

## МОЖНО ЛИ СЧИТАТЬ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ РЕЛЯТИВИСТСКИМ ЭФФЕКТОМ?

*Дж. Максвелл впервые высказал мысль о **равноправии** электрического и магнитного поля. Творцы специальной теории относительности (Лоренц, Пуанкаре и Эйнштейн) говорили о **взаимосвязи** электричества и магнетизма. Начиная с 1912 года, начало распространяться представление о подчинённом характере магнитного поля вплоть до полного отрицания его материальной сущности. Обсуждаются доводы сторонников и противников релятивистской концепции магнетизма. Статья адресована студентам технических направлений, изучающим общий курс физики и электротехнику, а также другим категориям читателей, интересующимся вопросами, выходящими за рамки стандартного курса физики технического вуза.*

**Ключевые слова:** электрическое поле, магнитное поле, специальная теория относительности.

### 1. Введение. Система отсчёта в механике и электромагнетизме

В течение двух тысячелетий электрические и магнитные явления наблюдались и изучались отдельно. В середине XIX века появилась теория Максвелла, связывающая электричество и магнетизм в единое целое. Магнитное поле в этой теории выступает как динамический аспект электромагнетизма. Об этом было известно Максвеллу и Фарадею. В уравнения Максвелла характеристики электрического и магнитного поля входят почти «на равных» с некоторыми нюансами, обусловленными отсутствием магнитных зарядов. Поэтому полной симметрии в уравнениях Максвелла нет. Осмысление этого обстоятельства привело к сомнению в равноправии электрического и магнитного полей. Это сомнение усиливалось с годами вплоть до полного отрицания реальности магнитного поля как самостоятельной материальной субстанции. Специальная теория относительности (СТО) выявила роль системы отсчёта в электродинамике и относительность деления электромагнитного поля на электрическую и магнитную компоненты. Рассмотрим концепцию магнитного поля как релятивистской поправки к закону Кулона и роль системы отсчёта при описании электромагнитного поля.

Понятие «**Система отсчёта**» было введено в механику в XVII веке для описания механического движения на языке координат и траекторий. Система отсчёта — это тело отсчёта, связанная с телом отсчёта система координат и часы. В соответствии с принципом относительности протекание физических процессов не должно зависеть от выбора системы отсчёта. Поэтому для описания движения пригодна любая система отсчёта, и выбор той или иной системы — вопрос удобства. Первый закон Ньютона выделяет класс систем, в которых единственной причиной изменения скорости тела является нескомпенсированное взаимодействие этого тела с другими телами. Такие системы получили название инерциальных (ИСО).

В середине XIX века появилась классическая электродинамика, в которой роль системы отсчёта оказалась не менее важной, чем в механике. Полная сила, действующая на заряженную частицу в электромагнитном поле, равна

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + [\mathbf{v} \times \mathbf{B}]). \quad (1)$$

Эта формула, выведенная Х. Лоренцом (1892) и О. Хевисайдом (1889) задолго до появления СТО, получила название *формулы Лоренца* [3]. Вместе с уравнениями Максвелла формула (1) образует полную систему уравнений классической электродинамики. При малых (нерелятивистских) скоростях сила Лоренца не зависит от выбора системы отсчёта, но вклад двух слагаемых формулы (1) в полную силу в разных ИСО будет разным. При этом при переходе от одной ИСО к другой меняется не только скорость частицы, но и поля: как электрическое, так и магнитное. Формулу (1) можно вывести, исходя из инвариантности заряда и релятивистского закона преобразования сил [1], а также путём учёта нелинейных членов в уравнениях Максвелла (см. далее).

Первое слагаемое в формуле (1)  $F_э = qE$  — электрическая составляющая силы Лоренца, не зависящая от скорости; второе —  $F_м = q[v \times B]$  — магнитная составляющая силы Лоренца, зависящая от скорости и действующая только на движущиеся заряды. В системе отсчёта, связанной с движущимся зарядом, второе слагаемое обращается в нуль. Это значит, что магнитное поле выбором системы отсчёта можно «обнулить».

### 2. Мысленный эксперимент Фейнмана

Рассмотрим, как это сделал Фейнман [2], цилиндрический металлический проводник с током (рис. 1). В узлах кристаллической решётки металла находятся неподвижные положительные ионы. Свободные заряды в проводнике (электроны) движутся слева направо со скоростью  $v$ . Вдоль проводника с такой же скоростью  $v$  движется заряженная частица (электрон).

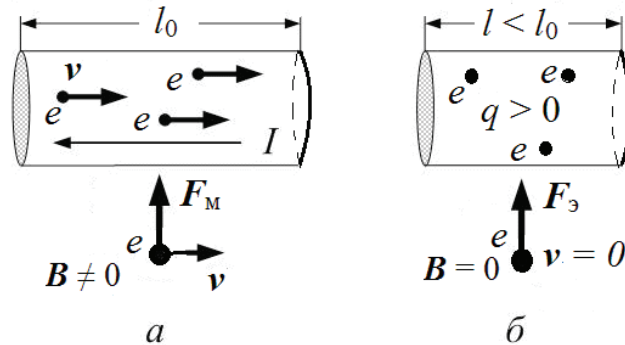
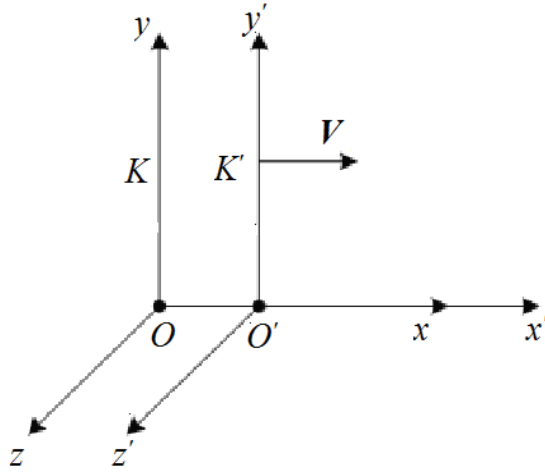


Рис. 1. Проводник с током и заряженная частица (электрон) в разных ИСО: в случае *a* магнитное поле направлено «к нам», в случае *б* магнитное поле отсутствует

В лабораторной («неподвижной») системе отсчёта на движущийся в магнитном поле заряд действует магнитная сила Лоренца  $F_м$ . Возникает вопрос: что будет происходить с силой Лоренца, если перейти от лабораторной ИСО  $K$  к ИСО  $K'$ , связанной с зарядом, в которой он неподвижен? Ведь тогда зависящая от скорости магнитная сила исчезнет! Этот вывод получил название *парадокса Лоренца*. Исчерпывающий ответ на этот вопрос дала СТО, сформулированная в 1905 году в работах Пуанкаре и Эйнштейна. Из СТО вытекает, что *поля — электрическое и магнитное — неразрывно связаны друг с другом*. При переходе от одной системы отсчёта к другой полная сила остаётся прежней, а изменяется лишь соотношение компонент в формуле Лоренца (1).

Рис. 2. Относительное движение систем отсчёта  $K$  и  $K'$ 

В нашем случае в лабораторной системе отсчёта проводник электрически нейтрален, и электрическая сила  $F_э = 0$ . Ток создаёт магнитное поле, вектор  $\mathbf{B}$  направлен «к нам», и на движущийся заряд (электрон) действует магнитная сила Лоренца  $\mathbf{F}_м$ , направленная по правилу левой руки к проводнику (рис. 1-а). В системе отсчёта, связанной с движущимся вдоль проводника зарядом (электроном), магнитная составляющая силы Лоренца не действует, так как электрон покоится (рис. 1-б). Магнитная сила Лоренца исчезла. Роль её играет появившаяся электрическая сила Лоренца. В этой системе отсчёта проводник оказывается заряженным положительно из-за релятивистского «сокращения» его длины, поскольку он сам в этой системе движется влево со скоростью  $v$ :

$$l = l_0 \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} \leq l_0. \quad (2)$$

Здесь, соответственно,  $l$  и  $l_0$  — длина движущегося и неподвижного проводника. В результате объём проводника также уменьшается, концентрация положительных ионов увеличивается и уже не компенсируется отрицательным зарядом электронов. Проводник приобретает суммарный положительный заряд  $q$ , и на заряд (электрон), неподвижный в штрихованной системе, действует электрическая сила  $F_э$ .

Таким образом, при переходе к движущейся системе отсчёта  $K'$ , связанной с зарядом  $q$ , из-за разных скоростей электронов и ионов в проводнике их линейные плотности заряда преобразуются по-разному. Это приводит к тому, что в системе  $K'$  проводник оказывается заряженным положительно, и возникает электрическое поле с напряжённостью  $\mathbf{E}'$ , направленной от проводника (вниз). Хотя в этой системе отсчёта заряд (электрон) имеет нулевую скорость, он всё равно притягивается к проводнику с силой  $F_э$ , направленной вверх. В системе, движущейся относительно системы  $K$  со скоростью, не равной  $v$ , сила, действующая на заряд, равна сумме электрической и магнитной составляющих. При  $c \rightarrow \infty$  эффект пропадает, так как в этом случае  $l = l_0$ .

Фейнман количественно доказал, что обе силы в обеих системах отсчёта одинаковы. Сила в системе  $K'$  не исчезла, а изменилось лишь её описание: в одной

системе отсчёта на заряженную частицу действовало магнитное поле тока, в другой — электрическое поле заряженного проводника. Значит, **нет отдельно только электрического или только магнитного поля. Есть единое электромагнитное поле, характер проявления которого в разных системах отсчёта будет разным.** В одной системе отсчёта это поле может выглядеть как только магнитное, в другой — как только электрическое, в третьей присутствует и магнитное, и электрическое.

Возможно, более наглядный вариант мысленного эксперимента Фейнмана можно описать так. Рядом с проводником с током находится положительный заряд  $q$ . Рассмотрим взаимодействие заряда с проводником в лабораторной ИСО, в которой заряд и проводник неподвижны, и в ИСО, движущейся вдоль проводника со скоростью  $v$ . Проводник электрически нейтрален. В лабораторной ИСО сила (1), действующая на заряд, равна нулю. В движущейся ИСО из-за релятивистского «сокращения» баланс зарядов в проводнике нарушается, и на заряд действует электростатическая сила отталкивания и магнитная сила притяжения. Результирующая сила (1) остаётся равной нулю.

Пусть «подвижная» (штрихованная) ИСО  $K'$  связана с зарядом и движется со скоростью  $V$  относительно «неподвижной» (нештрихованной) ИСО  $K$  вдоль оси  $x$  (рис. 2). Сила Лоренца имеет простейший вид в системе отсчёта, связанной с движущимся зарядом (в системе покоя). В этой системе  $v = 0$ , и второе слагаемое в формуле (1) отсутствует. Такая система отсчёта аналогична ИСО в механике. Лабораторная система отсчёта движется относительно заряда со скоростью  $V$  и является аналогом неинерциальной системы отсчёта. Подобно тому, как в механике при описании движения в неинерциальной системе появляются силы инерции, в электродинамике появляются дополнительные слагаемые в формуле (1). Это вихревое электрическое поле и связанная с ним электрическая сила (аналог переносной силы инерции) и магнитная сила (аналог силы Кориолиса).

В фейнмановском мысленном эксперименте (рис. 1) в системе  $K$  рассматривалось движение с постоянной скоростью  $v = \text{const}$ . При движении с ускорением возникает переменное магнитное поле, порождающее вихревое электрическое поле. Описание электромагнитных явлений в неинерциальных системах отсчёта даётся в общей теории относительности.

### 3. Преобразование полей в разных ИСО

Поясим то же самое на языке силовых характеристик поля. Формулы преобразования векторов  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{B}$  при переходе из одной системы отсчёта в другую даёт СТО [4, 5]:

$$\begin{aligned} \vec{E}_{\text{нар}} &= \vec{E}'_{\text{нар}}; \quad \vec{B}_{\text{нар}} = \vec{B}'_{\text{нар}} \\ \vec{E}_{\text{перп}} &= \frac{\vec{E}'_{\text{перп}} - [\vec{v} \times \vec{B}']}{\sqrt{1 - \beta^2}}; \quad \vec{B}_{\text{перп}} = \frac{\vec{B}'_{\text{перп}} + [\vec{v} \times \vec{E}']/c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\vec{E}_{\text{нар}}, \vec{E}_{\text{перп}}$  — составляющие вектора  $\mathbf{E}$ , параллельные и перпендикулярные

скорости  $v$ ;  $\vec{B}_{\text{нар}}, \vec{B}_{\text{перп}}$  — составляющие вектора  $\mathbf{B}$ , параллельные и перпендикулярные скорости  $v$ ;

$V$  — скорость относительного движения систем  $K$  и  $K'$ ;

$v = V$  — скорость заряда в системе  $K$ ;

$c$  — скорость света в вакууме;

$\beta = (V / c)$ .

Согласно формулам (3), продольные составляющие  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{B}$  одинаковы во всех ИСО. В проекциях на оси координат:

$$\begin{aligned} E'_x &= E_x; & B'_x &= B_x; \\ E'_y &= \frac{E_y - vB_z}{\sqrt{1 - \beta^2}}; & B'_y &= \frac{B_y + vE_z/c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}}; \\ E'_z &= \frac{E_z + vB_y}{\sqrt{1 - \beta^2}}. & B'_z &= \frac{B_z - vE_y/c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}}. \end{aligned} \quad (4)$$

$\beta = v/c$  отношение скорости заряда к скорости света,

$\vec{E}$  и  $\vec{B}$  — напряжённость электрического поля и индукция магнитного поля.

Эти формулы показывают, что электрическое и магнитное поле взаимосвязаны. Из сказанного выше следует, что электрическое и магнитное взаимодействия составляют части единого электромагнитного взаимодействия заряженных частиц. Существует единое электромагнитное поле, разделение которого на электрическое и магнитное поля, характеризуемые векторами  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{B}$ , относительно и зависит от выбора системы отсчёта.

При  $c \rightarrow \infty$  (или  $v \rightarrow 0$ ) проекции векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  одинаковы в обеих системах отсчёта. Значит, в таком случае поле разлагается на компоненты одинаково во всех ИСО. Казалось бы, магнитное поле не исчезает. Но в формуле (2) окажется, что  $\beta = 0$ , и  $l = l_0$ , т. е. релятивистского «сокращения» и магнитной поправки (электрической силы в подвижной системе) не будет. Но тогда и в неподвижной системе отсчёта сила должна отсутствовать. Это значит, что магнетизм есть чисто релятивистский эффект, связанный с конечной скоростью распространения света.

#### 4. Пример описания равнопеременного движения в разных ИСО

Приведём ещё один пример относительности деления электромагнитного поля на электрическую и магнитную компоненты. Пусть протон (заряд  $q$ , масса  $m$ ) движется вдоль оси  $x$  со скоростью  $v$  в однородном магнитном поле с индукцией  $\mathbf{B}$  перпендикулярно силовым линиям (рис. 3). Вектор  $\mathbf{B}$  направлен вдоль оси  $z$  («к нам»).

В «неподвижной» ИСО магнитная сила Лоренца  $F_M = qvB$  играет роль центростремительной силы. Эта сила сообщает протону ускорение  $a = F_M / m = \frac{qvB}{m}$ . Урав-

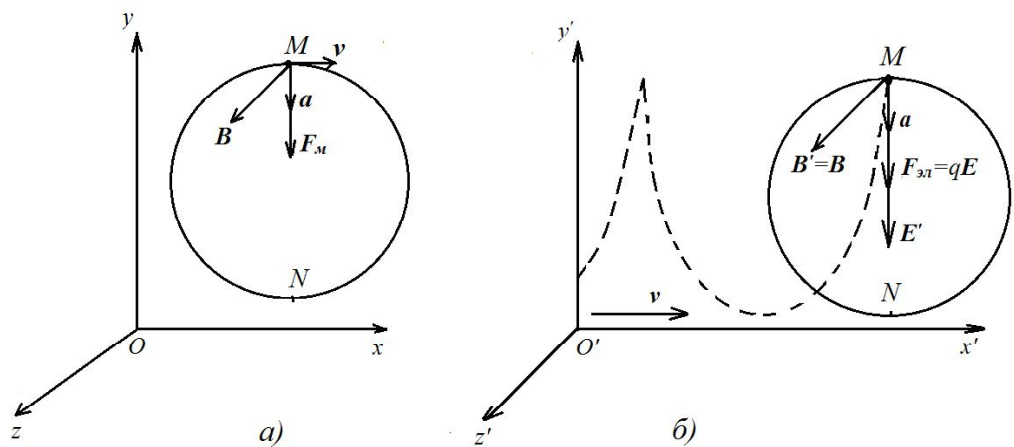
нение движения протона в системе  $(x, y, z)$ :  $qvB = m \frac{v^2}{R}$ .

Протон движется по окружности радиуса  $R = mv/qB$ . В «подвижной» системе отсчёта в точке  $M$  протон неподвижен, поэтому магнитная сила Лоренца равна нулю.

Поэтому роль центростремительной силы здесь играет электрическая сила, сообщающая протону такое же ускорение

$$a = F_{эл} / m = qvB / m.$$

В штрихованной системе обнаруживается электрическое поле напряжённостью  $E'_y = -vB$ . В точке  $N$  скорость протона будет  $2v$ , и на частицу действует и электрическая (направленная вниз), и магнитная (направленная вверх) сила Лоренца, причём их сумма должна быть равна силе Лоренца в нештрихованной системе отсчёта. В проекции на вертикальную ось:  $-qvB + 2qvB' = qvB$ . Отсюда  $B = B'$ , т. е. магнитное поле одинаково в обеих системах отсчёта. При переходе из точки  $M$  в точку  $N$  электрическая сила остаётся постоянной, а магнитная меняется сложным образом, причём сумма их всегда равна постоянной центростремительной силе, создающей ускорение  $qvB/m$ .



**Рис. 3. Протон движется в однородном магнитном поле в разных ИСО:**  
 в случае а — в «неподвижной» (лабораторной) ИСО;  
 в случае б — в ИСО, движущейся с постоянной скоростью  $v$  вдоль оси  $x$

Таким образом, в нашем нерелятивистском случае формулы (4) принимают вид:

$$\begin{aligned} E'_x &= 0; & B'_x &= 0; \\ E'_y &= -vB_z; & B'_y &= 0; \\ E'_z &= 0; & B'_z &= B_z. \end{aligned} \quad (5)$$

### 5. Становление релятивистской концепции магнетизма

Автор известного пособия по физике профессор И. В. Савельев говорил по этому поводу следующее: «Между электричеством и магнетизмом имеется глубокая связь. Основываясь на постулатах теории относительности и на инвариантности электрического заряда, можно показать, что магнитное взаимодействие зарядов и токов является следствием закона Кулона» [4]. В дальнейшем суждения, касающиеся статуса магнитного поля, становились всё более радикальными. Пр процитируем

мнение известного физика и автора многочисленных пособий по физике профессора И. Е. Иродова (1923–2002): «...возникновение магнитного поля является чисто релятивистским эффектом, следствием наличия в природе предельной скорости  $c$ , равной скорости света в вакууме» [5]. Более категорично высказывается автор статьи, вызвавшей бурную дискуссию в сети Интернет: «Магнитного поля, как особого вида материи, вообще не существует в природе. Это чисто релятивистский эффект. Представление о магнитном поле — не более чем удобный расчётный прием, позволяющий существенно упростить вычисления сил между проводниками с токами» [6].

Участник одного из форумов в сети Интернет выразился ещё радикальнее: «Я предлагаю полностью изгнать магнитное поле из теоретической физики, переименовав электромагнитное поле в электрическое и сведя магнитные взаимодействия к электростатическим с учётом СТО (оставив его в технике, как удобный способ расчёта сил между проводниками с токами)».

Примерно таких же взглядов придерживался шведский астрофизик Ханнес Альфвен, изложивший физику плазмы на языке токов и зарядов без использования понятия «Магнитное поле». Он, конечно, не «изгонял» магнитное поле буквально, но показал, что это в принципе возможно.

#### **6. Доводы «за» и «против» релятивистской концепции магнетизма**

Надо ли идти таким путём? Думается, что нет. Понятие «магнитное поле» полезно, привычно и упрощает расчёты магнитных цепей. Но нужно помнить, что статус магнитного поля ниже, чем статус электрического. Строго говоря, его нельзя называть силовым полем. Магнитное поле можно считать *фиктивным*, точно так же, как некоторые авторы считают фиктивными силы инерции, введение которых также упрощает решение некоторых задач в механике. **Магнитная сила — это всего лишь название, введённое для описания действующей на электрон пондеромоторной силы в случае, когда эта сила зависит от скорости.**

Итак, доводы сторонников релятивистской теории магнетизма, к которым себя относит и автор настоящей статьи, следующие.

1. Физику магнетизма можно понять на основе теории относительности.
2. Появление магнитного поля тока можно считать чисто релятивистским эффектом. Никакой новой физической субстанции для описания его (например, в виде магнитных зарядов или монополей) вводить не имеет смысла.
3. Основным законом электромагнетизма является закон Кулона. Все остальные законы электро- и магнитостатики могут быть получены из закона Кулона, принципа инвариантности заряда и релятивистского закона преобразования сил (полей).
4. Понятие «Магнитное поле» полезно и должно сохраняться в физике и электротехнике из чисто практических соображений.

Релятивистская концепция магнетизма признаётся далеко не всеми авторами [7, 8, 9]. Соберём воедино доводы противников релятивистской теории магнетизма.

1. Действительно, релятивистски некомпенсированный заряд проводника приводит к появлению дополнительного электрического поля, но магнитное поле здесь совершенно ни при чём.

На заряд в любой ИСО действует электромагнитная сила, разделение которой на электрическую и магнитную условно и зависит от системы отсчёта.

2. Точечный заряд — идеализация, в природе таких зарядов нет. Релятивистское сокращение касается не только проводника (или расстояния между зарядами),

но и самих зарядов. Пропорция между зарядами разного знака сохранится, а, значит, проводник останется электрически нейтральным.

Да, точечный заряд — идеализация. Но простой расчёт показывает, что для сохранения пропорций между зарядами разного знака зарядам проводника нужно приписать чуть ли не макроскопические размеры!

3. *Магнитное поле обладает энергией, что свидетельствует о материальности магнитного поля и его самостоятельной физической сущности.*

«Самостоятельная сущность» и «материальность» магнитного поля никак не вытекает из того, что магнитному полю приписывают энергию.

4. *Давление света говорит о материальности магнитного поля, так как в волновой электромагнитной теории оно объясняется действием на движущиеся заряды магнитной силы Лоренца.*

Если магнитная сила Лоренца — релятивистский эффект, то давление света отнюдь не свидетельствует о материальности магнитного поля; при квантовом описании явления магнитное поле вообще не нужно.

5. *Не существует система отсчёта, в которой два постоянных магнита не притягиваются.*

Это связано с тем, что не существует инерциальной системы отсчёта, в которой все микроскопические электрические заряды постоянного магнита покоятся.

6. *Если магнитное поле — релятивистский эффект, то как он может проявляться при скоростях дрейфа носителей в проводниках, ничтожно малых по сравнению со скоростью света.*

Это правильно, однако малая скорость движения носителей тока компенсируется их огромным количеством.

7. *Магнитные моменты элементарных частиц, например, спиновый момент электрона, не зависят от системы отсчёта (ни в одной системе отсчёта их нельзя «обнулить»).*

Наверно, дело в том, что невозможно взять один электрон и рассмотреть зависимость (или независимость) его спина от системы отсчёта.

8. *Классики релятивизма (Лоренц, Пуанкаре, Эйнштейн и др.) говорят только о взаимосвязи электричества и магнетизма и совсем не утверждают, что магнитное поле — чисто релятивистский эффект.*

Это означает лишь то, что осознание релятивистской природы магнетизма пришло не сразу. Кроме того, картина взаимосвязи полей сильно усложняется в неинерциальных системах отсчёта и объясняется общей теорией относительности, признание которой пришло не сразу.

9. *Магнитную составляющую силы Лоренца можно получить без привлечения соображений теории относительности непосредственно из уравнений Максвелла, если в них частные производные от векторов напряжённости электрического поля ( $\partial\mathbf{E}/\partial t$ ) и магнитной индукции ( $\partial\mathbf{B}/\partial t$ ) заменить на полные  $d\mathbf{E}/dt$  и  $d\mathbf{B}/dt$  [7, 8], как это первоначально и было в его знаменитой работе «Трактат об электричестве и магнетизме».*

Этот довод представляется нам наиболее серьёзным. Прежде всего отметим, что магнитную силу Лоренца невозможно вывести из *линейных* уравнений Максвелла (в форме Герца — Хевисайда). Это можно сделать только из уравнений, содержащих нелинейные члены и полные производные. Профессор В. А. Эткин перевёл



идею Максвелла на современный математический язык [7]. Поясним вывод формулы Лоренца из обобщённых уравнений Максвелла.

Запишем два уравнения Максвелла, заменяя частные производные на полные:

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -d\mathbf{B}/dt, \quad (6)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0. \quad (7)$$

Индукция магнитного поля  $\mathbf{B}$  есть функция радиус-вектора  $\mathbf{r}(t)$  и времени  $t$ :  $\mathbf{B} = \mathbf{B}(\mathbf{r}, t)$ . Её полная производная

$$\frac{d\vec{B}}{dt} = \frac{\partial \vec{B}}{\partial \vec{r}} \frac{d\vec{r}}{dt} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

или

$$d\mathbf{B}/dt = (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{B} + (\partial \mathbf{B} / \partial t), \quad (8)$$

где  $\mathbf{v}$  — скорость заряда. Подставляя (8) в (6), имеем:

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -(\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{B} - (\partial \mathbf{B} / \partial t). \quad (9)$$

Воспользуемся формулой векторного анализа [10]

$$(\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{B} = -\operatorname{rot}(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) + \mathbf{v} \operatorname{div} \mathbf{B} + (\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{v} - \mathbf{B} \operatorname{div} \mathbf{v}. \quad (10)$$

С учётом (7) второй член правой части уравнения (10) оказывается равным нулю. При  $\mathbf{v} = \text{const}$  обращаются в нуль и последующие два члена. Что же касается второго члена правой части (9), то, поскольку  $\mathbf{B} = \operatorname{rot} \mathbf{A}$ , его можно представить в виде  $(\partial \mathbf{B} / \partial t) = \operatorname{rot} (\partial \mathbf{A} / \partial t)$ . Тогда выражение (9) примет вид:

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = \operatorname{rot}(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) - \operatorname{rot}(\partial \mathbf{A} / \partial t), \quad (11)$$

или

$$\mathbf{E} = [\mathbf{v} \times \mathbf{B}] - (\partial \mathbf{A} / \partial t). \quad (12)$$

Слагаемые правой части выражения (12) соответствуют «сторонним» (индуцированным) силам, действующим на движущийся заряд  $q$  помимо кулоновской силы  $\mathbf{E}_s = -\operatorname{grad} \phi$ .

Полная сила  $\mathbf{F}$ , действующая на заряд  $q$ , имеет вид:

$$\mathbf{F} = -q \{ \operatorname{grad} \phi - [\mathbf{v} \times \mathbf{B}] + (\partial \mathbf{A} / \partial t) \}, \quad (13)$$

т. е. включает электрическую силу  $\mathbf{F}_s = q\mathbf{E}$ , магнитную силу  $\mathbf{F}_m = q[\mathbf{v} \times \mathbf{B}]$  и силу  $\mathbf{F}_0 = -q(\partial \mathbf{A} / \partial t)$ , не имеющую особого названия и зависящую от скорости изменения векторного потенциала.

Таким образом, формулу Лоренца (1) можно действительно вывести из обобщённых уравнений Максвелла, не прибегая к представлениям СТО. Однако, это достигается за счёт усложнения общепринятой линейной системы уравнений Максвелла.

### 7. Заключение

Таким образом, на вопрос, поставленный в заголовке статьи, можно ответить утвердительно, хотя *релятивистская трактовка магнетизма не является единственно возможной*. Но, по сравнению с другими концепциями, релятивистская концепция магнетизма представляется наиболее удобной, логичной и убедительной. Мы показали это на нескольких примерах, когда движение описывалось в ИСО. Вопрос о магнитных явлениях в неинерциальных системах отсчёта требует дополнительного осмысления с использованием представлений общей теории относительности.

Автор выражает признательность канд. техн. наук, доценту ПсковГУ С. С. Воронкову за интерес к работе и обсуждение выводов.

Литература

1. Релятивистская трактовка магнитных явлений (общие положения) [Электронный ресурс]: URL: <http://ens.tpu.ru>
2. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Т. 5. М.: Мир, 1966. С. 266–273.
3. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Т. 3. М.: Наука, 1977. С. 381–385.
4. Савельев И. В. Курс общей физики. Т. 2. М.: КНОРУС, 2009. С. 148.
5. Иродов И. Е. Основные законы электромагнетизма. М.: Высшая школа, 1983. С. 180–183.
6. Григорьев А. Н. Магнитное поле — релятивистский эффект [Электронный ресурс]: URL: <http://www.sworld.com.ua/konfer29/642.pdf>
7. Эткин В. А. Вывод выражения силы Лоренца из уравнений Максвелла [Электронный ресурс]: URL: <http://www.etkin.iri-as.org/napravlen/09elektr/Sila%20Lor%20is%20urav%20Maxw.pdf>
8. Эткин В. А. Нерелятивистский вывод выражения силы Лоренца [Электронный ресурс]: URL: [http://samlib.ru/e/etkin\\_w\\_a/nerelativistskiyvvodsilorenza.shtml](http://samlib.ru/e/etkin_w_a/nerelativistskiyvvodsilorenza.shtml)
9. Муравьев Б. А. Магнитное поле — релятивистский эффект? [Электронный ресурс]: URL: <http://www.pwaves.0catch.com/doc/russian/papers/magnetic/doc/russian/mag1.htm>
10. Действия с вектором «набла» [Электронный ресурс]: URL: <http://4xx.zaytsev.net/course-2/OVTA/Practice/Ovтаp10.pdf>

Об авторе

**Верхозин Анатолий Николаевич** — доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики, физико-математический факультет, Псковский государственный университет, Россия

E-mail: [verkhazin60@yandex.ru](mailto:verkhazin60@yandex.ru)

*A. Verkhozin*

**CAN WE CONSIDER THE MAGNETIC FIELD AS A RELATIVISTIC EFFECT?**

*J. Maxwell first proposed the idea of the electric and magnetic fields **equality**. The creators of the special theory of relativity (Lorentz, Poincaré and Einstein) talked about the **relationship** of electricity and magnetism. Since 1912 the idea of the subordinate nature of the magnetic field as far as the complete denial of its material nature began to spread. The arguments of supporters and opponents of the relativistic concept of magnetism are discussed. The article addresses the students of technical major, studying the general course of physics and electrical engineering, and other categories of readers interested in issues that go beyond the general course of technical high school physics.*

**Key words:** *electric field, magnetic field, special theory of relativity.*

**About the author**

Prof. Dr. Sci. **Anatolii Verkhozin**, Physics Department, Pskov State University, Russia.

E-mail: [verkhazin60@yandex.ru](mailto:verkhazin60@yandex.ru)