

## КОРРЕКЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФОРМЫ ЗАПИСИ УРАВНЕНИЙ ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМА И СОЗДАНИЕ НА ИХ ОСНОВЕ НОВОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЕДИНИЦ

*Предлагается осуществить коррекцию математической формы записи уравнений электродинамики и на их основе создать новую четырехразмерную теоретическую систему электромагнитных единиц (сокращенно: СТ), которую рекомендуется использовать при изложении курса физики “Электромагнетизм”. Уравнения электромагнетизма, записанные в предлагаемой системе, не содержат размерных постоянных  $\varepsilon_0$  и  $\mu_0$ : вместо них используются коэффициент  $k_0 = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2$  и фундаментальная константа  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$  — скорость света в вакууме.*

Законы физики не зависят от систем единиц, поэтому должен соблюдаться принцип инвариантности математической формы записи законов и основных определений физики в различных системах единиц. Этот принцип выполняется во всех разделах физики, кроме электромагнетизма.

Часть уравнений электромагнетизма, записанных в системе СГС, содержат фундаментальную константу  $c$  — скорость света в вакууме, а в определяющих уравнениях (закон Кулона, закон Ампера для параллельных токов, закон Био–Савара–Лапласа) отсутствуют размерные коэффициенты  $\varepsilon_0$  и  $\mu_0$  и множитель  $1/(4\pi)$ .

В определяющих уравнениях, записанных в СИ, этот множитель появился в результате “рационализации” формы записи уравнений электромагнетизма, предложенной в 1892 г. английским физиком О. Хевисайдом с целью исключения множителя  $4\pi$  из расчетных формул, широко используемых в электротехнике и из уравнений Максвелла. Необходимо особо отметить, что размерные коэффициенты  $\varepsilon_0$  и  $\mu_0$  не имеют никакого физического смысла и лишь их комбинация  $1/\sqrt{\varepsilon_0\mu_0} = c$  представляет собой скорость света в вакууме.

В табл. 1 представлены некоторые уравнения электромагнетизма, имеющие различный вид в СИ и системе СГС.

В соответствии с ГОСТ 8.417–81.ГСИ. “Единицы физических величин” [1] в учебном процессе во всех учебных заведениях рекомендована к обязательному использованию Международная система единиц (СИ). Тем не менее, во многих учебниках физики при изложении учения об электричестве параллельно приводятся формулы, записанные в системе СГС [2, 3]. А в последние годы появилась тенденция

Таблица 1

## Уравнения электромагнетизма, записанные в системе СГС и СИ

	СИ	СГС
Закон Кулона	$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$	$F = \frac{Q_1 Q_2}{\epsilon r^2}$
Закон Ампера для параллельных токов	$\frac{F}{l} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I_1 I_2}{r}$	$\frac{F}{l} = \frac{2\mu I_1 I_2}{c^2 r}$
Закон Био–Савара–Лапласа	$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I [d\mathbf{l} \times \mathbf{r}]}{r^3}$	$d\mathbf{B} = \frac{I [d\mathbf{l} \times \mathbf{r}]}{cr^3}$
Электрическое смещение $\mathbf{D}$	$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P};$ $\mathbf{D} = \epsilon_0 \epsilon \mathbf{E}$	$\mathbf{D} = \mathbf{E} + 4\pi \mathbf{P};$ $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$
Напряженность магнитного поля $\mathbf{H}$	$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} - \mathbf{M}; \mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0 \mu}$	$\mathbf{H} = \mathbf{B} - 4\pi \mathbf{M}; \mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu}$
Магнитный момент $\mathbf{p}_m$	$\mathbf{p}_m = I S \mathbf{n}$	$\mathbf{p}_m = \frac{1}{c} I S \mathbf{n}$
Магнитодвижущая сила $F_m$	$F_m = \oint H \cdot dl = \sum_{i=1}^N I_i$	$F_m = \oint H \cdot dl = \frac{4\pi k_0}{c} \sum_{i=1}^N I_i$
Магнитное сопротивление участка цепи $R_m$	$R_m = \frac{U_m}{\Phi} = \frac{l}{\mu_0 \mu S}$	$R_m = \frac{U_m}{\Phi} = \frac{l}{\mu S}$
Теорема Гаусса	$\text{div} \mathbf{D} = \rho$	$\text{div} \mathbf{D} = 4\pi \rho$

[4, 5] при изложении курса “Электромагнетизм” использовать только систему СГС, хотя эта система единиц даже не значится в числе допускаемых к применению в учебном процессе. Можно также констатировать, что в учебниках физики прошлого времени наиболее авторитетных авторов (Л.Д. Ландау, И.Е. Тамм, Д.В. Сивухин) [6–8] и в фундаментальном Берклевском курсе физики использовалась система СГС, а не система МКСА.

Это связано с тем, электромагнитные единицы СИ полностью перешли из системы единиц МКСА, которая была основана уравнениях электромагнетизма, соответствующих научным воззрениям на электромагнитное поле середины XIX века, согласно которым ваку-

ум (“светоносный эфир” по терминологии того времени) по своим свойствам принципиально не отличается от обычных сред и, следовательно, должен обладать диэлектрической  $\varepsilon_0$  и магнитной  $\mu_0$  проницаемостями вакуума. Для описания электромагнитного поля в веществе, кроме силовых характеристик — напряженности электрического поля  $\mathbf{E}$  и магнитной индукции  $\mathbf{B}$  используют вспомогательные величины — электрическое смещение  $\mathbf{D}$  и напряженность магнитного поля  $\mathbf{H}$ . В СИ эти величины связаны между собой, соответственно, уравнениями  $\mathbf{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \mathbf{E}$  и  $\mathbf{H} = \mathbf{B} / (\mu_0 \mu)$ . В вакууме электромагнитное поле также должно характеризоваться четырьмя величинами  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{D}$  ( $\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E}$ ),  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{H}$  ( $\mathbf{H} = \mathbf{B} / \mu_0$ ). Следовательно, в СИ величины  $\mathbf{D}$  и  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{H}$  и  $\mathbf{B}$  имеют, соответственно, разные формулы размерности:  $\dim \mathbf{D} \neq \dim \mathbf{E}$  и  $\dim \mathbf{H} \neq \dim \mathbf{B}$ .

Согласно современным научным представлениям 1) деление единого электромагнитного поля на электрическое и магнитное поле относительно, т.е. зависит от выбранной системы отчета, и поэтому силовые характеристики электромагнитного поля (напряженность электрического поля  $\mathbf{E}$  и магнитная индукция  $\mathbf{B}$ ) должны быть однородными величинами и иметь одинаковую размерность:  $\dim \mathbf{E} = \dim \mathbf{B}$ ; 2) для описания электромагнитных явлений в среде используют четыре величины: для электрического поля —  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{D}$ , для магнитного поля —  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{H}$ , при этом размерности вспомогательных величин равны размерностям основных силовых характеристик электромагнитного поля:  $\dim \mathbf{D} = \dim \mathbf{E}$  и  $\dim \mathbf{H} = \dim \mathbf{B}$ ; 3) для описания электрического и магнитного полей в вакууме достаточно двух векторов  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{B}$ , так как для вакуума должны выполняться равенства  $\mathbf{D} = \mathbf{E}$  и  $\mathbf{H} = \mathbf{B}$ .

Некоторые уравнения электромагнетизма, записанные в СИ, не соответствуют этим условиям, и поэтому преподавание курса физики с использованием электромагнитных единиц СИ дает “повод для введения неправильных представлений о сущности электрических и магнитных полей [8]”.

В системе СГС однородные величины  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{B}$  имеют одинаковую формулу размерности, в вакууме выполняются равенства  $\mathbf{D} = \mathbf{E}$  и  $\mathbf{H} = \mathbf{B}$ , а уравнения электромагнетизма “отличаются той неповторимой простотой и стройностью, за которые не жаль заплатить переводом электромагнитных единиц из СГС в СИ и обратно [9]”.

Но возврат к системе СГС, на наш взгляд, является регрессивным шагом, так как электромагнитные единицы этой системы обладают многими принципиальными недостатками, которые создают у студентов “неправильные представления о величинах, определяющих магнитное состояние тел [10]”. Перечислим эти недостатки: 1) большинство единиц имеет дробные показатели размерности (по выражению

А. Зоммерфельда — “противоестественные” размерности); 2) некоторые электромагнитные величины имеют размерности механических величин, например, индуктивность и емкость имеют размерность длины; 3) многие электромагнитные единицы СГС не имеют собственных названий; 4) единицы магнитной индукции **B** и напряженности магнитного поля **H** имеют разные названия (соответственно, “гаусс” и “эрстед”), хотя для вакуума эти величины, как было сказано выше, неразличимы; 5) величины с разным физическим смыслом имеют одинаковые размерности:

— напряженность электрического поля **E** и поляризованность **P** (напряженность электрического поля — это сила, действующая со стороны поля на положительный единичный заряд, отнесенная к величине этого заряда, а поляризуемость — это суммарный электрический момент объема диэлектрика, отнесенный к величине этого объема);

— магнитная индукция **B** и намагниченность **M** (индукция магнитного поля — это сила, действующая со стороны магнитного поля на единичный заряд, движущийся с относительной скоростью  $v/c$ , а намагниченность — это суммарный магнитный момент объема магнетика, отнесенный к величине этого объема).

Таким образом, преподавание курса физики “Электромагнетизм” с использованием системы СГС или СИ, вызывает те или иные трудности.

Для разрешения этого противоречия предлагается следующее.

1. Отказаться от рационализированной формы записи законов и основных определений электромагнетизма.

2. Записать уравнения электромагнетизма в таком же виде, что и в системе СГС (т.е. без размерных коэффициентов  $\epsilon_0$  и  $\mu_0$ ), но с привлечением коэффициента  $k_0$ , величина и размерность которого зависит от системы единиц.

3. Разработать новую четырехмерную систему электромагнитных единиц, которая не имеет недостатков электромагнитных единиц СИ и системы СГС и предназначена для преподавания курса физики “Электромагнетизм”.

В соответствии с п.п. 1–3 проведена коррекция математической формы записи некоторых уравнений электромагнетизма [11], которые теперь имеют одинаковый вид в различных системах единиц (табл. 2) и соответствуют современным научным взглядам на электромагнитное поле.

На основе этих уравнений разработана Теоретическая система электромагнитных единиц, сокращенно СТ, в которой основные единицы совпадают с основными единицами СИ (т.е. используются метр,

килограмм, секунда и ампер). Производные единицы СТ определяются на основе уравнений, приведенных в табл. 2.

В СТ основная единица — ампер (1 А) определяется (также как и в СИ) из закона Ампера для двух проводников с токами, записанного в виде уравнения:

$$\frac{F}{l} = k_0 \frac{2\mu I_1 I_2}{c^2 r}, \quad (1)$$

как сила неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого кругового сечения, расположенным на расстоянии 1 м один от другого в вакууме, создал бы между проводниками силу, равную  $2 \cdot 10^{-7}$  Н на каждый метр длины. Следовательно, размерный коэффициент  $k_0$  в уравнении (1) должен иметь следующие величину и размерность

$$k_0 = 10^{-7} \zeta^2 \cong 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2, \quad (2)$$

$$\dim k_0 = \text{L}^3 \text{MT}^{-4} \text{I}^{-2}, \quad (3)$$

где  $\zeta = 2,99792458 \cdot 10^8$  — числовое значение скорости света в вакууме.

В системе СГС коэффициент  $k_0$  равен безразмерной единице ( $k_0 = 1$ ).

Формулы размерности и соотношения между единицами электрических и магнитных величин СТ и СИ приведены в табл. 3.

Необходимо отметить, что в СТ почти все единицы электрических величин (кроме единицы электрического смещения и потока электрического смещения) совпадают с соответствующими единицами СИ.

Названия некоторых магнитных единиц СТ образованы от названий соответствующих магнитных единиц СИ с добавлением прилагательного “теоретический (ая)”, которое позволяет отличить единицу СТ от соответствующей единицы СИ. В частности, в СТ единица магнитной индукции **В** имеет название “тесла теоретическая”, при написании: 1 Тл(Т); единица потока магнитной индукции  $\Phi$  — “вебер теоретический”, 1 Вб(Т), единица индуктивности  $L$  — “генри теоретический”, 1 Гн(Т).

Необходимо особо отметить, что в СТ одну и ту же единицу имеют напряженность электрического поля **Е** и электрическое смещение **Д** (“вольт на метр” [1 В/м]), магнитная индукция **В** и напряженность магнитного поля **Н** (“теоретическая тесла” (1 Тл(Т))).

Таблица 2

## Уравнения электромагнетизма, записанные в СИ, СТ и системе СГС

	СИ	СТ	СГС
Закон или определение величины	$\mu_0 \cong 1,26 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$ $\varepsilon_0 \cong 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$	$k_0 \cong 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2$ $c \cong 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$	$k_0 = 1$ $c \cong 3 \cdot 10^{10} \text{ см/с}$
Закон Кулона	$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{\varepsilon r^2}$	$F = k_0 \frac{Q_1 Q_2}{\varepsilon r^2}$	
Закон Ампера для параллельных токов	$\frac{F}{l} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I_1 I_2}{r}$	$\frac{F}{l} = k_0 \frac{2\mu I_1 I_2}{c^2 r}$	
Закон Био–Савара–Лапласа	$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I[d\mathbf{l} \times \mathbf{r}]}{r^3}$	$d\mathbf{B} = k_0 \frac{I[d\mathbf{l} \times \mathbf{r}]}{c r^3}$	
Электрическое смещение $\mathbf{D}$	$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}$	$\mathbf{D} = \mathbf{E} + 4\pi k_0 \mathbf{P}$	
Связь между $\mathbf{D}$ и $\mathbf{E}$	$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \mathbf{E}$	$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}$	
Напряженность магнитного поля $\mathbf{H}$	$\mathbf{H} = \mathbf{B} / \mu_0 - \mathbf{M}$	$\mathbf{H} = \mathbf{B} - 4\pi k_0 \mathbf{M}$	
Связь между $\mathbf{H}$ и $\mathbf{B}$	$\mathbf{H} = \mathbf{B} / (\mu_0 \mu)$	$\mathbf{H} = \mathbf{B} / \mu$	
Электрический момент диполя $\mathbf{p}$	$\mathbf{p} =  Q l$		
Магнитный момент $\mathbf{p}_m$	$\mathbf{p}_m = I S \mathbf{n}$	$\mathbf{p}_m = \frac{1}{c} I S \mathbf{n}$	
Магнитодвижущая сила $F_m$	$F_m = \oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \sum_{i=1}^N I_i$	$F_m = \oint H \cdot d\mathbf{l} = \frac{4\pi k_0}{c} \sum_{i=1}^N I_i$	
Магнитное сопротивление однородного участка цепи $R_m$	$R_m = \frac{U_m}{\Phi} = \frac{\ell}{\mu_0 \mu S}$	$R_m = \frac{U_m}{\Phi} = \frac{\ell}{\mu S}$	
Уравнения Максвелла (дифференциальная форма)			
Закон Фарадея	$\text{rot } \mathbf{E} = -\frac{d\mathbf{B}}{dt}$	$\text{rot } \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{d\mathbf{B}}{dt}$	
Закон полного тока	$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{d\mathbf{D}}{dt}$	$\text{rot } \mathbf{H} = \frac{1}{c} \left( 4\pi k_0 \mathbf{j} + \frac{d\mathbf{D}}{dt} \right)$	
Теорема Гаусса	$\text{div } \mathbf{D} = \rho$	$\text{div } \mathbf{D} = 4\pi k_0 \rho$	
Непрерывность линий магнитной индукции	$\text{div } \mathbf{B} = 0$		

Таблица 3

**Формулы размерности и соотношения между электромагнитными единицами СИ и СТ**

Физическая величина	Формула размерности		Соотношения между единицами СИ и СТ
	СИ	СТ	
Электрический заряд $Q$	ТИ		1 Кл
Сила электрического тока $I$	I		1 А
Потенциал $\varphi$ ; Напряжение $U$	$L^2MT^{-3}I^{-1}$		1 В
Электрическое сопротивление $R$	$L^2MT^{-3}I^{-2}$		1 Ом
Удельное электрическое сопротивление $\rho_0$	$L^3MT^{-3}I^{-2}$		1 Ом·м
Электрическая емкость $C$	$L^{-2}M^{-1}T^4I^2$		1 Ф
Электрический момент диполя $p$	ЛТИ		1 Кл·м
Поляризация $P$	$L^{-2}ТИ$		1 Кл/м <sup>2</sup>
Напряженность электрического поля $e$	$LMT^{-3}I^{-1}$		1 В/м
Электрическое смещение $D$	$L^{-2}ТИ$	$LMT^{-3}I^{-1}$	1 Кл/м <sup>2</sup> = $36\pi \cdot 10^9$ В/м
Поток электрического смещения $\Psi$	ТИ	$L^3MT^{-3}I^{-1}$	1 Кл = $36\pi \cdot 10^9$ В·м
Магнитная индукция $B$	$MT^{-2}I^{-1}$	$LMT^{-3}I^{-1}$	1 Тл = $3 \cdot 10^8$ Тл(Т)
Напряженность магнитного поля $H$	$L^{-1}I$	$LMT^{-3}I^{-1}$	1 А/м = $120\pi$ Тл(Т)
Магнитный момент $P_m$	$L^2I$	ЛТИ	$1 \text{ А} \cdot \text{м}^2 = \frac{1}{3 \cdot 10^8} \text{ Тм}$
Намагниченность $M$	$L^{-1}I$	$L^{-2}ТИ$	$1 \text{ А/м} = \frac{1}{3 \cdot 10^8} \text{ Тм/м}^3$
Индуктивность $L$	$L^2MT^{-2}I^{-2}$	$L^4MT^{-4}I^{-2}$	1 Гн = $9 \cdot 10^{16}$ Гн(Т)
Магнитный поток $\Phi$ Потокосцепление $\Psi$	$L^2MT^{-2}I^{-1}$	$L^3MT^{-3}I^{-1}$	1 Вб = $3 \cdot 10^8$ Вб(Т)
Магнитодвижущая сила $F_m$	I	$L^2MT^{-3}I^{-1}$	1 А = $120\pi$ Вт/А
Магнитное сопротивление $R_m$	$L^{-2}M^{-1}T^2I^2$	$L^{-1}$	$1 \text{ Гн}^{-1} = 1 \text{ м}^{-1}$

Магнитный момент  $\mathbf{p}_m$  в СТ определяется по уравнению  $\mathbf{p}_m = (I/c)\mathbf{S}$ , из которого следует размерность и единица магнитного момента

$$\dim \mathbf{p}_m = \dim I \cdot \dim S / \dim c = I \cdot L^2 / (L^{-1}) = LTI, \quad (4)$$

$$[\mathbf{p}_m] = [I] \cdot [S] / [c] = 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ м}^2 / (1 \text{ м/с}) = 1 \text{ А} \cdot \text{с} \cdot \text{м}. \quad (5)$$

Эта единица называется “ампер-секунда-метр”.

Единица магнитного момента в СТ имеет неудобное название. Поэтому, следуя традиции называть единицы физических величин именами известных физиков, предлагается единицу “ампер-секунда-метр” назвать “тамм (1 Тм)” в честь Игоря Евгеньевича Тамма, лауреата Нобелевской премии.

*Тамм* равен магнитному моменту электрического тока силой  $3 \cdot 10^8$  А, проходящего по контуру площадью  $1 \text{ м}^2$ .

Намагниченность  $\mathbf{M}$  в СИ и СТ определяется по уравнению  $\mathbf{M} = \sum \mathbf{p}_m / V$ , из которого следует формула размерности и единица намагниченности в СТ:

$$\dim \mathbf{M} = \dim \mathbf{p}_m / \dim V = L^{-2}TI, \quad (6)$$

$$[\mathbf{M}] = [\mathbf{p}_m] / [V] = 1 \text{ Тм} / 1 \text{ м}^3 = 1 \text{ Тм} / \text{м}^3. \quad (7)$$

Эта единица называется “тамм на кубический метр”.

*Тамм на кубический метр* равен намагниченности, при которой вещество объемом  $1 \text{ м}^3$  имеет магнитный момент 1 Тм.

Сравнительный анализ размерностей электрических и магнитных величин в СТ и СИ позволяет выявить следующее.

С одной стороны, в СИ величины, имеющие разный физический смысл: электрическое смещение  $\mathbf{D}$  и поляризуемость  $\mathbf{P}$ , а также напряженность магнитного поля  $\mathbf{H}$  и намагниченность  $\mathbf{M}$  имеют, соответственно, одинаковые формулы размерности. В СТ величины  $\mathbf{D}$  и  $\mathbf{P}$ , а также  $\mathbf{H}$  и  $\mathbf{M}$  имеют, соответственно, различные формулы размерности, что соответствует их различной сущности.

С другой стороны, в СИ однородные величины — момент электрического диполя  $\mathbf{p}$  и магнитный момент  $\mathbf{p}_m$  имеют различные формулы размерности. В СТ эти величины имеют одинаковую формулу размерности.

Основа равенства размерностей величин  $\mathbf{p}$  и  $\mathbf{p}_m$  следующая. Молекулярные токи в атоме или молекуле (движение  $N$  электронов вокруг положительно заряженного ядра) можно представить как движение суммарного отрицательного заряда  $Q = eN$  вокруг ядра с положительным зарядом  $Q$  по окружности радиусом  $r$  с периодом обращения



$T$ , или как вращение вектора электрического диполя, имеющего заряд  $Q$  и плечо  $r$ . Модуль магнитного момента  $p_m$  можно определить через модуль электрического момента диполя  $p$  следующим образом [12]:

$$p_m = \frac{1}{c}IS = \frac{1}{c} \frac{Q}{T} \pi r^2 = Qr \frac{2\pi r}{2cT} = p \frac{v}{2c}, \quad (8)$$

где  $v$  — линейная скорость вращения конца вектора электрического момента.

Так как  $\dim(v/c) = 1$ , то из уравнения (8) следует, что размерность магнитного диполя  $p_m$  должна быть равна размерности момента электрического диполя  $p$ , что говорит о глубокой связи между этими величинами.

В СТ магнитодвижущая сила  $F_m$  определяется по уравнению

$$F_m = \oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \frac{4\pi k_0}{c} \sum_{i=1}^N I_i, \quad (9)$$

из которого следует формула размерности магнитодвижущей силы в СТ:

$$\dim F_m = L^2 M T^{-3} I^{-1} = \frac{\dim(\text{энергия})}{\dim(\text{время}) \cdot \dim(\text{сила тока})}. \quad (10)$$

Анализ уравнения (10) позволяет установить физический смысл магнитодвижущей силы как энергии магнитного поля, создаваемого в единицу времени единицей силы электрического тока, протекающего внутри замкнутого контура [13]. Поэтому в СТ единицу магнитодвижущей силы  $F_m$  можно назвать “ватт на ампер” (1 Вт/А).

*Ватт на ампер* равен магнитодвижущей силе вдоль замкнутого контура длиной 1 м, расположенного в магнитном поле напряженностью 1 Тл(Т).

Напомним, что в СИ магнитодвижущая сила  $F_m$  определяется как скалярная величина, равная линейному интегралу напряженности магнитного поля вдоль рассматриваемого замкнутого контура и равная полному току, охватываемому этим контуром

$$F_m = \oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \sum_{i=1}^N I_i, \quad (11)$$

где  $N$  — число токов, охватываемых контуром.

Единицей в СИ магнитодвижущей силы  $F_m$ , является “ампер”, а формула размерности величины  $F_m$  состоит только из одного символа электрического тока в первой степени:

$$\dim F_m = \dim H \cdot \dim l = (L^{-1}I) \cdot L = I, \quad (12)$$

$$[F_m] = [H] \cdot [l] = (1 \text{ А/м}) \cdot 1 \text{ м} = 1 \text{ А (ампер)}. \quad (13)$$

Таким образом, можно сделать вывод, что размерность магнитодвижущей силы в СИ не отражает физического смысла этой величины.

В СТ разность скалярных магнитных потенциалов  $U_m$  определяется из уравнения  $U_m = \int H_l dl$ , из которого следует, что размерность и единица разности скалярных магнитных потенциалов совпадает с размерностью и единицей магнитодвижущей силы:

$$\dim U_m = L^2MT^{-3}I^{-1}, \quad (14)$$

$$[U_m] = 1 \text{ Тл(М)} \cdot \text{м} = 1 \text{ Вт/А (ватт на ампер)}. \quad (15)$$

В СТ магнитное сопротивление  $R_m$  определяется по уравнению  $R_m = U_m/\Phi$ , из которого следует формула размерности и единица магнитного сопротивления

$$\dim R_m = \dim U_m / \dim \Phi = (L^2MT^{-3}I^{-1}) / (L^3MT^{-3}I^{-1}) = L^{-1}, \quad (16)$$

$$[R_m] = [U_m]/[\Phi] = 1 \text{ Вт/А} / 1 \text{ Вб(Т)} = 1 \text{ м}^{-1}, \quad (17)$$

которая называется “обратный метр”.

*Обратный метр* равен магнитному сопротивлению цепи, в которой разность магнитных потенциалов 1 Вт/Ф создает магнитный поток 1 Вб(Т).

Таким образом, сопоставительный анализ электромагнитных единиц различных систем показал, что единицы СТ не имеют недостатков электромагнитных единиц систем СГС и СИ. Поэтому использование теоретической системы электромагнитных единиц в преподавании раздела физики “Электромагнетизм” дает возможность формировать у студентов знания, которые соответствуют современным научным взглядам на электромагнитное поле.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 8.417–81. ГСИ. Единицы физических величин. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 40 с.
2. Савельев В. Д. Курс общей физики: Учеб. пособие для вузов. В 5 кн. Кн. 2. Электричество и магнетизм. – М.: ООО “Издательство Астрель”, ООО “Издательство АСТ”, 2001. – 336 с.
3. Суханов А. Д. Фундаментальный курс физики. Учеб. пособие для вузов. В 4-х томах. Том II. Континуальная физика. Кн. 1. – М.: Изд-во “Агар”, 1998. – 338 с.
4. Ипатова И. П., Мастеров В. Ф., Уханов Ю. И. Курс физики в 2 т. Т. II. Электромагнитные явления. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. – 323 с.
5. Бредов М. М., Румянцев В. В., Топтыгин И. Н. Классическая электродинамика: Учеб. пособ. – СПб.: Изд-во “Лань”, 2003. – 400 с.
6. Тамм И. Е. Основы теории электричества: Учеб. пособ. для вузов. – 10-е изд., испр. – М.: Наука, 1989. – 430 с.

7. Л а н д а у Л. Д., Л и в ш и ц Е. М. Теория поля. 7-е изд., испр. – М.: Наука, 1988. – 510 с.
8. С и в у х и н Д. В. Общий курс физики. Т. 3. Электричество, 2-изд. – М.: Наука, 1983. – 688 с.
9. К о б з а р е в Ю. Б., Н е з л и н М. В. Физическая книга о единицах и размерностях // УФН. – 1979. – Т. 129. – С. 351–352.
10. Х а л и л е в П. А. Основные понятия электродинамики сплошных сред: Методические заметки. – Свердловск: УрО АН СССР, 1989. – 226 с.
11. Т р у н о в Г. М. Приведение единиц электрических и магнитных величин системы СИ в соответствие с современным представлением об электромагнитном поле // Физическое образование в вузах. – 2001. – Т. 7. – № 4. – С. 12–21.
12. Т р у н о в Г. М. О формулах размерности электрических и магнитных величин // Законодательная и прикладная метрология. – 2004. – № 6. – С. 36–39.
13. Т р у н о в Г. М. О физическом смысле магнитодвижущей силы // Законодательная и прикладная метрология. – 2005. – № 1. – С. 48–49.

Статья поступила в редакцию 28.09.2005

Геннадий Михайлович Трунов родился в 1943 г. Окончил Пермский государственный университет им. А.М.Горького в 1965 г. Кандю техню наук, ст. науч. сотр., доцент кафедры “Общей физики” Пермского государственного технического университета. Специализируется в области теоретической физики и теоретической метрологии. Автор 46 научных работ.