

## 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 природы 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

## Уравнения электромагнетизма, записанные в системе СГС и СИ

	СИ	СГС
Закон Кулона	$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{\epsilon r^2}$	$F = \frac{Q_1 Q_2}{\epsilon r^2}$
Закон Ампера для параллельных токов	$\frac{F}{l} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2\mu I_1 I_2}{r}$	$\frac{F}{l} = \frac{2\mu I_1 I_2}{c^2 r}$
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 $F_m$	$F_m = \oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \sum_{i=1}^N I_i$	$F_m = \oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \frac{4\pi}{c} \sum_{i=1}^N I_i$
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	$\text{div} \mathbf{D} = \rho$	$\text{div} \mathbf{D} = 4\pi \rho$

системе СГС [2, 3]. А в последние годы появилась тенденция [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 Берклеевском курсе физики использовалась система СГС, а не система МКСА.

Это связано с тем, что электромагнитные единицы СИ полностью перешли из системы единиц МКСА, которая была основана на уравнениях электромагнетизма, соответствующих научным воззрениям на электромагнитное поле середины XIX века, согласно которым вакуум (“светоносный эфир” по терминологии того времени) по своим свойствам принципиально не отличается от обычных сред и, следова-

тельно, 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 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 поля 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  $\mathbf{B}$  и напряженности магнитного поля  $\mathbf{H}$  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  $\mathbf{E}$  и поляризованность  $\mathbf{P}$  (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  $\mathbf{B}$  и намагниченность  $\mathbf{M}$  (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  $\varepsilon_0$  и  $\mu_0$ ), но с привлечением коэффициента  $k_0$ , величина и размерность которого зависит от системы единиц.

3. Разработать новую четырехразмерную 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 отвечают 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 определяют на основе уравнений, приведенных в табл. 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 $F_m$	$F_m = \oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \sum_{i=1}^N I_i$	$F_m = \oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \frac{4\pi k_0}{c} \sum_{i=1}^N I_i$	
Индуктивность $L$	$L = \Psi/I$	$L = c\Psi/I$	
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		$\text{div } \mathbf{B} = 0$	

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, соответственно, 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))).

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:

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

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

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  $1 \text{м}^2$ .

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

Физическая величина	Формула размерности		Соотношения между единицами СИ и СТ
	СИ	СТ	
Электрический заряд $Q$	ТI		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 $p$	ЛTI		1 Кл·м
Поляризация $P$	$L^{-2}TI$		1 Кл/м <sup>2</sup>
Напряженность электрического поля $E$	$LMT^{-3}I^{-1}$		1 В/м
Электрическое смещение $D$	$L^{-2}TI$	$LMT^{-3}I^{-1}$	$1 \text{ Кл/м}^2 = 36\pi \cdot 10^9 \text{ В/м}$
Поток электрического смещения $\Psi$	ТИ	$L^3MT^{-3}I^{-1}$	$1 \text{ Кл} = 36\pi \cdot 10^9 \text{ В} \cdot \text{м}$
Магнитная индукция $B$	$MT^{-2}I^{-1}$	$LMT^{-3}I^{-1}$	$1 \text{ Тл} = 3 \cdot 10^8 \text{ Тл(Т)}$
Напряженность магнитного поля $H$	$L^{-1}I$	$LMT^{-3}I^{-1}$	$1 \text{ А/м} = 120\pi \text{ Тл(Т)}$
Магнитный момент $p_m$	$L^2I$	ЛTI	$1 \text{ А} \cdot \text{м}^2 = \frac{1}{3 \cdot 10^8} \text{ Тм}$
Намагниченность $M$	$L^{-1}I$	$L^{-2}TI$	$1 \text{ А/м} = \frac{1}{3 \cdot 10^8} \text{ Тм/м}^3$
Индуктивность $L$	$L^2MT^{-2}I^{-2}$	$L^4MT^{-4}I^{-2}$	$1 \text{ Гн} = 9 \cdot 10^{16} \text{ Гн(Т)}$
Магнитный поток $\Phi$ Потокосцепление $\Psi$	$L^2MT^{-2}I^{-1}$	$L^3MT^{-3}I^{-1}$	$1 \text{ Вб} = 3 \cdot 10^8 \text{ Вб(Т)}$
Магнитодвижущая сила $F_m$	I	$L^2MT^{-3}I^{-1}$	$1 \text{ А} = 120\pi \text{ Вт/А}$
Магнитное сопротивление $R_m$	$L^{-2}M^{-1}T^2I^2$	$L^{-1}$	$1 \text{ Гн}^{-1} = 1 \text{ м}^{-1}$

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:

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

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

Эта единица называется “тамм на кубический метр”.

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

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]:

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

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

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

В СТ магнитодвижущая сила  $F_m$  определяются 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:

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

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:

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

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

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  $U_m = \int H_i dl$ , из которого следует, что размерность и единица разности скалярных магнитных потенциалов совпадает с размерностью и единицей магнитодвижущей силы:

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

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

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

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

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

которая называется “обратный метр”.

*Обратный метр* равен магнитному сопротивлению цепи, в которой разность магнитных потенциалов 1 Вт/А 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. С а в е л ь е в В. Д. Курс общей физики: Учеб. пособие для вузов. В 5 кн. Кн. 2. Электричество и магнетизм. – М.: ООО “Изд-во Астрель”, ООО “Изд-во АСТ”, 2001. – 336 с.
3. С у х а н о в 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. И п а т о в а И. П., М а с т е р о в В. Ф., У х а н о в Ю. И. Курс физики в 2 т. Т. II. Электромагнитные явления. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. – 323 с.
5. Б р е д о в М. М., Р у м я н ц е в В. В., Т о п т ы г и н И. Н. Классическая электродинамика: Учеб. пособ. – СПб.: Изд-во “Лань”, 2003. – 400 с.
6. Т а м м И. Е. Основы теории электричества: Учеб. пособие. 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.

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. Канд. техн. наук, ст. науч. сотр., доцент кафедры “Общая физика” Пермского гос. техн. ун-та. Специализируется в области теоретической физики и теоретической метрологии. Автор 46 научных работ.

G.M. Trunov (b. 1943) graduated from the Perm State University n. a. A.M. Gorky in 1965. Ph. D. (Eng.), senior researcher of "General Physics" department of the Perm State Technical University. Specializes in the field of theoretical physics and theoretical metrology. Author of 46 publications.

---

УДК 550.837

Е. П. Кочура, А. В. Скрипкин,  
С. В. Соболев

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ЭЛЕКТРОПРОВОДНОМ ПЛОСКОМ СЛОЕ, ВЫЗВАННОГО ПАДЕНИЕМ НА ПОВЕРХНОСТЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИМПУЛЬСА СТУПЕНЧАТОЙ ФОРМЫ**

*Рассмотрен процесс взаимодействия электромагнитного импульса ступенчатой формы с плоским однородным и слабонеоднородным проводящим слоем. В качестве примера получено распределение напряженности электрического поля в слое в случае экспоненциально убывающей добавки к постоянной проводимости.*

Прогресс в создании генераторов электромагнитных импульсов с обостренными фронтами стимулировал в последние годы интерес к задачам исследования взаимодействия таких импульсов с различными средами и объектами [1, 2].

Одной из целей решения подобных задач служит выявление физических процессов, вызывающих то или иное распределение электропроводности в изучаемом образце. Это позволит контролировать протекание этих процессов с помощью мониторинга профиля проводимости образца [3, 4].

Неоднородной электропроводностью могут обладать искусственно созданные проводящие среды: композиционные материалы [5, 6], металлы с нанесенными защитными покрытиями [7, 8], различные полупроводники [3, 9], а также конденсированные природные среды. Для