рис. 3). Направлением тока принимается движение заряженных частиц от «+» к «-» [7].

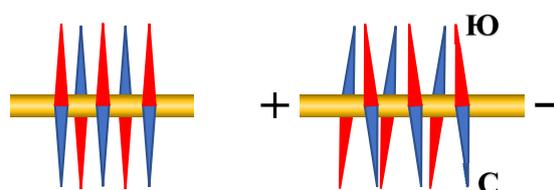


Рис. 3. Теоретические (слева) и экспериментальные (справа) положения стрелки сверху и снизу горизонтального проводника. Северный конец стрелки отмечен синим цветом. Южный конец стрелки отмечен красным цветом.

Величина отклонения между концом стрелки и перпендикулярной линией к проводнику составляет 2 мм или угол $1,6^\circ$. Угол между направлением тока и северным концом стрелки составляет $88,4^\circ$. При изменении направления тока величина угла между направлением тока и северным концом стрелки не изменяется, при этом стрелка разворачивается на 180° . Расположенная стрелка над проводником, демонстрирует такой же угол отклонения, как и в случае расположения стрелки под проводником.

Анализируя поведение стрелки, которая указывает направление силовых линий заключаем, что силовые линии не замкнуты. Установлено, что силовые линии представляют собой винтовую линию, которая совпадает с направлением тока и имеет шаг $4 \pm 0,5$ мм. Тип винтовой линии правосторонний. Подтверждено правило буравчика, что при вращении винта с правой нарезкой, совпадающей с направлением тока, происходит продольное перемещение винта также в направлении тока. Направление резьбы буравчика совпадает с направлением силовых линий проводника. Вращение буравчика в правую сторону соответствует направлению силовых линий и направлению тока. Обнаруженный шаг винтовой линии обусловлен дрейфовой скоростью заряженных частиц в проводнике, составляющей несколько мм/с.

В эксперименте исследованы силовые линии магнитного поля вертикального проводника, располагая стрелку компаса в плоскости перпендикулярной оси проводника. Установлено, что направление стрелки не совпадает с горизонтальной плоскостью, при короткой оси стрелки один из концов стрелки наклоняется и касается горизонтальной поверхности. Измерены отклонения при увеличенной длине оси стрелки над горизонтальной поверхностью. Установлено, что стрелка от буссоли не позволяет проводить исследования в радиусе 7 см от проводника. При расстоянии менее 7 см «южный» конец стрелки поворачивается и касается проводника. Известно, что при удалении от проводника напряженность магнитного поля ослабевает, поэтому были предприняты меры по увеличению силы тока до 2100 ампер. Теоретическая величина магнитного поля в радиусе 8 см от проводника составляет 525 мкТл.

На расстоянии 12 см от проводника напряженность снижается до 350 мкТл. Экспериментальное положение стрелки показано на рис. 4.

Установлено, что направление стрелки, а следовательно, и силовые линии вокруг проводника на расстоянии 5–9 см имеют смещение в сторону проводника, что позволяет сделать вывод о раскручивающейся форме силовых линий. Величина отклонения конца магнитной стрелки от перпендикулярной линии к проводнику, проходящей через ось стрелки различно. На расстоянии 7 см составляет не менее 10 мм

или угол отклонения 8° . При увеличении расстояния от оси стрелки до проводника величина смещения уменьшается. При приближении к проводнику оси стрелки величина отклонения увеличивается.

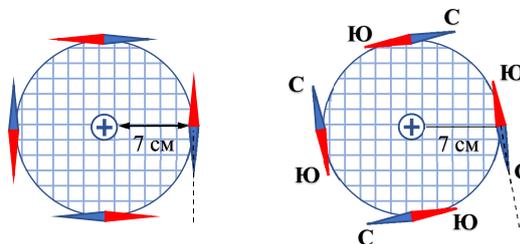


Рис. 4. Теоретические (слева) и экспериментальные (справа) положения стрелки компаса вокруг проводника с током. Стрелка компаса вращается в плоскости перпендикулярной проводнику

Теоретическая форма силовых линий всегда представляется в виде проекции окружности на перпендикулярной плоскости к оси проводника, кроме того, считается что магнитные силовые линии ни в каких точках поля не могут ни начинаться, ни кончаться.

В ходе эксперимента не подтверждено, что силовые линии магнитного поля прямолинейного проводника с током имеют кольцевую форму и замкнуты. Установлено, что силовые линии при проекции на перпендикулярную плоскость к оси проводника представляют собой спираль, а не окружность. При движении по направлению тока форма спирали соответствует типу «правая» и стрелка компаса всегда отклоняется «южным» концом ближе к проводнику. Известно, что вращение «правой» спирали по часовой стрелке ведет к раскручиванию спирали, а вращение против часовой стрелки ведет к закручиванию спирали [8, 9].

В результате исследования магнитного поля протяженного проводника при постоянном токе величиной 950–2100 ампер получены проекции положения стрелки компаса и соответственно силовых полей на продольную и перпендикулярную плоскости проводника. Анализ полученных результатов позволяет вывести простейшую форму силовых линий в виде «правой» конической винтовой линии, представлена на рис. 5.

Выводы

Установлено, что на отклонения стрелки компаса в магнитном поле проводника с током влияют: расположение проводника с током, величина тока и вторичные магнитные поля. Для снижения искажений, вызванных вторичными магнитными полями, необходимо использовать немагнитный проводящий материал для проводника и использовать единственную магнитную стрелку без корпуса.

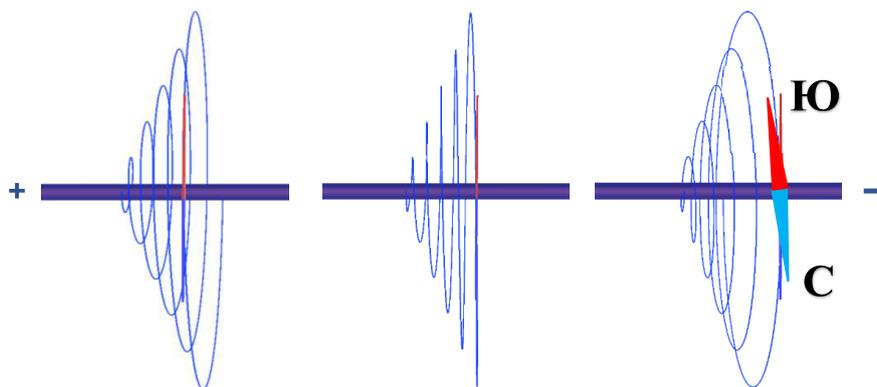


Рис. 5. Пространственная форма силовых линий магнитного поля проводника с током. Силовые линии образуют кривую линию в виде конической винтовой линии с началом на оси проводника. При любом положении оси стрелки компаса южный конец стрелки располагается ближе к проводнику, чем северный. Кривая линия разворачивается по направлению тока

Эксперимент показал, что силовые линии не являются замкнутыми, не являются окружностями и не лежат в перпендикулярной плоскости оси проводника. Установлена пространственная форма силовой линии в виде «правой» конической винтовой линии, разворачивающейся по направлению тока. Таким образом, обнаружен принцип действия, на котором основано правило буравчика, приводящее к тому, что при вращении винта с правой нарезкой, происходит продольное перемещение винта в направлении тока, т.е. в направлении разворачивающихся силовых линий магнитного поля проводника.

Список литературы

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Том 3. Электричество. Учебное пособие. 2009. 656 с.

2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. М.: Высшая школа. 1988. 263 с.

3. Иродов И.Е. Электромагнетизм. Основные законы. М.: Бинوم. Лаборатория знаний. 2009. 319 с.

4. Тамм И.Е. Основы теории электричества. Учебное пособие для вузов. М.: ФИЗМАЛИТ. 2003. 613 с.

5. Лисовский В.В., Мансветова Е.Г. Аналог маятника Капицы на стрелке компаса в осциллирующем магнитном поле // Известия РАН. Серия физическая. 2007. Т. 71. № 11. С. 1545-1547.

6. Жирных Б.Г., Серегин В.И., Шарикян Ю.Э. Начертательная геометрия: учебник. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. 168 с.

7. Ландсберг Г.С. Элементарный учебник физики, Электричество и магнетизм. Том 2. М.: ФИЗМАЛИТ. 2019. 488 с.

8. Лазарев С.И., Очиев Э.Н., Абоносимов О.А. Начертательная геометрия для первокурсника. Учебное пособие. Тамбов. Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. 68 с.

9. Кузнецов Н.С. Начертательная геометрия: учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа. 1981. 262 с., ил.

Химические науки

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ СРОКОВ ГОДНОСТИ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

Горбунова А.Н., Дубянская А.А.,
Боровская Л.В.

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный
технологический университет», Краснодар,
e-mail: anytka.gorbunova.2000@mail.ru

При изготовлении пищевых продуктов рационально как можно сильнее уменьшить введение химических веществ искусственного происхождения, применяя эффективные способы и средства, являющиеся безопасными для человека и окружающей его среды. В статье рассмотрены нынешние физико-химические методы обработки, обладающие огромным промышленным значением: улучшением научно-технических процессов и получением лучшего результата с целью увеличения сроков годности продуктов.

В наши дни на фирмах пищевой индустрии все нередко встречается с вопросом формирования продуктов неизменно высокого качества с пролонгированными сроками годности, а также соответствующие строгим условиям ГОСТ Р ИСО 9001 и ГОСТ Р ИСО 22000. В научно-технических процессах пищевого производства огромную заинтересованность представляют собой технологические процессы, базирующиеся на применении процессов электростатической обработки продуктов питания [1].

Влияние электростатических полей на пищевые продукты заключается в том, что ионизированный газ, передвигаясь в электрическом поле, отдает заряд тонкодисперсным частицам вещества, из-за чего частицы начинают организованно перемещаться от одного электрода к прочему [3]. При верном распределении воздушных масс внутри конструкции, ионизированный газ может пагубно воздействовать