

А.А. Коновал, Т.И. Туркот

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ КАК ДИДАКТИЧЕСКОЕ СРЕДСТВО ФОРМИРОВАНИЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОСТИ МЫШЛЕНИЯ СТУДЕНТОВ

В статье освещены отдельные аспекты методики развития самостоятельности мышления студентов-физиков в процессе обучения научно-методическому анализу некоторых электродинамических моделей.

Ключевые слова: самостоятельность мышления, электродинамическая модель, специальная теория относительности, релятивистские поправки.

A.A. Konoval, T.I. Turkot

ANALYSIS OF ELECTRODYNAMIC MODELS AS A DIDACTIC TOOL OF FORMATION OF INDEPENDENCE OF THINKING OF STUDENTS

The article is devoted to some aspects of methodology development of independent thinking of physics students in the learning process of scientific-methodological analysis of some electrodynamic models.

Key words: independent thinking, electrodynamic model of the special theory of relativity, relativistic corrections.

Одной из важнейших стратегических задач современной высшей школы является формирование самостоятельной, творческой личности специалиста в процессе его подготовки к будущей профессиональной деятельности в стенах родной «Alma mater». В психолого-педагогической литературе самостоятельность рассматривается как необходимое условие продуктивных мыслительных процессов, связанных с выявлением новых проблем и поиском путей их решения (А.В. Брушлинский), как умение обучающихся решать познавательные задания (И.Я. Лернер, П.И. Пидкасистый), как условие активизации учебной деятельности (А.К. Громцева, Л.И. Пименова, Г.И. Щукина).

Г.Е. Ковалева подчеркивает, что «самостоятельность – это, в первую очередь, самостоятельность действий и мышления. Основное условие глубокого усвоения материал – это его аналитико-синтетическая обработка, которая состоит в самостоятельном анализе новой информации, т.е. выделением в ней основных понятий, установление причинно-следственных связей и отношений между ними и, таким образом, понимание учебного материала, а в целом, определение в нем главного и второстепенного. Только на основе такого осмысления материала можно самостоятельно размышлять, доказывать, обобщать» [2, с. 3].

Характеризуя систему современных дидактических принципов, В.И. Бурак доказывает необходимость вычленения в качестве отдель-

ного – принцип самостоятельности, активности и осознанности, подчеркивая необходимость их интеграции в единое целое [1, с.132–133]. Мы разделяем эту исследовательскую позицию, и считаем, что необходимо специально обучать студентов самостоятельности мышления, опираясь на осознанное и активное восприятие ими изучаемого материала.

Освещение некоторых аспектов методики формирования самостоятельности мышления студентов-физиков в процессе анализа электродинамической модели проводника с постоянным током и представляет цель предлагаемой статьи.

В первую очередь необходимо довести к сведению будущих учителей, что точный учёт релятивистских поправок, несмотря на их ничтожную малость в реальных физических ситуациях, в описании взаимодействия движущихся заряженных частиц является, тем не менее, принципиально важным и необходимым [3–6]. Так, из требований специальной теории относительности (СТО) к правилам преобразования компонент силы при переходе из одной системы отсчёта (СО) в другую (другими словами из требования лоренц-ковариантности уравнений движения) вытекает необходимость введения понятия «магнитное поле» [3, с. 32–34].

Учёт релятивистских поправок в выражении напряжённости электрического поля движущегося заряда совместно с принципами СТО приводят к необходимости существования явления электромагнитной индукции [5, с. 141].

Далее, обращаем внимание студентов на популярный пример, традиционно используемый в учебной и научно-методической литературе [4, 7–11] для иллюстрации фундаментального свойства электромагнитного поля, – относительности электрического и магнитного полей.

Магнитное взаимодействие движущегося заряда с другими движущимися зарядами (с проволокой, по которой протекает ток) представлено как чисто электрическое взаимодействие благодаря релятивистским изменениям в электрических полях движущихся зарядов. Этот пример инициирует попытку аналогичной интерпретации взаимодействия двух бесконечно длинных проводников с током [5, с. 219].

При этом рассматривается следующая модель проводников с током [10, 11]: в каждом проводнике имеется одинаковое число положительных и отрицательных носителей заряда, движущихся с равными скоростями в противоположных направлениях (рис. 1). Чтобы вычислить силу, действующую на единицу длины одного из таких проводников со стороны другого в лабораторной системе отсчёта (ЛСО) K , необходимо вычислить силу, действующую на положительные носители заряда в собственной системе отсчёта (ССО) и на отрицательные – в своей ССО. Затем значения этих сил пересчитать, согласно формулам преобразования компонент сил [4, 9] в СО K .

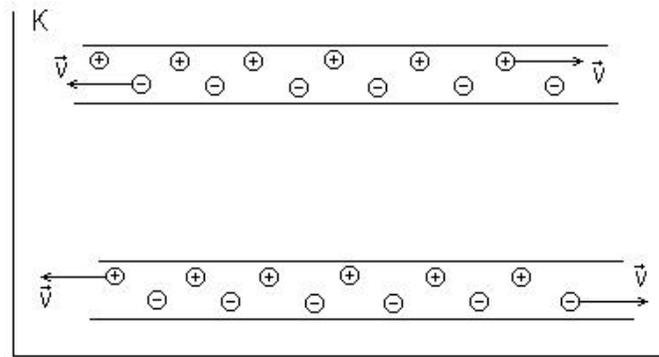


Рис. 1. Взаимодействие между проводниками с токами, представленных моделями, в которых положительные ионы и электроны имеют одинаковые по величине, но противоположно направленные скорости

На следующем этапе считаем необходимым показать студентам, что для модели проводника с током более соответствующей реальной ситуации, чем изображённая на рис. 1, выражение для силы взаимодействия токов отличается от общепринятого.

Но сначала в пунктах 1 и 2 найдём силу взаимодействия между токами, модели которых изображены на рис. 1.

1. Пусть скорость зарядов в СО K равна \vec{v} , линейная плотность зарядов в ССО

$$|\tau_+^0| = |\tau_-^0| = \tau_0.$$

Ясно, что силы, действующие на положительные и отрицательные носители заряда первого проводника в их ССО, будут иметь электрическую природу. Электрическое поле в ССО обусловлено различной величиной линейной плотности положительного и отрицательного зарядов второго проводника. Тогда на положительные заряды 1-го проводника в их ССО, которые расположены на той же длине, что и в СО K

($\Delta l' = \Delta l \sqrt{1 - \beta^2}$, где $\beta = \frac{v}{c}$), действует сила со стороны электрического поля 2-го проводника, равная:

$$F'_+ = \tau_0 \cdot \Delta l \sqrt{1 - \beta^2} \cdot E_2 = \tau_0 \cdot \Delta l \sqrt{1 - \beta^2} \cdot \frac{\tau_2}{2\pi\epsilon_0 \cdot a}. \quad (1)$$

где $\tau_2 = \tau_2^+ - \tau_2^- = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \beta_{+2}^2}} - \tau_0 = \frac{2\tau_0\beta^2}{1 - \beta^2}$ – результирующая линейная плотность заряда 2-го проводника с точки зрения СО, связанной с положительными носителями заряда 1-го проводника; $\beta_{+2} = \frac{v_{+2}}{c} = \frac{1}{c} \left(\frac{v+v}{1+\beta^2} \right)$; a – расстояние между токами.

Окончательно имеем, учитывая выражение для величины τ_2 :

$$F'_+ = \frac{\tau_0^2 \cdot \beta^2 \cdot \Delta l}{\pi\epsilon_0 \cdot a \sqrt{1 - \beta^2}}. \quad (2)$$

Точно такая же по величине (из-за симметрии задачи) сила отталкивания F'_- действует и

на отрицательные заряды 1-го проводника в их ССО со стороны электрического поля 2-го проводника. Поскольку СО, связанные с носителями заряда 1-го проводника, имеют скорость \vec{v} относительно ЛСО K , то сила, действующая на отрезке Δl в СО K будет равна (согласно формулам преобразования поперечных составляющих силы [6, 9]):

$$F_y = \frac{F'_y}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{F'_+ + F'_-}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{\mu_0 I^2}{2\pi a} \cdot \Delta l. \quad (3)$$

Таким образом, рассматривая лишь электрические силы, студенты находят обычное, традиционное выражение для силы взаимодействия двух параллельных токов.

2. Студентам следует продемонстрировать, что этот же результат может быть получен путём нахождения сил, действующих на движущиеся цепочки положительных и отрицательных носителей заряда 1-го проводника в магнитном поле, создаваемом 2-м током. Электрическое поле в СО K отсутствует ($E_2 = 0$), благодаря равным, но противоположно направленным скоростям отрицательных и положительных носителей заряда.

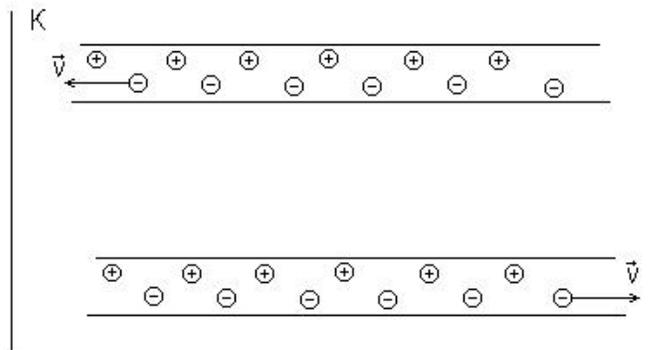


Рис. 2. Традиционная модель взаимодействующих проводников с токами

Далее предлагаем студентам самостоятельно верифицировать гипотезу, что более адекватной реальности будет модель проводника с током, изображённая на рис. 2.

Здесь положительные носители заряда неподвижны (что соответствует неподвижным ионам кристаллической решетки проводника), а движутся только электроны проводимости с дрейфовой скоростью \vec{v} относительно ЛСО.

Будем предполагать, что проводник без тока нейтрален: $-\tau_-^0 = \tau_+^0$.

Индукция магнитного поля, создаваемого вторым током в СО K равна:

$$B_2 = \int_{-\infty}^{+\infty} |d\vec{B}| = \frac{\mu_0 \tau_0 v}{\pi \cdot a \sqrt{1-\beta^2}} = \frac{\mu_0 I}{2\pi a},$$

где $d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I[d\vec{r} \cdot \vec{r} \cdot (1-\beta^2)]}{r^3(1-\beta^2 \sin^2 \theta)^{3/2}}$ – закон Био-Савара в релятивистской форме [3, с. 35]. Здесь \vec{r} – радиус-вектор, проведённый из мгновенного положения элемента заряда $\frac{\tau_0 dl}{\sqrt{1-\beta^2}}$ в данную точку поля; θ – угол между \vec{v} и \vec{r} .

Тогда сила, действующая на отрезок длины Δl первого проводника со стороны магнитного поля второго проводника, равна:

$$F_y = 2 \cdot \frac{\tau_0 \cdot \Delta l}{\sqrt{1-\beta^2}} |[\vec{v} \vec{B}_2]| = \frac{\mu_0 I^2}{2\pi a} \Delta l, \quad (4)$$

что, естественно, совпадает с выражением (3).

Пункты 1 и 2 являются хорошей иллюстрацией применения принципов СТО для расчёта конкретных физических моделей. Таким образом, студенты убеждаются в необходимости учитывать релятивистские поправки и в законе Био-Савара, и в электрических полях движущихся носителей заряда.

В нашей модели это соответствует случаю, когда цепочка отрицательных носителей заряда неподвижна относительно положительной цепочки (ионов). А на неподвижные ионы в СО K первого проводника будет действовать сила притяжения, равная

$$F_{+\ominus} = \tau_0 \Delta l E = \tau_0 \Delta l \frac{\tau_0 \left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right)}{2\pi \epsilon_0 a}. \quad (6)$$

Итак, для суммарной силы отталкивания между двумя проводниками, приходящейся на отрезок длины Δl одного из них в СО K , получаем выражение:

$$F_y = \frac{F'_{-2,-1}}{\sqrt{1-\beta^2}} - F_{+2,+1} = \frac{\mu_0 I^2}{2\pi a} \Delta l \left\{ \frac{2}{\beta^2} \left(1 - \sqrt{1-\beta^2} \right) \right\}. \quad (7)$$

Студентам предлагается самостоятельно доказать, что результат (7) может быть получен и с помощью метода, приведённого в п. 2.

В самом деле, на распределение электронов первого проводника действуют следующие силы со стороны электронного и ионного распределений второго проводника: электрическая $F_{-2,-1}^{\ominus}$ и $F_{-2,-1}^{\mathcal{M}}$ магнитная силы со стороны цепочки электронов и электрическая сила со стороны неподвижной цепочки ионов $F_{+2,-1}^{\ominus}$.

Неподвижные ионы первого проводника испытывают силы $F_{-2,+1}^{\ominus}$ и $F_{+2,+1}^{\ominus}$ соответственно в электрических полях, создаваемых движущимися электронами и неподвижными ионами второго проводника. Поэтому результирующая сила взаимодействия, приходящаяся на единицу длины одного из них, равна:

$$F_y = F_{-2,-1}^{\mathcal{M}} + F_{-2,-1}^{\ominus} - F_{+2,-1}^{\ominus} - F_{-2,+1}^{\ominus} + F_{+2,+1}^{\ominus}.$$

Подставив в данное выражение значения входящих в него сил, получим цепочку равенств:

$$\begin{aligned} F_y &= F_{-2,-1}^{\mathcal{M}} + F_{-2,-1}^{\ominus} - F_{+2,-1}^{\ominus} - F_{-2,+1}^{\ominus} + F_{+2,+1}^{\ominus} = \\ &= \frac{\mu_0 \tau_0 v}{2\pi a \sqrt{1-\beta^2}} \cdot \frac{\tau_0}{\sqrt{1-\beta^2}} \cdot v + \\ &+ \frac{\tau_0}{2\pi \epsilon_0 \sqrt{1-\beta^2}} \cdot \frac{\tau_0}{\sqrt{1-\beta^2}} - \\ &- \frac{\tau_0}{2\pi \epsilon_0 a} \cdot \frac{\tau_0}{\sqrt{1-\beta^2}} - \frac{\tau_0}{2\pi \epsilon_0 a \sqrt{1-\beta^2}} \cdot \tau_0 + \\ &+ \frac{\tau_0}{2\pi \epsilon_0 a} \cdot \tau_0 = \\ &= \frac{\mu_0 I^2}{2\pi a} \cdot \left\{ \frac{2}{\beta^2} \left(1 - \sqrt{1-\beta^2} \right) \right\}. \quad (8) \end{aligned}$$

Если мы рассмотрим взаимодействие проводников с током в рамках принятой модели для одинаково направленных токов, то фигурные скобки в выражениях (7) или (8) для силы взаимодействия оказываются равными [3, 5, 6]:

$$2 \left(1 + \frac{\sqrt{1-\beta^2} - 1}{\beta^2} \right).$$

Для значений поправочных коэффициентов:

$$\frac{2}{\beta^2} \left(1 - \sqrt{1-\beta^2} \right), \quad (9)$$

$$2 \left(1 + \frac{\sqrt{1-\beta^2} - 1}{\beta^2} \right). \quad (10)$$

в формулах (7) и (8) для антипараллельных и параллельных токов, соответственно, при $\beta \ll 1$ (что в практической электротехнике заведомо имеет место), раскладывая в ряд $\sqrt{1-\beta^2} \approx 1 - \frac{\beta^2}{2}$, с большой точностью получаем 1 (рис. 3).

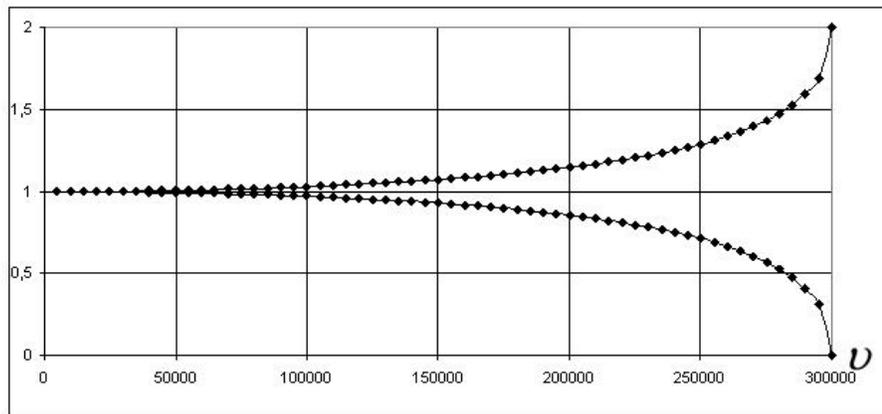


Рис. 3. Графики функций $f_{\downarrow}(v) = \frac{2}{\beta^2} \left(1 - \sqrt{1-\beta^2} \right)$ и $f_{\uparrow}(v) = 2 \left(1 + \frac{\sqrt{1-\beta^2} - 1}{\beta^2} \right)$

Интерпретируя взаимодействие 2-х проводников с током, использование моделей которых (модель Друде-Лоренца) является традиционным и естественным в вузовской и школьной методиках преподавания электромагнетизма, на основе последовательного релятивистского подхода и на основе общих дидактических принципов фундаментальности, последовательности и системности [1–6], демонстрируем студентам процесс получения выражения для силы взаимодействия токов, несколько отличающееся от общепринятого (формула (3)).

Ясно из предыдущего, что появление коэффициентов (9) и (10) в формулах для силы (7) и (8) обусловлено учетом релятивистских поправок в электрическом взаимодействии движущихся электронов. Это дополнительное взаимодействие, ответственное за множители (9) и (10), можно еще объяснить как взаимодействие «заряженных» проводников с током, поскольку в рамках принятой модели и допущений, электрическое поле проводника, по которому течет ток, равно:

$$E = E_- - E_+ = E_0 \left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right), \quad (11)$$

где $E_0 = \frac{\tau_0}{2\pi\epsilon_0\alpha}$.

Это поле можно рассматривать как созданное отрицательно «заряженным» тонким проводом с линейной плотностью заряда τ :

$$\tau = \tau_- - \tau_+ = \frac{\tau_0}{\sqrt{1-\beta^2}} - \tau_0.$$

Мы считаем необходимым объяснить студентам, что выражение «проводник с током заряженный» не следует понимать буквально, но на любую заряженную частицу, находящуюся вне проводника с постоянным током, должна действовать сила со стороны поля, напряженность которого дается выражением (11).

Полагаем, что электрическое поле вне провода с током обусловлено возрастанием напряженности электрического поля в $\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$ раз в поперечном направлении по сравнению с напряженностью поля неподвижного заряда [5, 7, 13], благодаря движению цепочки электронов. При этом нет надобности говорить о «заряде проводника с током». Ведь когда рассматривается взаимодействие 2-х заряженных частиц в СО, относительно которой они движутся в направлении, перпендикулярном линии их соединяющей, сила электрического взаимодействия между ними возрастает в $\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$ раз, но при этом не утвер-

ждается же, что увеличение электрической силы обусловлено увеличением величины заряда в $\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$ раз в результате его движения.

Учитывая вышеприведенные замечания относительно выражения «проводник с током заряженный», обратим внимание студентов на ряд противоречащих друг другу точек зрения по данному вопросу. Существует общепринятая точка зрения: неподвижный проводник с током нейтрален в ССО [4, 6, 9, 13], а условие нейтральности имеет вид:

$$\frac{\rho_-^0}{\sqrt{1-\beta^2}} = -\rho_+^0, \quad (12)$$

где ρ_+^0, ρ_-^0 – объемные плотности заряда положительных ионов и электронов в собственных СО; $\beta = \frac{v}{c}$, v – дрейфовая скорость движения электронов.

Также является тривиальным положение о том, что проводник без тока тоже нейтрален. В ряде публикаций содержатся сомнения в справедливости (12) [3, 5, 6, 14, 15].

В работах [3, 5, 6] содержатся дополнительные аргументы в пользу представления о «заряде проводника с током» в ССО, там же приведен ряд примеров, успешно решаемых в рамках указанных представлений.

Обсуждая со студентами полученные результаты, указываем, что модель, о которой говорилось выше, далека от реальной физической ситуации. Например, остаются совершенно необоснованными (и непонятными) предположения о том, каким образом, и почему, силы, действующие на электронную и ионную подсистемы, складываются; почему не учитывается взаимодействие этих подсистем в рамках принятой модели в пределах каждого из проводников и т. д.

Возможно, что коэффициенты (9) и (10) обусловлены как раз неадекватностью (несоответствием) принятой модели проводника с током объективной реальности.

В процессе самостоятельного научно-методического анализа содержания учебников по электродинамике и СТО [4–13] студенты убеждаются, что в них традиционно используются модели, подобные изображенным на рис. 1 и рис. 2 (то есть не полностью отвечающие реальности). С их помощью обосновывают фундаментальные свойства электромагнитного поля и многие важные законы электромагнетизма. Эти модели, к сожалению, активно эксплуатируются методикой преподавания электродинамики. Поэтому и анализ этих моделей следует прово-

дять, по возможности, разносторонне и последовательно, но тогда с неизбежностью следует принять результаты (7), (8), (11).

И далее, возможно, что в замечательных учебниках [10, 11] сознательно выбрана именно такая модель проводника с током (см. рис. 1), которая в силу своей симметричности позволяет избежать рассмотрения вопроса о «заряде проводника с током». Такой подход, на наш взгляд, в рамках традиционной модели является по меньшей мере дискуссионным.

Поэтому дальнейший, более подробный анализ электродинамических моделей и методическую интерпретацию его результатов, мы рассматриваем как дальнейшую перспективу наших научно-методических изысканий, в процесс которых необходимо вовлекать студентов-физиков. Такой поход будет не только способствовать более осознанному усвоению знаний в области электродинамики, но и формированию у будущих учителей таких личностных качеств как активность в учебно-познавательной деятельности и самостоятельность мышления.

Библиографический список

1. Бурак, В. І. Самостійність навчання як один із сучасних дидактичних принципів / В. І. Бурак // Теорія і практика організації самостійної роботи студентів вищих навчальних закладів : монографія / кол. авторів ; под. ред. О. А. Коновал. – Кривий Ріг : Книжкове видавництво Киреевського. – 2012. – С. 107–134. – укр.
2. Ковалева, Г. Е. Организация самостоятельной работы студентов на основе деятельностной теории учения / Г. Е. Ковалева. – СПб. : Питер, 1995. – 143 с.
3. Коновал, О. А. Електродинаміка і теорія відносності : навчальний посібник для студентів фізичних спеціальностей педагогічних університетів / О. А. Коновал. – Криворізький державний педагогічний університет. – Кривий Ріг : КДПУ, 2011. – 133 с. – укр.
4. Коновал, О. А. Основы электродинамики: навч. посіб для студ. вищ. пед. навч. закл. / О. А. Коновал ; Міністерство освіти і науки України ; Криворізький державний педагогічний університет. – Кривий Ріг : Видавничий дім, 2008. – 347 с. – укр.
5. Коновал, О. А. Відносність електричного і магнітного полів: монографічний навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів / О. А. Коновал ; Міністерство освіти і науки України ; Криворізький державний педагогічний університет. – Кривий Ріг : Видавничий дім, 2008. – 248 с. – укр.
6. Коновал, О. А. Теоретичні та методичні основи вивчення електродинаміки на засадах теорії відносності : монографія / О. А. Коновал ; Міністерство освіти і науки України ; Криворізький державний педагогічний університет. – Кривий Ріг : Видавничий дім, 2009. – 346 с. – укр.
7. Яворский, Б. М. Основы физики : в 2 т. / Б. М. Яворский, А. А. Пинский. – Т. 2. – Москва : Наука, 1972. – 436 с.
8. Матвеев, А. Н. Электричество и магнетизм / А. Н. Матвеев. – Москва : Высшая школа, 1983. – 463 с.
9. Угаров, В. А. Специальная теория относительности / В. А. Угаров. – Москва : Наука, 1977. – 384 с.
10. Парселл, Э. Электричество и магнетизм : учебное руководство : пер. с англ. / Э. Парселл ; под ред. А. И. Шальникова и А. О. Вайсенберга. – 3-е изд., испр. – Москва : Наука, 1983. – 416 с.
11. Савельев, И. В. Курс общей физики : в 3 т. / И. В. Савельев. – Т. 2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – Москва : Наука, 1978. – 480 с.
12. Иродов, И. Е. Электромагнетизм. Основные законы / И. Е. Иродов. – Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2003. – 320 с.
13. Фейнман, Р. Фейнмановские лекции по физике : в 9 т. / Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс. – Т. 5: Электричество и магнетизм. – Москва : Мир, 1966. – 290 с.
14. Николаев, Г. В. Парадокс Фейнмана и асимметрия лабораторной и движущейся систем отсчета / Г. В. Николаев. – Москва, 1975. – 20 с.
15. Мартинсон, М. Л. О плотности заряда внутри проводника с током / М. Л. Мартинсон, А. В. Недоспасов // Успехи физических наук. – 1993. – Т. 163. – № 1. – С. 91–92.