

1322



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

Ю.В. Катышев

1322

УРАВНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМА
В РАЦИОНАЛИЗОВАННОЙ ФОРМЕ
ДЛЯ МЕЖДУНАРОДНОЙ СИСТЕМЫ ЕДИНИЦ СИ

/О б з о р/

Дубна 1963

Ю.В. Катышев

1322

2017/2 48.

УРАВНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМА
В РАЦИОНАЛИЗОВАННОЙ ФОРМЕ
ДЛЯ МЕЖДУНАРОДНОЙ СИСТЕМЫ ЕДИНИЦ СИ

/О б з о р/

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Дубна 1963

§ 1. Международная система единиц (СИ) (ГОСТ 9867-61)

В октябре 1960 года XI Генеральная конференция по мерам и весам на основе доклада комиссии Международного комитета мер и весов приняла Международную систему единиц^{/30/} (сокращенное наименование в русском написании СИ-система интернациональная). Эта единая система утверждена в СССР как Государственный стандарт^{/1/}. Государственный стандарт^{/1/} устанавливает, что с 1 января 1963 года

система СИ должна применяться как предпочтительная во всех областях науки, техники^{/7/} и народного хозяйства, а также при преподавании^{/28,6/}. Стандарт разработан в соответствии с решениями X и XI Генеральных конференций по мерам и весам.

Основными единицами СИ, на которых она построена, являются шесть единиц: метр, килограмм (единица массы, но не силы), секунда, ампер, градус Кельвина и свеча. Дополнительными единицами СИ служат угловые единицы радиан и стерадман.

Определения основных и дополнительных единиц Международной системы приводятся в ГОСТе^{/1/}, а также в книгах^{/2,3/}. Новыми являются определения метра, секунды, ампера, градуса Кельвина, свечи^{/23/}. Из старых осталось только определение единицы массы - килограмма.

Производные единицы Международной системы единиц образуются на основании законов, устанавливающих связь между физическими величинами, или на основании определений соответствующих величин.

При установлении размера производных единиц СИ соблюдается условие когерентности (связности) системы, т.е. коэффициент пропорциональности в уравнении, определяющем единицу измерений, принимается равным единице.

Образование кратных и дольных единиц СИ производится в соответствии с ГОСТом^{4/} и международными рекомендациями^{5, 3/}.

Международная система единиц, как нетрудно видеть, является обобщением известной системы МКС. Система подобного типа была предложена в 1901 году итальянским инженером Д. Джорджи, впервые обратившим внимание на возможность построения когерентной системы как механических, так и электрических единиц на основе системы МКС с добавлением четвертой основной единицы из практической системы электрических единиц. Еще в 1913 г. на V Генеральной конференции по мерам и весам известный французский метролог Гильом отмечал значительные преимущества системы Джорджи.

В области электромагнитных измерений применение системы СИ сводится к использованию практической абсолютной системы МКСА (см.^{27/}), т.е. системы метр-килограмм-секунда-ампер. Символ „р“ означает, что уравнения электромагнетизма записаны в рационализованной форме (см. §§ 5,6). Система МКСА была установлена ГОСТом^{16/}

Принятие системы СИ явилось важным этапом в развитии международной унификации единиц^{25/}.

Большинство современных книг, справочников и статей по электродинамике используют эту систему (см. например^{8,9,10,11/}). На прогрессивность этой системы указывалось неоднократно^{2,3,6,12,13,14/}.

Международная система единиц введена в ряде государств законодательными актами и стандартами (СССР, Франция, ГДР, Чехословакия,

ВНГ и др.).

В работе /3/ отмечается, что „ с введением изучения новой системы в школах, вузах и техникумах, преподавания технических дисциплин на ее основе, с пересмотром учебников и учебных пособий наука и промышленность получают кадры молодых специалистов, подготовленных к применению этой системы. Работающие в настоящее время специалисты должны будут изучить новую систему и привыкнуть к ее применению “ .

Комитет стандартов СССР подготавливает новые ГОСТы на измерительную аппаратуру с градуировкой в единицах СИ /24/. Постепенно старые приборы будут заменяться аппаратурой, градуированной в единицах СИ. Вся научная, справочная и учебная литература будет издаваться с преимущественным использованием единиц СИ. Объединение Государственных научно-технических издательств (ОНТИЗ) обязало применять СИ во всех подготавливаемых изданиях /26/.

В конечном итоге, по мере внедрения единиц СИ, все остальные системы будут отменены . Некоторое число внесистемных единиц, по-видимому, сохранится (например, электронвольт и др.).

§ 2.0 системе СГС (сантиметр-грамм-секунда)

В противоположность электрическим, магнитные измерения до последнего времени выполняли в единицах системы СГС. Эта система единиц широко использовалась при описании как магнитных, так и электрических явлений, особенно в теоретической физике.

В электромагнетизме использовалось несколько систем СГС: электромагнитная, электростатическая, симметричная (была принята

ГОСТОМ^{/16/}), СГСЭ₀ и СГС_{μ₀}.

Использование системы СГС для измерения электрических и магнитных величин критиковалось уже давно^{/15,10/}. В системе СГС электрический заряд имеет несвойственную ему "механическую размерность", а именно: $\text{см}^{3/2} \text{ г}^{1/2} \text{ сек}^{-1}$, волновое же сопротивление среды $\sqrt{\mu/\epsilon}$ оказывается вовсе безразмерным. Таким образом, можно сказать, что размерность электромагнитных величин в системе СГС совсем не соответствует их физической природе. Профессор А. Зоммерфельд, использовавший еще с 1933 года в своих лекциях и в своей книге^{/10/} систему Джорджи, писал: "Мы отказываемся тем самым от "прокрустова ложа" единиц СГС, при использовании которых электромагнитным величинам навязываются известные противоестественные размерности".

Профессор Р. В. Поль еще в январе 1931 года в предисловии к третьему немецкому изданию своей книги^{/15/} писал: "Многие коллегифизики ставили мне в вину отказ от абсолютной системы мер. Но мне кажется, что это основано только на недоразумении. Размерность всякой физической величины является совершенно произвольной, в этом существует полное единодушие. Абсолютная система мер хочет установить все размерности с помощью трех основных единиц, беря в качестве таковых см, г-массу и секунду.

Всякая производная физическая величина должна своей размерностью указывать на способ своего измерения. "Размерность" должна давать краткое правило измерения для разгрузки памяти. Если пользоваться только тремя основными единицами, то за пределами механики это невозможно. Кто может извлечь правило измерения электрической поляризуемости из указания ее величины в см³ или литрах?

Положение не становится лучше, когда следующий автор - при обычном применении электростатических и электромагнитных величин - указывает поляризуемость в единицах см·сек². Нужно подумать дальше о беспомощном положении учащегося, когда он при магнитных измерениях должен для плотности магнитного потока В и напряженности магнитного поля Н применять одну и ту же единицу

$$1 \text{ см}^{-\frac{1}{2}} \cdot \text{г}^{\frac{1}{2}} \text{ сек}^{-1}$$

Далее Р.В.Поль отмечал, что при использовании С единиц величины \vec{B} и \vec{H} , а также \vec{D} и \vec{E} имеют и в вакууме различные числовые значения, что облегчает понимание сущности явлений.

§ 3. О рационализованной форме уравнений электромагнетизма

Электромагнитные единицы СГС образовывались на основе нерационализованной формы уравнений электромагнитного поля: в некоторые общие соотношения, используемые для установления размеров единиц, входит числовой множитель 4π .

При введении системы СИ¹⁾ множитель 4π исключается из всех соотношений, по которым устанавливаются размеры единиц. Этот множитель переводится в соотношения для частных случаев, обладающих цилиндрической или сферической симметрией.

Величинами, единицы которых подвержены рационализации (рационализация единиц), являются:

- 1) электрическое смещение,
- 2) поток электрического смещения,
- 3) диэлектрическая проницаемость,
- 4) магнитная проницаемость,

- 5) напряженность магнитного поля,
- 6) магнитодвижущая сила,
- 7) магнитная восприимчивость,
- 8) магнитное сопротивление,
- 9) магнитная проводимость.

В СИ принята^{13/} рационализация единиц, а не рационализация величин.

В СИ магнитная постоянная (магнитная проницаемость вакуума) μ_0 не равна единице и является размерной величиной. Она равняется $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ генри/метр $\approx 1,256637061 \cdot 10^{-6}$ гн/м. Магнитное поле и в пустоте характеризуется двумя различными по размерности величинами \vec{B}_0 и \vec{H}_0 , связанными соотношением $\vec{B}_0 = \mu_0 \vec{H}_0$.

Из-за рационализации и величина ϵ_0 становится размерной (см.ур. 2 §6).

Рационализация гауссовой системы единиц была предложена О.Хевисайдом еще в 1892 году^{130,31/}.

Уравнения в рационализованной форме могут быть получены из уравнений в нерационализованной форме так:

1) уравнения, содержащие \vec{E}, \vec{D} и \vec{H} , — путем приписывания к E, D и H множителя 4π ;

2) уравнения, содержащие μ , — путем приписывания к μ множителя $\frac{1}{4\pi}$; Все остальные уравнения имеют одинаковый вид в рационализованной и нерационализованной системах.

В результате рационализации множитель 4π исчезает из тех формул, которые наиболее часто встречаются на практике. Вычисление по этим формулам упрощается.

§ 4. Электрические и магнитные единицы СИ^{/3}, I7, 3I/

1 Единица силы тока - ампер

Ампер - сила неизменяющегося тока, который, проходя по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малом кругового сечения, расположенным на расстоянии 1 метр один от другого в вакууме, вызвал бы между этими проводниками силу, равную $2 \cdot 10^{-7}$ единиц силы Международной системы (т.е. 0,2 микроньютона) на каждый метр длины. Эта единица входит в число основных единиц системы СИ. Она, вместе с м, кг и сек, дает возможность образовать производные единицы для электрических и магнитных величин.

1 ед. силы тока СГС = $\frac{1}{9}$ · 10^{-9} а; 1 СГСМ = 10 ампер

2) Единица плотности электрического тока - ампер на квадратный метр

Размер этой единицы есть (Ia): (I м²).

Один абс. ампер/см² = 10^5 а/м²

3) Единица линейной плотности электрического тока - ампер на метр

4) Единица работы и энергии - джоуль

Как и любой другой вид энергии в системе СИ, работа и энергия электромагнитного поля выражается в джоулях.

5) Единица активной мощности электрической цепи - ватт

6) Единица количества электричества (заряда) - кулон

Размер кулона равен произведению ампер.сек.

7) Единица потока электрического смещения (потока электрической индукции) - кулон

8) Единица электрического смещения (индукции) - кулон на квадратный метр

Размер единицы к/м^2 .

9) Единица объемной плотности электрического заряда - кулон на кубический метр

Размер единицы к/м^3

10) Единица поверхностной плотности электрического заряда - кулон на квадратный метр

Размер единицы к/м^2

11) Единица разности электрических потенциалов электрического напряжения, Э.Д.С. - вольт

Т.к. $U = \frac{P}{I}$, то 1 вольт = $\frac{1 \text{ ватт}}{1 \text{ ампер}}$

12) Единица напряженности электрического поля - вольт на метр

13) Единица электрической емкости - фарада

14) Единица абсолютной диэлектрической проницаемости - фарада на метр

15) Единица момента электрического диполя - кулон - метр

Размер этой единицы равен (1 к).(1 м)

16) Единица электрического сопротивления - ом

17) Единица удельного электрического сопротивления - ом-метр

Размер этой единицы равен произведению ом.метр.

18) Единица электрической проводимости - сименс

Размер этой единицы обратен размеру ома.

19) Единица удельной электрической проводимости - сименс на метр

20) Единица магнитного потока - вебер

Размер единицы есть (1 в). (1 сок) = (1 к). (1 ом)

Раньше использовалась единица магнитного потока - максвелл, который равен 10 нановеберам. Полные таблицы перевода от старых единиц к единицам СИ имеются в книге^{/3/}.

21) Единица магнитной индукции - тесла

Размер этой единицы есть вебер, деленный на квадратный метр. Единица системы СГСМ гаусс равняется 10^{-4} тесла, т.е. 10 000 гаусс - это 1 тесла.

22) Единица магнитодвижущей силы (разности магнитных потенциалов) - ампер

Один гильберт равняется $\frac{10}{4\pi}$ ампер. По новому ГОСТу исключается единица ампер-виток^{/13/}.

23) Единица напряженности магнитного поля-ампер на метр

Один эрстед равняется $\frac{1000}{4\pi}$ ампер на метр, т.е. 79,5775 ампер на метр. По новому ГОСТу нельзя применять единицу ампер-виток на метр^{/13/}. В геофизике использовалась единица гамма, равная 795,775 мка/м.

- 24) Единица векторного потенциала - вебер на метр
- 25) Единица индуктивности, взаимной индуктивности-генри
 Единица индуктивности системы СГС I см = 10^{-9} генри.
- 26) Единица абсолютной магнитной проницаемости -генри на метр
- 27) Единица электромагнитного момента - ампер-квадратный метр
 Размер этой единицы (I а). (Iм²). I СГСМ= 10^{-3} а.м².
- 28) Единица намагниченности (интенсивности намагничивания, плотности магнитного момента) - ампер на метр
 I СГСМ = 10^3 а/м
- 29) Единица магнитного сопротивления -ампер на вебер
- 30) Единица магнитной проводимости -вебер на ампер
- 31) Единица объемной плотности электромагнитной энергии -джоуль на м³
- 32) Единица реактивной мощности электрической цепи -вар
 Размер этой единицы (I а). (I в). ($\sin \varphi$)
- 33) Единица полной мощности электрической цепи - вольт-ампер
 Размер этой единицы (I а). (I в).
- 34) Единица угловой частоты электрического тока-радиан в секунду

36) Единица магнитной поляризации J_n - ампер-генр.
на квадратный метр

Размер единицы а.гн/м²

$$1 \text{ СГСМ} = 4\pi \cdot 10^{-4} \text{ а.гн/м}^2$$

37) Единица абсолютной магнитной восприимчивости χ_a
-Генри на метр

Величина $\chi_a = J_n / H$, поэтому размер единицы

$$\chi_a \text{ равен гн/м. } 1 \text{ СГСМ} = (4\pi^2) \cdot 10^{-7} \text{ гн/м.}$$

38) Единица магнитного дипольного момента-вебер-метр

Эта единица определяется из соотношения

$$j = 2\pi B_0 r^3.$$

$$\text{Размерность } [j] = [6\sigma/\text{м}^2] \cdot [\text{м}^3] = [\text{кг} \cdot \text{сек}^{-2} \cdot \text{а}^{-1} \cdot \text{м}^3] = \\ = [6\sigma \cdot \text{м}].$$

За единицу магнитного дипольного момента j принимается магнитный момент такого элементарного тока или диполя, который создает в окружающем пространстве на расстоянии $r = 1$ м магнитное поле $\frac{1}{2\pi}$ тесла.

В системе СИ магнитная восприимчивость k_M (т.е. коэффициент пропорциональности между намагниченностью M и напряженностью магнитного поля H) является величиной безразмерной. Коэффициент перехода от системы СГСМ к СИ для магнитной восприимчивости равен 4π .

§ 5. Таблица обозначений электромагнитных величин
и их единиц измерения /5,3,16,2,27/

В е л и ч и н а	Обозначение величины	Сокращенное обозначение единицы измерения
Электрический заряд, количество электричества	Q	к
Объемная плотность электрического заряда	ρ	к/м ³
Поверхностная плотность заряда	σ	к/м ²
Линейная плотность электрическо- го заряда	τ	к/м
Электрический потенциал	V	в
Напряженность электрического поля	E	в/м
Электрическое смещение	D	к/м ²
Нормальная составляющая смещения	D_n	к/м ²
Емкость	C	ф
Абсолютная диэлектрическая прони- цаемость	ϵ	ф/м
Диэлектрическая проницаемость ва- куума, электрическая постоянная	ϵ_0	ф/м
Диэлектрическая поляризация, поляри- зованность	P	к/м ²
Момент электрического диполя	P	к·м
Электрический ток, сила тока	I	а
Плотность тока	J	а/м ²
Напряженность магнитного поля	H	а/м
Магнитная индукция	B	тл
Магнитный поток	Φ	вб
Абсолютная магнитная проницаемость	μ	гн/м

1	2	3
Магнитная проницаемость вакуума, магнитная постоянная	μ_0	ГН/М
Индуктивность, самосиндукция	L	ГН
Сопротивление активное	R	ОМ
Электрическое напряжение	U	В
Вектор Умова-Пойнтинга	\vec{P}	Вт/М ²
Время	t	сек
Сила	F	Н
Плотность энергии поля	w	Дж/М ³
Скорость	v	М/сек
Энергия, работа	W	Дж
Векторный потенциал	\vec{A}	Вб/М
Длина	l	М
Площадь поверхности	S	М ²
Элемент объема	$\Delta\tau$ или dt	М ³
Элемент длины	Δl или dl	М
Полное число витков	N	Безразмерно
Число витков на одном метре	n_0	М ⁻¹
Намагниченность, интенсивность намагничивания	M	А/М
Магнитная поляризация	J_p	А·ГН/М ²
Расстояние между пластинами плоского конденсатора	d	М
Расстояние между зарядами диполя	s	М
Радиус-вектор, радиус	r	М
Абсолютная магнитная восприимчивость	ϵ_a	ГН/М
Поток электрического смещения	Ψ_D	К

I	2	3
Сопротивление реактивное	X	ом
Сопротивление полное	Z	ом
Электрическая (диэлектрическая) восприимчивость	ϵ_3	ф/м
Удельное электрическое сопротивление	ρ	ом·м
Активная электрическая проводимость	g	сим
Реактивная электрическая проводимость	b	сим
Полная электрическая проводимость	y	сим
Удельная электрическая проводимость	γ	сим/м
Магнитодвижущая сила, м.д.с.	\textcircled{M}	а
Магнитное сопротивление	R_m	а/вб
Магнитная проводимость	Λ	вб/а
Активная мощность электрической цепи	P	вт
Реактивная мощность электрической цепи	P_q	вар
Полная мощность электрической цепи	P_s	в·а
Угловая частота	ω	рад/сек
Частота электрического тока	f	гц
Взаимная индуктивность (i, k -текущие числа)	L_{ik}	гн
Тензор электромагнитного поля (составляющие)	F^{ij}	{ безразмер. (нули) или в/м
Относительная электрическая восприимчивость	$\chi_e = \frac{\epsilon_3}{\epsilon_0}$	
Электромагнитный момент ^{/29, 5/}	m	а·м ²

1	2	3
Магнитный дипольный момент /29/	j	в.м
Число фаз многофазной системы	m	безразмерн.
Механический момент	M	н.м
Магнитная восприимчивость	k_m	безразмерн.
Э.д.с.	\mathcal{E}	в
Э.д.с. индукции	\mathcal{E}_i	в
Эффективная э.д.с.	$\mathcal{E}_{\text{эф}}$	в
Потокосцепление	Ψ	вб
Коэффициент затухания (во времени)	δ	-
Коэффициент (постоянная)затухания	β	-
Коэффициент магнитного рассеяния	σ	-
Поляризуемость	χ	м ³

Далее рассмотрим вид основных уравнений электромагнетизма в системе СИ /2,30/.

§ 5 Уравнения Максвелла в системе СИ

Уравнения Максвелла в рационализованной форме для системы СИ принимают вид:

$$\begin{aligned} \text{rot } \vec{E} &= -\partial \vec{B} / \partial t, & \text{или} & \quad \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\partial \vec{B} / \partial t, \\ \text{div } \vec{D} &= \vec{j}, & \text{или} & \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \vec{j}, \\ \text{div } \vec{B} &= 0, & \text{или} & \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0, \\ \text{rot } \vec{H} &= \vec{J} + \partial \vec{D} / \partial t, & \text{или} & \quad \vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \partial \vec{D} / \partial t. \end{aligned}$$

Как видно, из этих уравнений полностью исчезли все коэффициенты, присутствовавшие в уравнениях для системы СГС, т.е. 4π и c .
Уравнения Максвелла в системе СИ можно записать ^{/30/} еще так:

$$\frac{\partial N_i}{\partial t} + I = \oint H e d l ,$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = - \oint \mathcal{E}_i dt .$$

Здесь N_i - поток индукции.

§ 6. Уравнения электростатики

1) Сила, действующая на заряд Q в электрическом поле E :

$$\vec{F} = Q \vec{E} .$$

Размерности величин, входящих в это уравнение:

ньютон = кулон·вольт/м

2) Соотношения между E и D :

$$\mathcal{E} \vec{E} = \vec{D} \quad \vec{D} = \mathcal{E}_0 \vec{E} + \vec{P} .$$

Здесь \vec{P} - вектор поляризации в кулон/м².

Диэлектрическая проницаемость вакуума \mathcal{E}_0 равняется

$$\mathcal{E}_0 = \frac{1}{4\pi c^2} \cdot 10^7 \quad \text{фарад/метр} = 8,8541 \cdot 10^{-12} \text{ фарад/метр} .$$

Величина \mathcal{E}_0 называется электрической постоянной. Произведение диэлектрической и магнитной проницаемостей вакуума равно

$$\mathcal{E}_0 \mu_0 = \frac{1}{c^2} ,$$

где $c = 2,997925 \cdot 10^8$ м/сек - значение скорости света в пустоте.
Волновое сопротивление вакуума $\sqrt{\mu_0/\mathcal{E}_0}$ равно 120,0 π ом.

3) Смещение на расстоянии r метров от точечного заряда Q :

$$D = \frac{Q}{4\pi r^2} .$$

Множитель 4π свидетельствует о сферической симметрии задачи.

4) Смещение на поверхности с поверхностной плотностью заряда σ :

$$D = \sigma .$$

В этом уравнении нет множителя 4π , присутствовавшего в системе СГС.

5) Сила, возникающая между зарядами Q_1 и Q_2 , расположенными на расстоянии r друг от друга в среде с диэлектрической проницаемостью \mathcal{E} (закон Кулона):

$$F = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi \mathcal{E} r^2} .$$

Для зарядов Q_1 и Q_2 , находящихся в вакууме,

$$F = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi \mathcal{E}_0 r^2} ,$$

где $4\pi \mathcal{E}_0 = 111,5 \cdot 10^{-12}$ фард/метр.

6) Емкость двух параллельных пластин площадью S квадратных метров и расстоянием между ними d метров:

$$C = \frac{\mathcal{E} S}{d} \quad \text{фарад} .$$

Здесь опять нет 4π , присутствовавших в СГС - системе.

7) Емкость изолированной сферы радиусом r :

$$C = 4\pi\epsilon r$$

8) Соотношение между E и V в электростатическом поле:

$$E = -\text{grad } V$$

9) Уравнение Пуассона для электростатического поля в вакууме:

$$\Delta V = -\rho/\epsilon_0$$

Нет 4π , имевшихся в СГС - системе.

10) Потенциал на расстоянии r метров от точечного заряда Q , расположенного в среде ϵ :

$$V = \frac{Q}{4\pi\epsilon r}$$

11) Напряженность поля точечного заряда Q кулон:

$$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon r^2} \text{ вольт/метр.}$$

12) Потенциал поля, созданного электрическим диполем p в среде ϵ :

$$V = \frac{pr}{4\pi\epsilon r^3}$$

13) Момент электрического диполя:

$$\vec{p} = Q\vec{s} \text{ кулон-метров,}$$

где s - расстояние между зарядами диполя.

14) Потенциальная энергия электрического диполя в электрическом поле E вольт/м :

$$W = -pE \text{ джоуль.}$$

15) Момент электрического диполя объемного элемента $\Delta\tau$ с поляризацией P :

$$p = P\Delta\tau \text{ кулон-метров.}$$

16) Плотность энергии электрического поля:

$$w = \frac{\epsilon E^2}{2}, \text{ или } w = \frac{\partial E}{2} \frac{\text{ДЖОУЛЬ}}{\text{М}^3}$$

В СГС было $\partial E / (8\pi)$.

17) Теорема Остроградского-Гаусса для потока индукции:

$$\Psi_D = \int_S D_n ds = \sum_i Q_i$$

18) Напряженность поля, образованного бесконечно длинной заряженной нитью:

$$E = \frac{\tau}{2\pi\epsilon r} \text{ вольт/метр.}$$

19) Напряженность поля, образованного бесконечной заряженной плоскостью:

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon} \text{ вольт/метр.}$$

20) Поле плоского конденсатора:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \text{ вольт/м.}$$

21) Емкость сферического конденсатора:

$$C = \frac{4\pi\epsilon r_1 r_2}{r_2 - r_1} \text{ фарад.}$$

22) Энергия поля плоского конденсатора:

$$W = \frac{\epsilon S U^2}{2d} \text{ джоуль.}$$

23) Сила притяжения пластин плоского конденсатора:

$$F = \frac{\epsilon S U^2}{2d^2} \text{ ньютон.}$$

24) Электрическое поле, созданное общим распределением зарядов в вакууме:

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\rho \vec{r}}{r^3} d\tau.$$

25) Напряженность поля заряженной сферической поверхности (для $r \geq$ радиуса сферы): $E = \frac{Q}{4\pi\epsilon r^2}$ вольт/метр.

26) Работа перемещения заряда Q кулон из точки с потенциалом V_1 вольт в точку с потенциалом V_2 вольт:

$$W = Q(V_2 - V_1) \text{ джоуль.}$$

27) Емкость цилиндрического конденсатора /30/:

$$C = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \text{ фарад.}$$

28) Связь между диэлектрической проницаемостью ϵ и диэлектрической восприимчивостью k_3 :

$$\epsilon = \epsilon_0 + k_3 \text{ фарад/метр.}$$

29) Механический момент, действующий на электрический диполь в поле E вольт/метр:

$$M = p E \sin \alpha.$$

30) Связь между векторами \vec{P} и \vec{E} в случае изотропной среды:

$$\vec{P} = k_3 \vec{E} \text{ кулон/м}^2.$$

31) Связь между относительной диэлектрической проницаемостью ϵ/ϵ_0 и относительной электрической восприимчивостью χ_e :

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_0} = 1 + \chi_e.$$

32) Соотношение, определяющее поляризуемость α :

$$\vec{p} = \alpha \epsilon_0 \vec{E}_{\text{эфф}}.$$

Здесь \vec{p} - дополнительный момент, индуцированный в изолированной молекуле. Размерность поляризуемости - м³.

§ 7. Уравнения электромагнетизма (см. также /27/)

1) Сила Лоренца:

$$\vec{F} = Q \vec{v} \times \vec{B} \text{ ньютон .}$$

Здесь нет множителя c , бывшего в СГС.

Полная сила, действующая на заряд в электромагнитном поле:

$$\vec{F} = Q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}).$$

2) Сила, действующая на элемент тока $I \Delta \ell$ в магнитном поле B тесла (сила Ампера):

$$\vec{F} = I \Delta \vec{\ell} \times \vec{B} \text{ ньютон .}$$

3) Соотношение между магнитным полем B тесла и величиной H :

$$\vec{B} = \mu \vec{H}.$$

4) Магнитное поле, образованное движущимся зарядом Q кулон:

$$\vec{H} = \frac{Q \vec{v} \times \vec{r}}{4\pi r^3} \text{ ампер/метр .}$$

5) Магнитное поле, образованное элементом тока $I \Delta \ell$ (закон Био-Савара-Лапласа):

$$\vec{H} = \frac{I \Delta \vec{\ell} \times \vec{r}}{4\pi r^3} \frac{\text{ампер}}{\text{метр}}.$$

6) Напряженность магнитного поля в центре кругового тока:

$$H = \frac{I}{2r} \text{ ампер/метр .}$$

Магнитное поле в центре соленоида:

$$H = I n_0 \text{ ампер/метр,}$$

где n_0 - число витков на метре.

7) Магнитное поле на расстоянии r метров от линейного проводника с током I ампер:

$$H = \frac{I}{2\pi r} \frac{\text{ампер}}{\text{метр}} .$$

8) Сила, возникающая между двумя параллельными линейными проводниками с током, расположенными на расстоянии d один от другого в среде с магнитной проницаемостью μ :

$$\frac{F}{l} = \frac{\mu I_1 I_2}{2\pi d} \frac{\text{ньютон}}{\text{метр}} .$$

9) Соотношение между магнитным полем B и векторным потенциалом A вебер/метр:

$$\vec{B} = \text{rot } \vec{A}, \text{ или } \vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A} \text{ тесла .}$$

10) Волновое уравнение для векторного потенциала в вакууме:

$$\Delta A - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = -\mu_0 I .$$

II) Исходные условия для определения A :

$$\operatorname{div} \vec{A} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial V}{\partial t} = 0, \text{ или } \vec{\nabla} \cdot \vec{A} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial V}{\partial t} = 0.$$

12) Общее соотношение между E , V и A :

$$\vec{E} = -\operatorname{grad} V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t},$$

$$\text{или } \vec{E} = -\vec{\nabla} V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad \text{вольт/метр.}$$

13) Электромагнитный момент тока I ампер, окружающего плоскую поверхность S м²:

$$m = I S \quad \text{а} \cdot \text{м}^2.$$

14) Потенциальная энергия магнитного диполя в магнитном поле B тесла:

$$W = -m B \quad \text{джоуль.}$$

15) Электромагнитный момент элемента объема $\Delta \tau$ с намагниченностью M ампер/метр:

$$m = M \Delta \tau \quad \text{а} \cdot \text{м}^2.$$

16) Плотность энергии магнитного поля:

$$w = \frac{BH}{2} = \frac{\mu H^2}{2} \quad \text{джоуль / м}^3.$$

17) Вектор Умова-Пойнтинга /19/:

$$\vec{\Pi} = \vec{E} \times \vec{H} \quad \text{ватт/м}^2.$$

18) Индуктивность соленоида длиной l метров:

$$L = \mu n^2 l S \quad \text{генри};$$

$$\text{или } L = \mu N^2 S / l \quad \text{генри.}$$

19) Магнитный поток соленоида:

$$\Phi = \mu I n_0 S \quad \text{вебер.}$$

20) Скорость распространения электромагнитной волны в среде с проницаемостями μ и ϵ :

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu \epsilon}} \quad \frac{\text{м}}{\text{сек}}.$$

21) Уравнение непрерывности (неразрывности) для тока:

$$\operatorname{div} \vec{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0, \text{ или } \vec{\nabla} \cdot \vec{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0.$$

23) Тензор электромагнитного поля /8/:

$$F^{ij} = \begin{pmatrix} 0 & -cB_z & -B_y & +E_x \\ cB_z & 0 & -cB_x & +E_y \\ -cB_y & cB_x & 0 & +E_z \\ -E_x & -E_y & -E_z & 0 \end{pmatrix}.$$

24) Производные составляющих тензора электромагнитного поля в вакууме /8/:

$$\frac{\partial F^{ij}}{\partial x^i} = \frac{J^j}{\epsilon_0}$$

25) Уравнения поля в среде (ковариантное описание) /8/:

$$\frac{\partial H^{ij}}{\partial x^i} = J^j,$$

где $H^{ij} = \epsilon_0 F^{ij} - M^{ij}$.

26) Плотность энергии электромагнитного поля:

$$w = \frac{\vec{D}\vec{E} + \vec{B}\vec{H}}{2} = \frac{\vec{D}^2 + \vec{B}^2}{2\mu} \frac{\partial x}{\partial t^3}$$

27) Магнитная жесткость частицы B_r с кинетической энергией T эв и зарядом e /8/:

$$B_r = \frac{\sqrt{T^2 + 2TE_0}}{c} \approx \frac{\sqrt{T^2 + 2TE_0}}{3 \cdot 10^8} \text{ тесла-метров,}$$

где E_0 - энергия покоя частицы в эв, а c - значение скорости света в вакууме в м/сек.

28) Натяжение τ проволоки с током I а, расположенной в магнитном поле вдоль траектории частицы с кинетической энергией T эв и зарядом e :

$$\tau = \frac{I}{c} \sqrt{T^2 + 2TE_0} \text{ ньютон,}$$

где $c \approx 3 \cdot 10^8$ м/сек.

29) Закон Ленца-Джоуля:

$$W = I^2 R t \text{ джоуль.}$$

Здесь W - тепло Ленца-Джоуля в джоулях.

30) Связь между магнитной проницаемостью и магнитной восприимчивостью k_m :

$$\frac{\mu}{\mu_0} = 1 + k_m$$

31) Связь между векторами \vec{B} , \vec{H} и \vec{M} (вектор намагниченности магнетика):

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{M}$$

32) Связь между намагниченностью и величиной H для изотропной среды:

$$\vec{M} = k_m \vec{H} \text{ ампер/метр,}$$

где k_m - магнитная восприимчивость (величина безразмерная в системе СИ).

33) Потокосцепление для соленоида с полным числом витков N :

$$\Psi = \Phi N \text{ вебер,}$$

где Φ вебер - магнитный поток через поперечное сечение соленоида.

34) Закон Фарадея-Максвелла (основной закон электромагнитной индукции):

$$\mathcal{E}_i = - \frac{\Delta \Psi}{\Delta t} \quad \text{вольт .}$$

35) Работа по перемещению проводника с током и контура с током в магнитном поле:

$$W = I \Delta \Phi \quad \text{джоуль .}$$

36) Потокосцепление соленоида:

$$\Psi = L I \quad \text{вебер .}$$

В системе Гаусса было :

$$\Psi = L I / c .$$

37) Энергия магнитного поля соленоида:

$$W = L I^2 / 2 \quad \text{джоуль .}$$

38) Циркуляция вектора напряженности магнитного поля /30/:

$$\oint H_e dl = \sum_{k=1}^n I_k \quad \text{ампер .}$$

39) М.д.с. :

$$\Theta = I N \quad \text{ампер .}$$

40) Формула Томсона для периода T:

$$T_{\text{сек}} = 2\pi \sqrt{L_{2H} C_p} .$$

41) Связь полей \vec{E} и \vec{H} с полями \vec{D} и \vec{B} через плотность энергии электромагнитного поля :

$$\vec{E} = 2 \frac{\partial w}{\partial \vec{D}} \quad , \quad \text{вольт/метр,}$$

$$\vec{H} = 2 \frac{\partial w}{\partial \vec{B}} \quad . \quad \text{ампер/метр.}$$

42) Магнитная поляризация:

$$\vec{J}_n = \chi_a \vec{H} = \mu_0 \vec{M} = \mu_0 k_M \vec{H} \quad \text{л.гн/м}^2 ,$$

где χ_a - абсолютная магнитная восприимчивость в генри/м.

43) Закон преломления Снеллиуса:

$$n = \sqrt{\frac{\mu_2 \epsilon_2}{\mu_1 \epsilon_1}} .$$

44) Магнитный дипольный момент j :

$$j = J_n V \quad \text{вебер-метров,}$$

где V - объем, J_n - магнитная поляризация в а.гн/м².

45) Магнитный дипольный момент j кругового тока I :

$$j = \mu_0 I S \quad \text{вебер-метров,}$$

$$j = \mu_0 m \quad \text{вебер-метров.}$$

46) Частота прецессии ядер:

$$\omega = \gamma B_0.$$

Здесь γ - гиромагнитное отношение, B_0 - магнитное поле (в единицах тесла).

47) Намагниченность:

$$\vec{M} = \vec{m} / V,$$

где V - объем.

48) Внутренняя магнитная индукция:

$$B_i = J_n = \mu_0 M \text{ тесла.}$$

§ 8. Таблица некоторых физических постоянных в единицах СИ

Название постоянной	Обозначение постоянной	Величина постоянной	Литературный источник
Заряд электрона, элементарный заряд	e	$1,60202 \cdot 10^{-19}$ кулон	/20/
Масса покоя электрона	m_e	$9,1083 \cdot 10^{-31}$ кг	/20/
Масса покоя протона	m_p	$1,67239 \cdot 10^{-27}$ кг	/21/
Число фарадея	F	$9,6495 \cdot 10^7$ кулон/кг-экв	/20/
Постоянная Планка	h	$6,63 \cdot 10^{-34}$ дж·сек	/22/
Атомная единица массы	а.е.м.	$1,65976 \cdot 10^{-27}$ кг	/20/
Классический радиус электрона	$r_0 = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m_e c^2}$	$2,8178 \cdot 10^{-15}$ м	/8/
Боровский радиус	$a_0 = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{m_e e^2}$	$5,2917 \cdot 10^{-11}$ м	/8/
Скорость света в пустоте	c	$2,997925 \cdot 10^8$ м/сек	/8/
Удельный заряд электрона	e / m_e	$1,75936 \cdot 10^{11}$ кулон/кг	/9/
Комптоновская длина волны электрона	$\lambda_{0e} = \frac{h}{m_e c}$	$2,4 \cdot 10^{-12}$ м	/30/
	$\lambda_{0e} = \frac{\hbar}{m_e c}$	$3,86151 \cdot 10^{-13}$ м	/32/
Комптоновская длина волны протона	$\lambda_{0p} = \frac{\hbar}{m_p c}$	$2,10308 \cdot 10^{-16}$ м	/32/
Магнетон Бора	μ_B	$9,27 \cdot 10^{-24}$ дж/тл	/30/
Число Авогадро	N_A	$6,02486 \cdot 10^{26}$ кмоль ⁻¹	/21/
Число Лошмидта	N_L	$2,69 \cdot 10^{25}$ м ⁻³	/30/
1 эв	1 эв	$1,60 \cdot 10^{-19}$ дж	
1 Мэв	1 Мэв	$1,60 \cdot 10^{-13}$ дж	

Постоянная Больцмана	k	$1,38044 \cdot 10^{-23}$ дж/град	/33/
Характеристический импеданс вакуума	$\sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$	376,707 ом	/9/
Характеристическая проводимость вакуума	$\sqrt{\epsilon_0/\mu_0}$	$2,65458 \cdot 10^{-3}$ сим	/9/
Электрическая постоянная	ϵ_0	$8,8541 \cdot 10^{-12}$ ф/м	
Магнитная постоянная	μ_0	$1,25664 \cdot 10^{-6}$ гн/м	/9/
Постоянная Стефана-Больцмана	a	$5,67 \cdot 10^{-8}$ дж/(м ² сек·град ⁴)	/34/

Литература

- ГОСТ 9867-61. Международная система единиц.
- Г.Д.Бурдун. Единицы физических величин. Государственное издательство стандартов, М., 1962.
- М.Г.Богуславский, П.П.Кремлевский, Б.Н.Олейник, Е.Н.Чечурина, К.П.Широков. Таблицы перевода единиц измерений. Государственное издательство стандартов, М., 1963.
- ГОСТ 7663-55. Образование кратных и дольных единиц измерений.
- Symbols, unit, and nomenclature in physics*
Physics Today, June 1962, p. 20.
- Г.Д.Бурдун. Международная система единиц и ее внедрение в преподавание. Вестник высшей школы, № 2, 1962.
- Г.Д.Бурдун. Международная система единиц и ее практическое внедрение. Стандартизация, № 3, 1962.
- В.Пановский, М.Филипс. Классическая электродинамика. Физматгиз 1963.
- В.Смайт. Электростатика и электродинамика. ИЛ, 1954.
- А.Зоммерфельд. Электродинамика. ИЛ, 1958.
- Р.В.Поль. Учение об электричестве. Физматгиз, М., 1962.
- Н.В.Калашников и Л.Р.Стоцкий. Международная система единиц. "Газовая промышленность" № 12, 1961.
- А.И.Горфман. О единой Международной системе единиц. Ленинград, 1963.
- Н.В.Калашников и Л.Р.Стоцкий. Единая международная для всех отраслей науки, техники и производства. Еженедельник ЦК КПСС "Экономическая газета" за 8 января 1962 года.
- Р.В.Поль. Введение в учение об электричестве. ГТТИ, М.-Л., 1933.

16. ГОСТ 8033-56. Электрические и магнитные единицы.
17. Международная система единиц (СИ) по ГОСТ 9867-61. Репринт ОИЯИ **R**-1203, Дубна, 1963.
18. ГОСТ 1494-49 Электротехника. Обозначения основных величин (буквенные).
19. Н.А.Умов. Избранные сочинения. Гостехиздат, 1950.
20. Дж.Кэй, Т.Лэби. Таблицы физических и химических постоянных. Физматгиз, 1962.
21. Дж.Сандерс. Основные атомные константы. Госатомиздат, 1962.
22. J. A. Prins. *On practical and atomic units. Physica, 1962* Д. 28, N 2, p. 117.
23. Г.Д.Бурдун. Международная система единиц и современные эталоны исходных единиц измерения. „Инж.-физич. журнал“, № 12, стр. 113-129, 1962.
24. Коротков В.П. К введению Международной системы единиц в СССР. „Измерит. техника“ № 2, стр. 1-3, 1963.
25. Н.В.Калашников и Л.Р.Стоцкий. Международная система единиц. „Заводская лаборатория“ № 8, стр. 1018-1021, 1962.
26. В.П.Коротков. К введению Международной системы единиц в СССР. „Атомная техника за рубежом“ № 5, стр. 46-48, 1963; „Энергетик“ № 5, стр. 6, 1963.
27. Е.Н.Чечурина. Международная система единиц в практике магнитных измерений. Труды институтов Комитета стандартов..., вып. 72 (132), Стандартгиз, М.-Л., 1963.
28. Приказ № 325 от 27. XI. 1961 г. Министра высшего и среднего специального образования СССР.
29. Документ Международной организации по стандартизации ISO/TC 12, 303 E.
30. А.Г.Чертов. Международная система единиц измерения. Росвузиздат, М., 1963.

31. А.Н.Малицкий. Единицы измерения электрических и магнитных величин. Издательство Московского университета, 1961.
32. Физический энциклопедический словарь, т. II, М., 1962.
33. Физический энциклопедический словарь, т. I, М., 1960.
34. Д.Дж.Роуз, М.Кларк. Физика плазмы и управляемые термоядерные реакции. Пер. с англ. Госатомиздат, М., 1963.

Рукопись поступила в издательский отдел
8 июня 1963 г.