

УДК 621.3.313

**А. В. Китаев, А. Н. Войцеховский**, кандидаты техн. наук,  
**С. А. Войцеховский**

### МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ ПРОВОДНИКОВ С ТОКОМ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

*На основе экспериментальных данных показано, что электрический ток, протекающий по проводнику сплошного сечения, не создает вихревого магнитного поля внутри проводника, а в случае проводника трубчатого исполнения магнитное поле имеет место над проводником и во внутренней полости трубы. Установлено, что механические силы взаимодействия проводников с током обусловлены не проводниками, а их магнитными полями.*

**Ключевые слова:** магнитное поле, электрический ток, цилиндрические проводники сплошного и трубчатого сечения

**A. V. Kitaev PhD., A. N. Voytsekhovskiy PhD.,  
S. A. Voytsekhovskiy**

### MAGNETIC FIELDS OF CONDUCTORS WITH CURRENT ON THE BASIS OF EXPERIMENTAL DATA

*The work experimentally proves that electric current flowing through the solid cross-section conductor does not create vortex magnetic field inside the conductor and in case of tubular conductor the magnetic field is formed over the conductor and inside the tube. It is found that the mechanical forces of conductor interaction with the current are conditioned not by conductors, but their magnetic fields.*

**Keywords:** magnetic field, electric current, cylindrical conductors of solid and circular cross-sections.

**О. В. Китаев, О. Н. Войцеховський**, кандидаты техн. наук,  
**С. О. Войцеховський**

### МАГНІТНІ ПОЛЯ ПРОВІДНИКІВ ЗІ СТРУМОМ НА ОСНОВІ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ

*На основі експериментальних даних показано, що електричний струм, який протікає по провідникові суцільного перетину, не створює вихрового магнітного поля у середині провідника, а у разі провідника трубчастого виконання магнітне поле має місце над провідником і у внутрішній порожнині труби. Встановлено, що механічні сили взаємодії провідників із струмом обумовлені не провідниками, а їх магнітними полями.*

**Ключові слова:** магнітне поле, електричний струм, циліндрові провідники суцільного і трубчастого перетину.

Экспериментальное исследование магнитных полей проводников с током было выполнено Эрстедом, Ампером, Фарадеем и другими авторами. На основе их опытных данных было составлено объективное описание поведения таких полей. Однако по разным причинам в созданную картину оказались вплетены абстрактные суждения без экспериментальной проверки. Например:

ток, протекающий по проводнику сплошного сечения, создает внутри него вихревое магнитное поле с линиями в виде концентрических окружностей, т.е. подобное полю вне проводника;

ток, протекающий по проводнику трубчатого исполнения, отсутствует в его внутренней полости, следовательно, в последней

нет магнитного поля.

Эти произошло потому, что указанные суждения высказывались авторитетными и производили впечатление аргументированных и логично обоснованных, т.е. воспринимались как абсолютная истина, не требующая проверки.

Цель настоящей статьи: проверка соответствия указанных положений теории данным объективной реальности, полученным при экспериментальном исследовании магнитных полей проводников.

Начнем с магнитного поля одиночного проводника, имеющего сплошное сечение. Как отмечено выше, оно создается в виде вихря вне и внутри проводника, если по проводнику протекает электрический ток. Причем давно установлено, что внешнее магнитное поле можно наблюдать визуаль-

© Китаев А.В., Войцеховский А.Н.,  
Войцеховский С.А., 2012

но при использовании железных опилок. Сила тока при этом должна быть не ниже 250-300 А. Факт существования или отсутствия магнитного поля внутри проводника, разумеется, нуждался в экспериментальной проверке, но специалисты были убеждены, что вихрь – единственно возможное изображение картины магнитного поля проводника с током (рис.1, а) и заложили его в фундамент электродинамики, как канон.

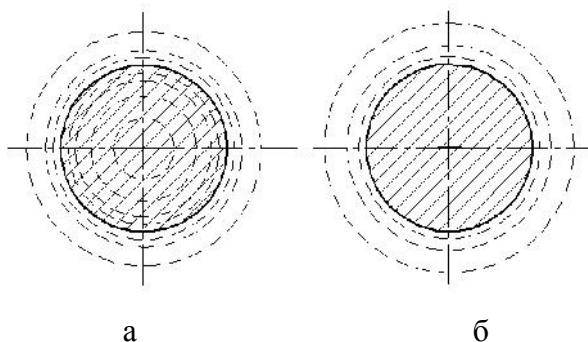


Рис.1. Принятое (а) и реальное (б) изображение магнитного поля проводника

Однако в состав теории вошла не только указанная картина, но и положения, которые могли вызвать сомнение в ее справедливости. Речь идет о известной теореме Остроградского-Стокса (теорема о роторе), использование методики, доказательства которой по отношению к полю внутри проводника приводит к выводу о его отсутствии. Однако такой шаг не был сделан, возможно, потому, что теорему Остроградского-Стокса связали с понятием векторного потенциала  $rot\vec{A} = \vec{B}$  и тем самым завуалировали ее применимость по отношению к  $rot\vec{H} = \vec{j}$ .

Но теорема о роторе — это такая же абстракция, как и картина магнитного поля внутри проводника. Поэтому для объективного суждения нужны только убедительные экспериментальные результаты, которые бы дали четкий ответ на вопрос: есть магнитное поле внутри проводника или нет? Постановка такого эксперимента привела к созданию следующей установки. В круглом медном стержне длиной 200 мм была вырезана продольная сквозная щель шириной 2 мм и длиной 20 мм (рис.2, а).

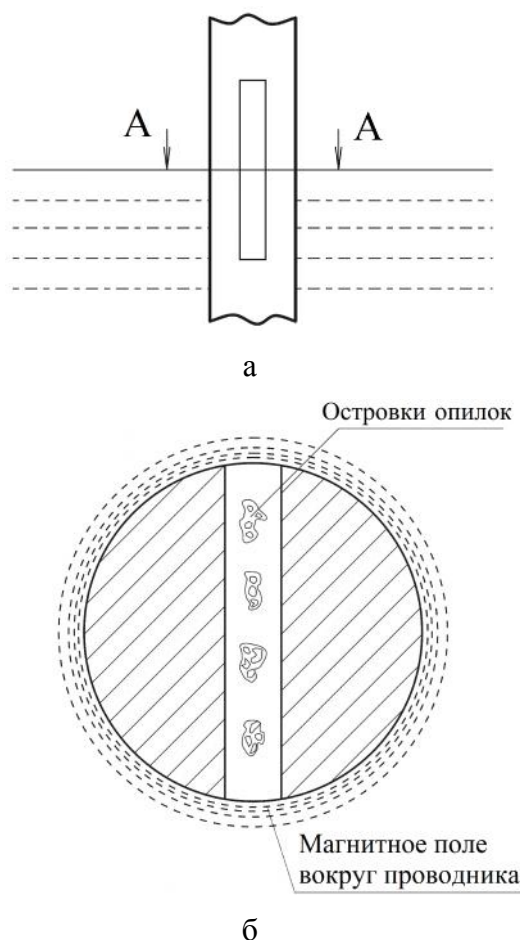


Рис. 2. Принципиальная схема установки и результат эксперимента: медный стержень (а), разрез по АА в увеличенном виде (б)

Затем стержень пропустили через ванночку из органического стекла и загерметизировали их место стыка. Это позволило налить в ванночку обычную воду так, чтобы ее уровень перекрывал выполненную на стержне щель примерно по середине. На поверхность воды сыпались железные опилки, которые удерживались на ней за счет поверхностного натяжения жидкости. Посредством немагнитных щупов опилки загонялись и внутрь щели, где они располагались в виде отдельных островков. Далее через стержень пропускался постоянный электрический ток значением 500 А. Тогда вокруг стержня формировались замкнутые магнитные силовые линии, а островки из железных опилок внутри щели стержня не реагировали на протекающий ток (рис.2, б), т.е. не выстраивались в виде концентрических окружностей, а сохраняли безразличное состояние. Тем самым

эксперимент подтвердил справедливость выводов, следующих из методики доказательства теоремы Остроградского–Стокса, согласно которым все вихри, возникающие вокруг элементарных трубок тока в толще проводника, действительно взаимно компенсируют друг друга. Исключение составят лишь трубки тока, лежащие на поверхности проводника, где и возникнет первая магнитная силовая линия магнитной напряженности. Над ней располагаются остальные магнитные силовые линии внешнего поля. Таким образом, внутри проводника условий для формирования магнитного поля нет. Поэтому объективная картина магнитного поля одиночного проводника сплошного сечения с током имеет вид, приведенный на рис.1, б, и отличается от рис.1, а отсутствием магнитных силовых линий внутри проводника.

Аналогичный результат был получен и при выполнении тех же экспериментов на переменном токе. Однако здесь дополнительно удалось установить следующее явление. Если в щель стержня вставить измерительную катушку на всю глубину щели, то при протекании тока по стержню с выходных зажимов катушки снимается сигнал, зависящий от величины тока. При наличии внутри проводника вихревого магнитного поля такого сигнал принципиально не могло быть. Согласно же теореме Остроградского–Стокса это явление легко объяснимо движением магнитных поперечных волн в направлении от центра к периферии и обратно. Под их воздействием в продольных проводниках измерительной катушки наводятся ЭДС разного направления, которые суммируются и тем самым формируют выходной сигнал.

Изложенный материал выбивает базовую опору, на которой строятся объяснения поверхностного и других эффектов, а также требует пересмотра целого ряда устоявшихся представлений.

Принято считать, что по известной картине магнитного поля одиночного проводника можно построить картины магнитных полей системы проводников с токами одинакового и разного направлений. При

этом используется графический метод, принцип суперпозиции и закон полного тока. Построенные в соответствии с этой методикой картины магнитных полей для простейших систем из двух параллельных проводников с равными токами одинакового и разного направления приведены, например, в [3]. Располагая описанным выше приемом визуального наблюдения полей, естественно, желание сопоставить результаты графического и экспериментального исследования. Последние для проводников сплошного сечения диаметром 10 мм при токе 500 А, а также при избранных дальних, средних и близких расстояниях  $d$  между проводниками (соответственно  $d = 200, 80$  и  $2$  мм) приведены на рис. 3 и могут быть прокомментированы следующим образом:

при больших  $d$  магнитные поля отдельных проводников визуально имеют ту же картину магнитного поля, что и одиночный проводник;

при средних  $d$  в системе проводников с токами одинакового направления отчетливо просматриваются: внешнее магнитное поле, охватывающее оба проводника; магнитные поля отдельных проводников и зона магнитного вакуума, где железные опилки легко распределяются на отдельные островки, не реагирующие на присутствие магнитного поля;

при малых  $d$  в той же системе проводников наблюдается интенсивное втягивание железных опилок в зазор между проводниками, т.е. имеет место формирование лемнискат;

при малых  $d$  в системе проводников с токами разного направления ожидаемое в соответствии с законом полного тока отсутствие магнитного поля не установлено, реально существуют поля, охватывающие проводники.

Отсюда следует, что графические и экспериментальные картины магнитных полей между собой не согласуются. Это означает, что в графический метод не заложены объективные физические механизмы, определяющие формирование магнитных полей системы проводников.

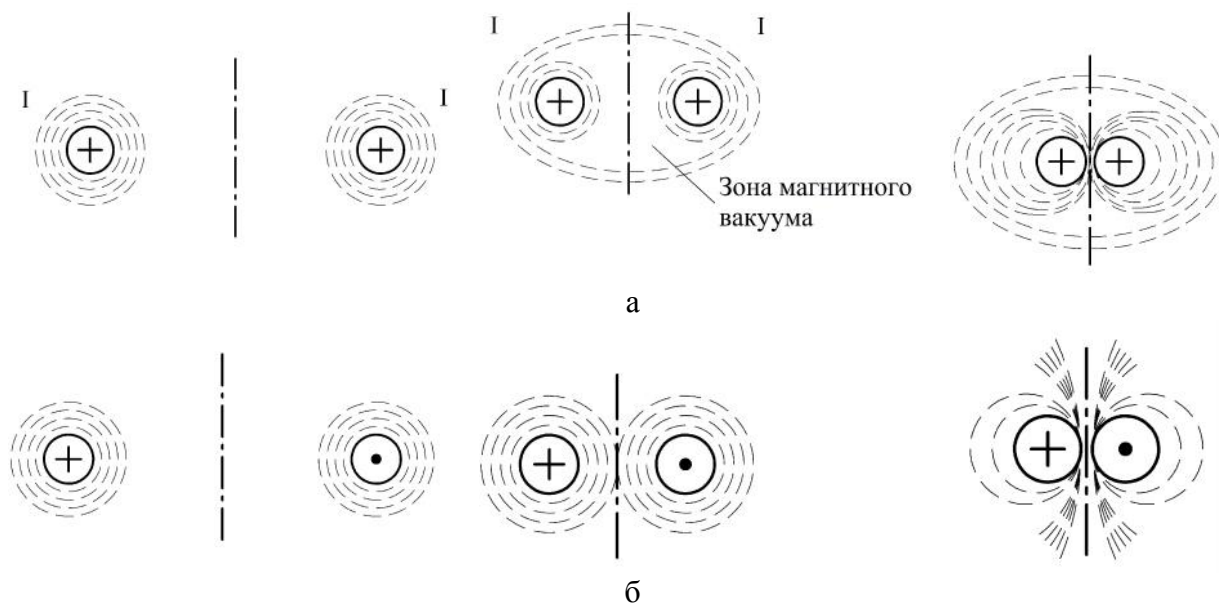


Рис. 3. Магнитные поля системы проводников: проводник с током одинакового направления (а), проводники с током разного направления (б)

Поэтому необходим их поиск. Начнем с того, что известное положение: «Провода с током одинакового направления притягиваются, а при разных направлениях отталкиваются» по своей сути некорректно. Дело в том, что здесь в основе лежит взаимодействие полей, а не проводников. Причем принцип формирования сил следующий: «Магнитные силовые линии разного направления притягиваются, а одинакового направления отталкиваются».

Поэтому каждая магнитная силовая линия одиночного проводника с током работает на сжатие от собственных сил и одновременно на растяжение от сил соседней силовой линии, имеющей большее значение магнитной напряженности. В случае системы проводников, например, с токами одинакового направления, используя те же принципы, можно изложить механизм образования зоны магнитного вакуума таким образом. Пусть при сближении проводников магнитные силовые линии притянулись и сомкнулись, образуя лемнискату. Но траектория лемнискаты – это протяженный путь с большим магнитным сопротивлением. Поэтому магнитным силовым линиям более выгодно замкнуться вокруг проводов, т.е. по пути с меньшим магнитным сопротивлением. Отсюда перестроение ряда магнитных сило-

вых линий между проводниками в силовые линии внешнего поля и формирование на их месте зоны магнитного вакуума.

При соприкосновении тех же проводников происходит обратная картина, а именно: магнитным силовым линиям внешнего поля, находящихся вблизи поверхности проводников более выгодно замкнуться в виде лемнискат, по которым железные опилки и устремляются в щель между проводниками.

Отсюда следует, что использование метода наложения для построения картин магнитных полей системы проводников с физической точки зрения неоправданно, поскольку здесь имеет место не наложение полей отдельных проводников, а их взаимодействие и перестроение.

Принято считать, что при любом значении тока магнитные силовые линии одиночного проводника уходят в бесконечность. В таком случае магнитное поле системы из двух проводников с токами одинакового направления при любом расстоянии  $d$  должно иметь следующие области: внешнюю (с охватом обоих проводов), зону магнитного вакуума и поле вокруг каждого из проводов. Однако согласно экспериментальным исследованиям внешнее магнитное поле появляется одновременно с зоной магнитного вакуума при относительно небольших  $d$ , при

которых начинается взаимодействие магнитных силовых линий. Это означает, что количество магнитных силовых линий не бесконечно велико и потому вполне можно говорить о конечности размеров магнитных полей.

Обращаясь к системе из двух проводов с токами разного направления, отметим, что если провода рассматривать как горизонтальный рельсовый путь и положить на них поперечную цилиндрическую металлическую перемычку, то подача тока в образовавшийся контур приведет к движению перемычки в сторону увеличения потокосцепления. Это явление описано в книге Г.В. Николаева [4] и названо парадоксом Ампера, Сигалова, Пепписа, поскольку, по мнению авторов, здесь не подтверждается один из известных принципов электродинамики, а именно что проводник с током не может взаимодействовать с собственным магнитным полем. Однако в свете описанного выше объяснения здесь нет никакого парадокса, а имеет место обычное отталкивание магнитных полей, созданных составляющими контур элементами. Справедливости ради следует сказать, что в пособиях по курсу «Электрические аппараты» (см. раздел по расчету электродинамических усилий [5]) прямо указывается, что замкнутый контур при протекании тока испытывает воздействие механических сил, стремящихся его порвать. И никто не воспринимает это явление как парадокс.

Теперь возникает вопрос о разработке или подборе методики расчета электродинамических усилий (ЭДУ). Остроту ситуации можно снять путем использования решений, разработанных в теории электрических аппаратов [5]. Одно из них состоит в том, что расчет ЭДУ выполняется по соотношению

$$F = k_{\phi} i_1 i_2,$$

где  $k_{\phi}$  – коэффициент формы, который определяется по кривым Двайта, найденным экспериментальным путем;  $I_1, I_2$  – токи проводов, которые между собой могут быть равны.

Приведенная формула абсолютно точно отражает, что в основе ЭДУ лежит взаимодействие полей, которые создаются

токами  $i_1$  и  $i_2$ . А специфичность конфигурации этих полей учитывается коэффициентом  $k_{\phi}$ , значение которого уточняет эксперимент. Очевидно, что при таком подходе дело сведется к установлению опытным путем значений  $k_{\phi}$  для проводов круглого и других избранных сечений.

Далее рассмотрим подробности формирования магнитного поля внутри трубы. С этой целью представим, что совокупность пар проводников с током одинакового значения и направления расположена по кругу и образует составной цилиндр. Очевидно, что суммирование магнитных полей элементарных проводников по всему периметру поперечного сечения здесь даст совокупность магнитных силовых линий, как во внешней, так и во внутренней полости цилиндра. Подчеркнем, что это будут разнонаправленные магнитные силовые линии, испытывающие, как говорилось выше, притяжение друг к другу. Однако в зону притяжения войдут лишь линии, сосредоточенные вдоль стенок цилиндра. Подчеркнем, что они легко обнаруживаются обычной магнитной стрелкой и наблюдаются визуально посредством опилок, лежащих на водяной поверхности. Что же касается линий, расположенных ближе к центру (линия А на рис. 4), то они под действием сжимающих сил исчезнут.

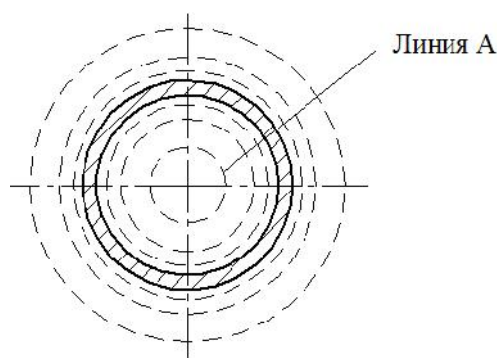


Рис. 4. Магнитное поле проводника трубчатого исполнения в соответствии с экспериментом

Полученный результат противоречит сложившимся убеждениям, согласно которым магнитное поле создается лишь вокруг трубок тока, а если в пространстве таких

трубок нет, то и поля нет. Но положения теории и данные практики не должны противоречить друг другу. Поэтому традиционный взгляд следует изменить, например, согласно следующей трактовке: «Магнитное поле создается как над поверхностью проводящего тела, по которому протекает электрический ток, так и во всех внутренних полостях того же тела, огражденных тем же током».

Таким образом, установлено, что электрический ток, протекающий по проводнику сплошного сечения, не создает вихревое магнитное поле внутри проводника. Показано, что основу взаимодействия проводников с токами одинакового и различного направления определяют не проводники, а их магнитные поля.

#### Список использованной литературы

1. Атабеков Г. И. Теоретические основы электротехники (Нелинейные электрические цепи. Электромагнитное поле) / Г. И. Атабеков. – М.: Энергия, 1979. – 432 с.

2. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники (Электромагнитное поле) / Л. А. Бессонов. – М.: Высш. шк., 1978. – 291 с.

3. Говорков В.А. Электрические и магнитные поля / В.А. Говорков – М.: ГЭИ, 1960. – 462 с.

4. Николаев Г. В. Современная электродинамика и причины ее парадоксальности/ Г. В. Николаев. – Томск: Изд-во Твердыня, 2003. – 149 с.

5. Чунихин А. А. Электрические аппараты / А. А. Чунихин. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 720 с.

Получено 20.06.2012

#### References

1. Atabekov G. I. Theory of Electrical Engineering (Nonlinear the electrical circuit. Electromagnetic field) / G. I. Atabekov. – Moscow: Energy, 1979. – 432 p. [in Russian].

2. Bessonov L. A. Theory of LA Electrical Engineering (electromagnetic field) / L. A. Bessonov. – Moscow: High. School, 1978. – 291 p. [in Russian].

3. Govorkov V. A. Electric and magnetic fields / V. A. Govorkov. – Moscow: SEI, 1960. – 462 p. [in Russian].

4. Nikolaev G. V. Modern Electrodynamics and the causes of its paradoxical nature / G. V. Nikolaev. –Tomsk: Publishing house Stronghold, 2003. – 149 p. [in Russian].

5. Chunikhin A. A. Electrical equipment / A. A. Chunikhin. – Moscow: Energoatomizdat, 1988. – 720 p. [in Russian].



Китаев  
Александр Васильевич,  
канд. техн. наук, проф. каф.  
энергетики и электротехники  
Херсонского нац.  
техн.ун-та,  
тел.+38(0552)516-468,  
e-mail: laurvignon@yahoo.fr



Войцеховский  
Александр Никифорович,  
канд. техн. наук, доц. каф.  
энергетики и электротехники  
Херсонского нац. техн.  
ун-та,  
тел.+38(0552)516-468,  
e-mail: laurvignon@yahoo.fr



Войцеховский  
Сергей Александрович,  
аспирант каф. техн. кибер-  
нетики Херсонского нац.  
техн. ун-та,  
тел.+38(0552)516- 468,  
e-mail: laurvignon@yahoo.fr