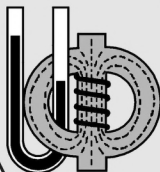


ISSN 2307-5457

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ ОБРАЗОВАНИЯ

*Primum  
inter pares*



**УЧЕБНАЯ  
ФИЗИКА**

Материалы XXIX Всероссийской  
научно-практической конференции

Апрель - июнь 2024 №2

„Учебный физический эксперимент:  
Актуальные проблемы. Современные  
решения“

Издается с января 1997 года

## СОДЕРЖАНИЕ

### Основная школа

|                 |   |
|-----------------|---|
| В. В. Майер     | ЦИФРОВОЙ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ РЕСУРС:                            |
| Е. И. Вараксина | ФОРМИРОВАНИЕ НАГЛЯДНОГО ОБРАЗА<br>ИНТЕРФЕРЕНЦИИ СВЕТА.....3 |

### Старшая школа

|                 |   |
|-----------------|---|
| В. В. Майер     | ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ               |
| Е. И. Вараксина | ОСНОВНЫХ ЗАКОНОВ ФИЗИЧЕСКОЙ ОПТИКИ ..... 16 |

### Высшая школа

|                 |   |
|-----------------|---|
| С. А. Герасимов | ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ЖИДКОСТИ,                                   |
| Т. М. Седов     | МАГНИТ С ПАРУСОМ И ВРАЩАТЕЛЬНЫЙ<br>МОМЕНТ САМОДЕЙСТВИЯ ..... 32 |

|                |                                |
|----------------|--------------------------------|
| И. В. Гребенев | ДЕМОНСТРАЦИОННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ   |
| П. В. Казарин  | ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СВОЙСТВ СТОЯЧИХ   |
| Е. В. Чупрунов | ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН ..... 40 |

|                  |  |
|------------------|--|
| С. В. Барышников | ЗНАКОМСТВО СТУДЕНТОВ С ИДЕЯМИ<br>НАНОТЕХНОЛОГИЙ НА ЗАНЯТИЯХ ПО ФИЗИКЕ ..... 52 |
|------------------|--|

### Исследования

|              |  |
|--------------|--|
| А. С. Куимов | ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКОЙ                                       |
| П. В. Зув    | ГРАМОТНОСТИ УЧАЩИХСЯ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ<br>ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ..... 58 |

### Науковедение

|              |  |
|--------------|--|
| Ю. А. Сауров | КОНСТАНТИН КОХАНОВ: ДВИЖЕНИЕ ВПЕРЕД ..... 66 |
|--------------|--|

|                      |    |
|----------------------|----|
| АВТОРЫ ЖУРНАЛА ..... | 72 |
|----------------------|----|

---

---

**Редакция журнала:**

В. В. Майер (главный редактор), Р. В. Акатов, Е. И. Вараксина, Л. С. Кропачева

**Редакционный совет:**

|                |  |
|----------------|--|
| И. В. Гребенев | д.п.н., профессор, Нижний Новгород       |
| М. Д. Даммер   | д.п.н., профессор, Челябинск             |
| П. В. Зуев     | д.п.н., профессор, Екатеринбург          |
| О. В. Лебедева | д.п.н., доцент, Нижний Новгород          |
| Ю. А. Сауров   | д.п.н., профессор, член-корр. РАО, Киров |
| А. П. Усольцев | д.п.н., профессор, Екатеринбург          |

**Оргкомитет конференции:**

|                          |   |
|--------------------------|---|
| Н. Я. Молотков           | д.п.н., профессор, Тамбов               |
| Г. Г. Никифоров          | к.п.н., доцент, ИСРО РАО, Москва        |
| А. Ю. Пентин             | к.ф.-м.н., доцент, ИСРО РАО, Москва     |
| Ф. А. Сидоренко          | д.ф.-м.н., профессор, Екатеринбург      |
| Я. А. Чиговская–Назарова | к.филол.н., доцент, ректор ГИПУ, Глазов |
| Т. Н. Шамало             | д.п.н., профессор, Екатеринбург         |

**Перечень ВАК:** Журнал «Учебная физика» включен Высшей аттестационной комиссией (ВАК) Минобрнауки России в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук».

**Адрес редакции, издателя и типографии:** 427621, Удмуртия, Глазов, Первомайская, 25, ФГБОУ ВО «ГИПУ», Телефон: (341 41) 5–32–29.  
*E-mail: krop@bk.ru, uch-fiz@mail.ru*

---

---

**Учредитель:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Глазовский государственный инженерно-педагогический университет имени В. Г. Короленко»

Журнал «Учебная физика» зарегистрирован Комитетом Российской Федерации по печати 4 февраля 1997 года, регистрационный № 015686, перерегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) 2 мая 2017 года, ПИ № ФС77–69506.

**Подписной индекс:** 79876.

Использование и перепечатка материалов допускаются только по договоренности с редакцией журнала.

Сдано в набор 03.06.24. Подписано в печать 17.06.24.

Дата выхода в свет: 24.06.24.

Формат 60 × 90 1/16. Усл. печ. л. 4,5.

Заказ 164. Тираж 200 экз. Цена свободная.

**Первая страница обложки:** Отремонтированная электрофорная машина (Майер В. В., Вараксина Е. И., Васильев И. А., Корнев Ю. А. Ремонт школьной электрофорной машины как средство развития инженерной компетенции // Учебная физика. — 2023. — № 2. — С. 14–37).

*Научная статья*

ББК 74.262.23

УДК 372.853

С. А. Герасимов, Т. М. Седов  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК  
В ЖИДКОСТИ, МАГНИТ  
С ПАРУСОМ И ВРАЩАТЕЛЬНЫЙ  
МОМЕНТ САМОДЕЙСТВИЯ



Оказывается, можно плыть, дуя в парус собственной лодки. Это возможно, если лодка намагничена, а в атмосфере течет электрический ток, хотя это и противоречит третьему закону Ньютона в его классической интерпретации. Поэтому без теоретического объяснения такое явление и такая гипотеза остаются не только сомнительными, но и не обоснованными.

*Ключевые слова:* магнит, электропроводящая жидкость, электромагнитное вращение, закон сохранения момента импульса, самодействие.

S. A. Gerasimov, T. M. Sedov  
ELECTRIC CURRENT IN A LIQUID,  
MAGNET WITH SAIL AND TORQUE  
OF SELF-ACTION

It turns out you can sail by blowing into the sail of your boat. This is possible if the boat is magnetized and there is an electric current flowing in the atmosphere, although this contradicts Newton's third law in its classical formulation. Therefore, without a theoretical explanation, such a phenomenon is not only doubtful, but also unfounded.

*Keywords:* magnet, electrically conducting liquid, electromagnetic rotation, law conservation of angular momentum, self-action.

Только в механике и гидродинамике нельзя заставить плыть лодку, дуя в ее парус. Это запрещает третий закон Ньютона. В

электродинамике все сложнее и интереснее. Магнитное взаимодействие в той или иной степени является результатом запаздывания между действием и результатом, то есть по существу представляет собой неоспоримое следствие специальной теории относительности.

Намагниченное тело, находящееся в жидкости с постоянным электрическим током, движется [1]. Одно из объяснений такого явления — магнитное взаимодействие намагниченного тела с так называемыми боковыми токами, обтекающими магнит [2]. С одной стороны магнита ток в жидкости и поверхностный молекулярный ток направлены в одну сторону, что приводит к притяжению магнита к току. С другой стороны ток в жидкости и молекулярный ток направлены в противоположные стороны. Их отталкивание усиливает эффект. Однако такое явление дает о себе знать даже тогда, когда расстояния между электрическим током и магнитом велики. Никакого обтекания цилиндрического магнита электропроводящей жидкостью в таком варианте эксперимента не происходит [3]. В этом случае ток в жидкости действует на так называемые паруса, они же электронепроводящие тонкие пластины, установленные на боковых поверхностях цилиндрического намагниченного тела.

Есть определенные претензии и к экспериментальному изучению явления. Более адекватным подтверждением явления был бы сравнительный эксперимент, при котором не только наблюдается, но и подробно изучается вариант такого вращения в двух случаях, то есть с парусами и без них. Так, если цилиндрический магнит, подвешенный на тонкой струне над кюветой, в которой от центра к краю или наоборот течет постоянный электрический ток, то жидкость вращается, а магнит, конечно же, нет (рис. 1.1).

Однако, если при тех же неизменных расстояниях магнит снабдить парусами, то жидкость и магнит вращаются в одну сторону [4]. Получается, что электрический ток в жидкости, «дуя» на паруса, заставляет эту лодку в виде цилиндрического магнита плыть. При этом, поскольку поверхностный молекулярный ток «течет» по поверхности магнита, то воздействие электрического тока на магнит не вызывает вращения, раз сила  $\vec{I}_M$ , действующая на молекулярный ток, перпендикулярна и направлению молекулярного тока  $\vec{j}$ , и индукции магнитного поля  $\vec{B}_C$ , создаваемого электрическим током, как и где бы он ни тек (рис. 1.2);  $\vec{B}$  — индукция магнитного поля, создаваемого магнитом,  $\vec{i}$  — плотность электрического тока в жидкости.

Измерения вращательного момента почти продемонстрировали то, что надо, то, что ожидалось [5]. Без парусов момент сил, действующий на магнит, оказался пренебрежимо мал, тогда как



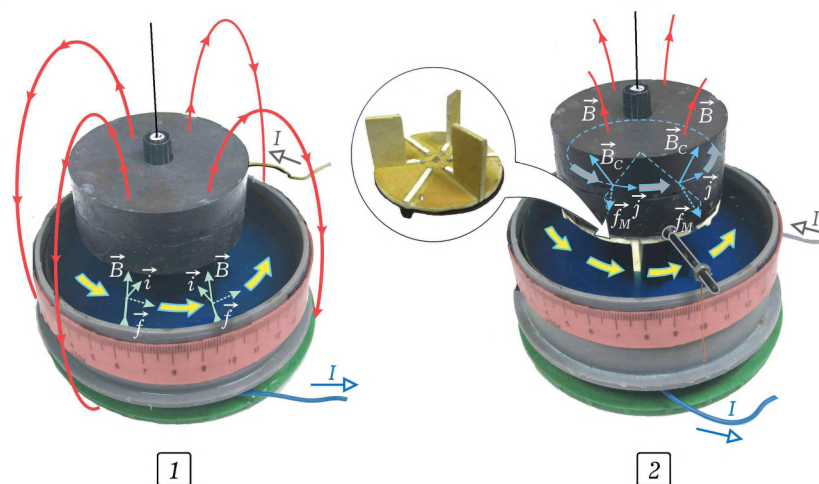


Рис. 1. Два варианта одного эксперимента с магнитом и кюветой с постоянным электрическим током

с парусами — значителен. Осталось совсем немного. Во-первых, хорошо бы разобраться со скоростями вращения жидкости и магнита: не дай бог, если с парусами магнит еле поворачивается.

Самый простой способ измерить распределение скоростей в жидкости — снять явление на видеокамеру, предварительно замусорив поверхность жидкости, что дает возможность проследить и за движением жидкости, и за поворотом магнита. Разумеется, вблизи периферии кюветы жидкость вращается быстрее, чем под магнитом (рис. 2.1), и самое основное: в непосредственной близости от лопастей крыльчатки, составляющих парус, жидкость движется вместе с парусом (рис. 2.2).

Отсюда очень важный вывод: часть жидкости  $L$ , находящаяся рядом с парусами, и магнит можно рассматривать как одно тело, которое вместе с проводниками  $C$ , обеспечивающими ток в жидкости, и источником питания составляет замкнутую систему (рис. 3), а так как система замкнута, то суммарный момент сил в системе должен быть равен нулю [6]. Это так, если рассматриваются не только действие и реакция, часто называемая противодействием, а следует повториться: *все силы, действующие между телами, составляющими систему.*

Сначала небольшое, но вполне разумное упрощение. Вместо цилиндрического магнита лучше рассмотреть один-единственный виток  $M$ , по которому течет постоянный молекулярный ток силы  $J$  (рис. 3). Забудем на минуту, что ни что, ни ток в жидкости  $L$ ,

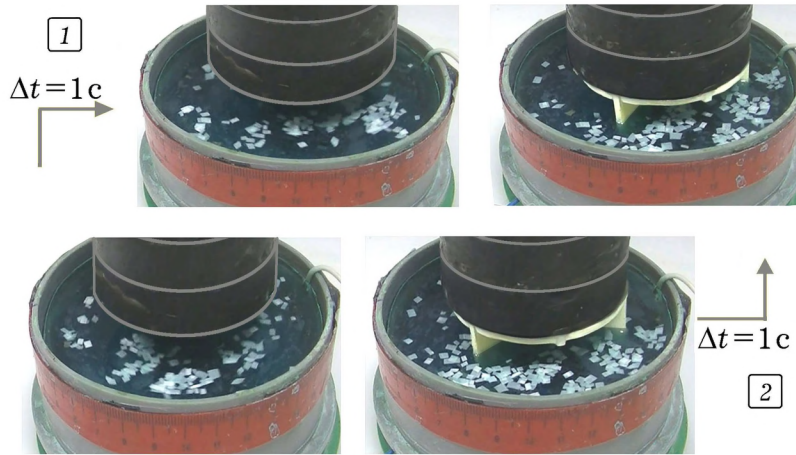


Рис. 2. Измерение скорости вращения жидкости

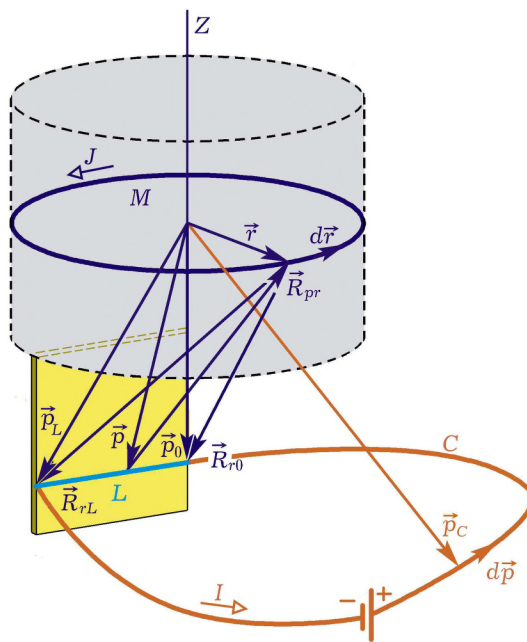


Рис. 3. Геометрия взаимодействия тока в жидкости с молекулярным током

ни электрический ток в проводах  $C$  не могут заставить магнит, а значит и виток  $M$ , вращаться вокруг своей оси. Для того, чтобы сделать это, сила, действующая на виток или на цилиндрический симметричный магнит, должна быть направлена по касательной к окружности витка или вдоль поверхности магнита. Такого не бывает: магнитные силы поперечны.

В общем виде задачу всегда решать проще, поэтому надо рассмотреть виток  $M$  произвольной формы, жестко соединенный с проводником  $L$  произвольной формы, в который постоянный ток поступает через провода  $C$  тоже произвольной формы.

Сила Био–Савара, с которой элемент тока  $I d\vec{p}$  действует на  $J d\vec{r}$

$$d\vec{F}_{pr} = \frac{\mu_0 I J}{4\pi R_{pr}^3} \left[ d\vec{r} \times \left[ d\vec{p} \times \vec{R}_{pr} \right] \right],$$

не равна по величине и не противоположна по направлению силе

$$d\vec{F}_{rp} = \frac{\mu_0 I J}{4\pi R_{pr}^3} \left[ d\vec{p} \times \left[ d\vec{r} \times \left( -\vec{R}_{pr} \right) \right] \right],$$

с которой элемент тока  $J d\vec{r}$  действует на  $I d\vec{p}$ . От двойных векторных произведений лучше избавиться, воспользовавшись тождеством

$$\left[ \vec{a} \times \left[ \vec{b} \times \vec{c} \right] \right] = \vec{b} (\vec{a}\vec{c}) - \vec{c} (\vec{a}\vec{b}).$$

Это дает

$$d\vec{F}_{pr} = \frac{\mu_0 I J}{4\pi R_{pr}^3} \left( d\vec{p} \left( \vec{R}_{pr} d\vec{r} \right) - \vec{R}_{pr} \left( d\vec{r} d\vec{p} \right) \right),$$

$$d\vec{F}_{rp} = -\frac{\mu_0 I J}{4\pi R_{pr}^3} \left( d\vec{r} \left( \vec{R}_{pr} d\vec{p} \right) - \vec{R}_{pr} \left( d\vec{r} d\vec{p} \right) \right).$$

Поскольку векторное произведение радиус–вектора на силу — момент силы, то умножение слева первой силы на  $\vec{r}$ , а второй на  $\vec{p}$  позволяет записать дифференциалы моментов сил:

$$\left[ \vec{r} \times d\vec{F}_{pr} \right] = -\frac{\mu_0 I J}{4\pi R_{pr}^3} \left( \left[ d\vec{p} \times \vec{r} \left( \vec{R}_{pr} d\vec{r} \right) \right] + \left[ \vec{r} \times \vec{R}_{pr} \right] \left( d\vec{r} d\vec{p} \right) \right),$$

$$\left[ \vec{p} \times d\vec{F}_{rp} \right] = \frac{\mu_0 I J}{4\pi R_{pr}^3} \left( \left[ d\vec{r} \times \vec{p} \left( \vec{R}_{pr} d\vec{p} \right) \right] + \left[ \vec{p} \times \vec{R}_{pr} \right] \left( d\vec{r} d\vec{p} \right) \right).$$

Интерес, конечно, представляет суммарный момент силы, при вычислении которого следует учесть условие

$$\left[ \vec{r} \times \vec{R}_{pr} \right] = \left[ \vec{p} \times \vec{R}_{pr} \right],$$

вытекающее из суммы векторов

$$\vec{r} = \vec{R}_{pr} + \vec{p}$$

и обнуляющее сумму вторых слагаемых в последних дифференциалах моментов сил. Поэтому полный вращающий момент, он же момент сил, с которым участок тока  $L$  и замкнутый виток  $M$ , моделирующий цилиндрический магнит, действует сам на себя, должен быть

$$\begin{aligned} \vec{N}_s &= \vec{N}_{pr} + \vec{N}_{rp} = \\ &= \frac{\mu_0 I J}{4\pi} \left( \oint_M \left[ d\vec{r} \times \int_L \frac{\vec{R}_{pr} d\vec{p}}{R_{pr}^3} \right] - \int_L \left[ d\vec{p} \times \oint_M \frac{\vec{r} \vec{R}_{pr} d\vec{r}}{R_{pr}^3} \right] \right). \end{aligned} \quad (1)$$

Проще всего начать со второго интеграла, вычислив сначала полный дифференциал от векторной функции  $d\vec{r}/R_{pr}$ . Для скалярной функции  $\psi$  это

$$d\psi = \frac{\partial\psi}{\partial x} dx + \frac{\partial\psi}{\partial y} dy + \frac{\partial\psi}{\partial z} dz = (d\vec{r} \cdot \vec{\nabla})\psi.$$

Аналогично для векторной функции:

$$d\frac{\vec{r}}{R} = (d\vec{r} \cdot \vec{\nabla}) \frac{\vec{r}}{R},$$

где  $R = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$ . В декартовых координатах это будет

$$(d\vec{r} \cdot \vec{\nabla}) \frac{\vec{r}}{R} = \left( dx \frac{\partial}{\partial x} + dy \frac{\partial}{\partial y} + dz \frac{\partial}{\partial z} \right) \frac{x\vec{e}_x + y\vec{e}_y + z\vec{e}_z}{R} =$$

$$\begin{aligned} &\frac{1}{R} (dx\vec{e}_x + dy\vec{e}_y + dz\vec{e}_z) + (x\vec{e}_x + y\vec{e}_y + z\vec{e}_z) \left( dx \frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{R} + dy \frac{\partial}{\partial y} \frac{1}{R} + dz \frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{R} \right) = \\ &= \frac{d\vec{r}}{R} - \vec{r} \frac{\vec{R} d\vec{r}}{R^3}, \end{aligned}$$

поскольку

$$dx \frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{R} = dx \frac{\partial}{\partial x} (x^2 + y^2 + z^2)^{-1/2} = -\frac{x dx}{R^3},$$

и следовательно, в общем виде

$$d\frac{\vec{r}}{R_{pr}} = \frac{d\vec{r}}{R_{pr}} - \frac{\vec{r} (\vec{R}_{pr} d\vec{r})}{R_{pr}^3}. \quad (2)$$



Второе слагаемое в этом выражении — ничто иное как подинтегральное выражение второго интеграла (1). Не надо спешить его вычислять; что-то подобное должно появиться и в первом интеграле.

Чтобы вычислить первый интеграл, надо перейти от переменной  $\vec{p}$  к  $\vec{r} - \vec{R}_{pr}$  и учесть, что  $d\vec{p} = -d\vec{R}_{pr}$  для данного  $\vec{r}$ . Это дает возможность переписать интеграл в виде

$$\oint_M \left[ d\vec{r} \times \int_L \vec{p} \frac{\vec{R}_{pr} d\vec{p}}{R_{pr}^3} \right] = \oint_M \left[ d\vec{r} \times \int_L d \frac{\vec{p}}{R_{pr}} \right] - \int_L \oint_M \frac{[d\vec{r} \times d\vec{p}]}{R_{pr}}. \quad (3)$$

Внутренний интеграл в первом слагаемом — интеграл от полного дифференциала  $\vec{p}/R_{pr}$ , поэтому

$$\int_L d \frac{\vec{p}}{R_{pr}} = \frac{\vec{p}_0}{R_{r0}} - \frac{\vec{p}_L}{R_{rL}}, \quad (4)$$

где  $\vec{p}_L$  и  $\vec{p}_0$  — векторы, определяющие положение конца и начала незамкнутого тока  $L$ ;  $R_{rL}$  и  $R_{r0}$  — расстояния от конца и начала участка тока  $L$  до элемента тока  $Jd\vec{r}$ . Подстановка выражения (2) и интеграла (3) в (1) оставляет только интеграл от полного дифференциала. Осталось учесть, что

$$\vec{A}_L = \frac{\mu_0 J}{4\pi} \oint_M \frac{d\vec{r}}{R_{rL}}, \quad \vec{A}_0 = \frac{\mu_0 J}{4\pi} \oint_M \frac{d\vec{r}}{R_{r0}},$$

— значения векторного потенциала, создаваемого замкнутым током  $M$  в конце и в начале тока в жидкости. Конечный результат для момента сил записывается чрезвычайно просто

$$\vec{N}_s = I \left( \left[ \vec{p}_L \times \vec{A}_L \right] - \left[ \vec{p}_0 \times \vec{A}_0 \right] \right), \quad (5)$$

причем векторные потенциалы можно сравнительно легко посчитать и для цилиндрического магнита. Надо лишь вместо тока ввести намагниченность и проинтегрировать по боковой поверхности магнита, при этом, правда, это будет некоторый средний момент сил. Надо ли учитывать «не тонкость» тока в участке  $L$  — все зависит от задачи.

А теперь можно поговорить и о конкретном эксперименте. Симметрия цилиндрического магнита означает, что  $\vec{A}_0 = 0$ , то есть суммарный момент сил самодействия нулю не равен. И еще, на магнит, либо на виток вращательный момент не действует,

хотя полный момент сил для всей замкнутой системы, конечно же, равен нулю. То есть, на проводник  $C$  действует момент сил равный по величине (5) и противоположный по направлению.

Все встало на свои места, уготовленные законом сохранения импульса, есть, правда, одна неприятность, которую придется обсудить отдельно. Дело в том, что как-то лишенным внимания оказалось взаимодействие токов, текущих в жидкости и в проводниках. Даже если участок  $L$  — прямолинеен, на него тоже действует магнитное поле, создаваемое током, текущим в  $C$ , а он в свою очередь действует на  $C$ . Более того, проводник  $C$  не замкнут и изогнут, значит на него тоже действует своя сила самодействия, именно своя [7], отличающаяся от упомянутого здесь варианта. Эта сила очень слаба, пропорциональна квадрату силы тока, и тоже удовлетворяет законам сохранения импульса и момента импульса, а раз так, то она никак не может испортить или поставить под сомнение все, что было сказано выше.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Фарадей М. Экспериментальные исследования по электричеству. — М.: Изд-во АН СССР, 1951.
2. Сигалов Р.Г. Новые исследования движущих сил магнитного поля. — Ташкент: Изд-во Наука УзССР, 1965.
3. Герасимов С. А., Сташенко В. В. Боковые токи в электромагнитном вращении // Вопросы прикладной физики. — 2005. — № 12. — С. 93–95.
4. Герасимов С. А., Седов Т. М. Магнит, парус и что-то вроде самодействия // Проблемы учебного физического эксперимента. Сборник научных трудов. Выпуск 39. — М.: ИСПО РАО, 2024. — С. 55–58.
5. Герасимов С. Электричество с парусами // Квант. — 2023. — № 10. — С. 36–39.
6. Герасимов С. А., Прядченко В. В. Псевдосамодействие и правило эквивалентности в магнитостатике // Прикладная физика. — 2010. — № 2. — С. 22–24.
7. Gerasimov S. A. Self-torque in classical electrodynamics // Вопросы прикладной физики. — 2006. — № 13. — С. 52–57.

Южный федеральный  
университет, Ростов-на-Дону

Поступила в редакцию 16.02.24.