

NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN
PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES

ISSN 1991-346X

Volume 5, Number 315 (2017), 60 – 65

I.D. Kozin, I.N. Fedulina

Almaty University of Power Engineering and Telecommunications, Almaty, Kazakhstan
E-mail: IDKozin@yandex.ru, InnaFedulina@yandex.kz

VACUUM - ENVIRONMENT
IN THE DECISION OF RADIO PHYSICS PROBLEMS

Abstract. It is shown that assignment to vacuum of electric and magnetic characteristics in SI system has led to necessity to introduce for propagation mediums relative values of the same parameters which play only a role of coefficients. It is offered for vacuum in SI system to enter light velocity as a constant, dielectric and magnetic permeability to equate to unit, and for medium these parameters to make absolute. Discrepancies of some quantities of the electromagnetic theory to the appropriated dimensions are given.

Key words: Dimension, units, systems of units, electric properties, magnetic properties

УДК 621.351.819

И.Д. Козин, И.Н. Федулina

Алматинский университет энергетики и связи, Алматы, Казахстан

ВАКУУМ – СРЕДА В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ РАДИОФИЗИКИ

Аннотация. Показано, что присвоение вакууму электрических и магнитных характеристик в системе единиц СИ привело к необходимости введения для сред распространения относительных значений тех же параметров, которые играют лишь роль коэффициентов. Предлагается для вакуума в систему единиц СИ ввести скорость света в качестве постоянной величины, диэлектрические и магнитные проницаемости приравнять к единице, а для среды эти параметры сделать абсолютными. Приведены несоответствия некоторых величин электромагнитной теории присвоенным размерностям.

Ключевые слова: размерность, единицы, системы единиц, электрические свойства, магнитные свойства.

Пространство, в котором происходит распространение радиоволн, называется средой. Средой распространения мы называем и свободное пространство (вакуум), электрически нейтральные и заряженные образования. К средам можно отнести также проводники и изоляторы. Вакуумом мы называем пространство, в котором отсутствует любой вид материи (вещества). Чаще всего, мы подразумеваем, что вакуум не обладает никакими физическими свойствами: температурой, плотностью вещества и т.п. В первую очередь к вакууму мы относим межзвёздное и межгалактическое пространство. И хотя истинного вакуума даже в межзвёздном пространстве нет, оно наиболее близко по характеристикам к таковому. Но даже через это межзвёздное пространство распространяются свет, корпускулярная радиация звёзд, космическая и метеоритная пыль.

Закономерности распространения радиоволн в различных средах определяются совместным решением уравнений Максвелла и среды распространения [1]. При этом среда распространения характеризуется следующими выражениями:

$$\vec{D} = \varepsilon_a \vec{E}, \quad \vec{B} = \mu_a \vec{H}, \quad \vec{j} = \sigma(\vec{E} + \vec{E}_v), \quad (1)$$

где D – электрическое смещение (индукция), B – магнитная индукция, H , E и E_v – магнитная и электрические (тока Ампера и тока смещения) напряжённости поля, j – плотность тока, σ –

удельная проводимость, ε_a и μ_a - диэлектрическая и магнитная проницаемости, которые и определяют свойства среды относительно распространения электромагнитных волн.

Выражения (1) называются *уравнениями состояния среды*, в которой происходят электромагнитные процессы.

Во всех системах единиц за основные размерности приняты обозначения длины L , массы M и времени T . В каждой из таких систем введено ещё по одной единице. В качестве четвёртой величины в системе СИ принята единица силы тока ампер, размерность которой $[I]=L^{1/2}M^{1/2}T^{-1}$. Система СГС подразделяется на две подсистемы, в которые в качестве четвёртой основной единицы вводится диэлектрическая постоянная и даёт системе название СГСЕ или магнитная постоянная, что даёт ей название СГСМ.

В каждой из систем находятся и производные единицы, типа «сила» и т.п.

В исследованиях направления электромагнетизм чаще всего используются системы СИ и СГС.

Таблица 1 – Единицы измерения и размерности электромагнитных величин среды

Величина	Обозначения	единица		размерность	
		СИ	СГС	СИ	СГС
Напряжённость электрического поля	E	В/м	б/н	$LM\Gamma^{-3}T^{-1}$	$L^{-1/2}M^{1/2}T^{-1}$
Электрическая индукция	D	Кл/м ²	б/н	$L^{-2}TI$	$L^{-1/2}M^{1/2}T^{-1}$
Диэлектрическая проницаемость: вакуума среды	ε	б/р	б/р р	$L^{-3}M^{-1}T^4I^2$	б/р
	ε_0	Ф/м			
	ε_a	Ф/м			
Напряжённость магнитного поля	H	Вб, А/м	Мкс	$L^{-1}I$	$L^{1/2}M^{1/2}T^{-1}$
Магнитная индукция	B	Т	Гс	$M\Gamma^{-2}T^{-1}$	$L^{1/2}M^{1/2}T^{-1}$
Магнитная проницаемость: вакуума среды	μ	б/р	б/н	$LM\Gamma^{-2}T^{-2}$	б/р
	μ_0	Г/м			
	μ_a	Г/м			
Плотность тока	j	А/м ²	б/н	$L^{-2}I$	$L^{-1/2}M^{1/2}T^{-2}$
Удельная проводимость	ρ	См/м	б/н	$L^{-3}M^{-1}T^3I^2$	T^{-1}

б/р – безразмерная величина,

б/н – величина без названия

1. Индукция и напряжённость электромагнитного поля. В соотношениях индукций и напряжённостей полей в научных публикациях допускаются различные толкования. Так, во множестве учебной литературы и научных публикациях термины индукции и напряжённости электрических и магнитных полей просто отождествляются. Читая такие заключения, необходимо уточнять какой системой единиц пользовался автор. Например, для системы СГС индукция – это напряжённость для вакуума. В системе СГС формально напряжённость магнитного поля может быть определена из выражения

$$H=B/\mu,$$

а электрического поля –

$$E=D/\varepsilon.$$

За единицу напряжённости магнитного поля H , равной одному эрстеду (Э) принимается напряжённость поля в вакууме при индукции B , равной 1 Гауссу (Гс). Поскольку магнитная μ и ε электрическая проницаемости – величины безразмерные, размерности обеих напряжённостей в этом случае совпадают с размерностями соответствующих индукций, но присвоенные названия единиц не тождественны.

В тоже время размерностью магнитной индукции в системе СИ принимают единицу «тесла» – Т, а напряжённость – «вебер» – Вб или А/м. В этой системе индукция магнитного поля имеет размерность $[B]=M\Gamma^{-2}T^{-1}$, в то время как в системе СГС она $[B]=L^{1/2}M^{1/2}T^{-1}$. Согласимся, что различная размерность в различных системах, имеющих одинаковые основные величины, не совсем логична. Не совсем логично, когда названия величин отличаются, а их размерность одинакова.

Для определения единицы напряжённости магнитного поля удобно воспользоваться любым из следствий закона Био-Савара-Лапласа, дающих выражение напряжённости магнитного поля тока для конкретных контуров. Возьмём для этой цели формулу напряжённости магнитного поля в центре кругового тока

$$H=I/(2R).$$

Согласно этой формулы напряжённость поля будет равняться единице, если по кольцу радиусом в один метр будет протекать ток силой 2А или, что, разумеется, тоже, ток силой 1А – по кольцу радиусом 0,5 м. Единицей напряжённости названа величина А/м. Размерность напряжённости магнитного поля

$$[H]=L^{-1}I.$$

Не указывая на многочисленные источники, отметим, что в пределах одной публикации эти названия чередуются как равноправные понятия.

Рассмотрим размерности величин, входящих в выражения (1).

$$E \rightarrow \left(\frac{B}{m} \right) \rightarrow [B \cdot m^{-1}], D \rightarrow \left(\frac{A \cdot c}{B \cdot m} \cdot \frac{B}{m} \right) = \frac{A \cdot c}{m^2} \rightarrow [A \cdot c \cdot m^{-2}] \text{ и}$$

$$H \rightarrow \left(\frac{A}{m} \right) \rightarrow [A \cdot m^{-1}], B \rightarrow \left(\frac{B \cdot c}{A \cdot m} \cdot \frac{A}{m} \right) = \frac{B \cdot c}{m^2} \rightarrow T \cdot l \rightarrow [B \cdot c \cdot m^{-2}]$$

Как видим, размерности индукции и напряжённости обеих компонент электромагнитной среды существенно различаются, не совпадают с указанными в работе [2] и отождествлять их не имеет смысла.

2. Электрическая и магнитная проницаемости. Диэлектрическая и магнитная проницаемости ε_a и μ_a сред распространения электромагнитных волн – абсолютные физические переменные, которые определяют сопротивление среды для электрического и магнитного полей.

Характеристиками среды также являются:

- диэлектрическая проницаемость, равная $\varepsilon_a = \varepsilon \cdot \varepsilon_0$,
- магнитная проницаемость, равная $\mu_a = \mu \cdot \mu_0$ и
- удельная проводимость σ .

Величины ε и μ – относительны к аналогичным единицам, присущим вакууму ε_0 и μ_0 .

Если удельная проводимость σ - величина абсолютная и имеет размерность См/м, то величины ε и μ размерности не имеют, они, можно сказать, играют роль коэффициентов k_ε и k_μ при ε_0 и μ_0 , относящихся к вакууму. То есть, можно предыдущие выражения представить в виде:

$$\varepsilon_a = k_\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \text{ и } \mu_a = k_\mu \cdot \mu_0.$$

Как отмечается в справочнике [2], из уравнений электромагнетизма можно установить аналогию между E и B , D и H , ε и $1/\mu$, которая показывает неудачность наименований характеристик магнитного поля. Для определения магнитных величин, а именно взаимодействия полюсов постоянных магнитов, использовался закон Кулона.

В нижеприведенной таблице 2 приведены значения относительной диэлектрической проницаемости и абсолютной проводимости для ряда веществ среды распространения радиоволн.

Вариации σ связаны в основном с температурой сред распространения радиоволн.

В общем случае ε , μ и σ могут быть функциями времени и координат, особенно это относится к величинам ε и σ для реальной земной поверхности и атмосферы, свойства которых неоднородны и непостоянны во времени.

Таблица 2 – Относительная диэлектрическая проницаемость ε и проводимость σ некоторых приземных сред

Среда	Частота, МГц	$\varepsilon = k_\varepsilon$	σ , (См/м)
Вакуум		1,0	0
Воздух		1,00059	0
Пресная вода ($t=20^\circ\text{C}$)	<300	90	$2 \div 10^{-2}$
	3000	80	5
	10000	40	20
	100000	10	5
Морская вода ($t=20^\circ\text{C}$)	<300	78	5
	3000	70	5
	10000	40	20
	100000	10	5
Влажная почва ($t=20^\circ\text{C}$)	<300	$15 \div 30$	$10^{-2} \div 1 \cdot 10^{-1}$
	3000	$15 \div 30$	$10^{-1} \div 5 \cdot 10^{-1}$
	10000	$10 \div 15$	$1 \div 3$
Сухая почва ($t=20^\circ\text{C}$)	<300	$3 \div 6$	$10^{-4} \div 5 \cdot 10^{-3}$
	3000	$3 \div 6$	$5 \cdot 10^{-3} \div 7 \cdot 10^{-2}$
	10000	$2 \div 5$	$10^{-1} \div 2 \cdot 10^{-1}$
Лёд ($t=-10^\circ\text{C}$)	<300	$4 \div 5$	$10^{-2} \div 10^{-1}$
	3000	3.5	$10^{-4} \div 10^{-3}$
	10000	3.2	$10^{-4} \div 10^{-3}$
Снег ($t=-10^\circ\text{C}$)	<300	1.2	10^{-6}
	3000	1.2	10^{-5}
	10000	1-2	10^{-5}
Мёрзлая почва ($t=-35^\circ\text{C}$)	<300	$3 \div 7$	$10^{-3} \div 10^{-2}$
Лес	<30	1.004	$10^{-6} \div 10^{-5}$
	$60 \div 3000$	$1.004 \div 1.4$	$10^{-5} \div 10^{-3}$

Вопреки приведённым определениям теоретическая радиофизика в системе СИ присвоила вакууму вполне определённые характеристики и свойства. Так только для того, чтобы оправдать значение величины скорости света, определяемой выражением

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}, \quad (2)$$

вакуум приобрёл такие характеристики как электрическая ε_0 и магнитная μ_0 проницаемости, имеющие в системе единиц СИ значения

$$\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}, \text{ Ф/м}, \left(\frac{\text{А} \cdot \text{с}}{\text{В} \cdot \text{м}} \right) \text{ и } \mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6}, \text{ Гн/м}, \left(\frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{А} \cdot \text{м}} \right). \quad (3)$$

Малопонятно, что физически эти величины в вакууме означают. Как мы уже отмечали: нет вещества, нет физических свойств.

Предлагаемые изменения в теорию электромагнетизма сведены в таблицу 3.

Интересно, что с метрологической точки зрения между ε_0 и μ_0 существует различие. Значение величины μ_0 зафиксировано международным соглашением и является неизменным. Значение ε_0 определяется точностью измерения скорости света (2) и, по мере уточнения последней, может изменяться [2].

Относительные электрическая и магнитная проницаемости для большинства веществ, например, для воздуха, близки к единице, $\varepsilon \approx \mu \approx 1$ и $\varepsilon_a \approx 8,854 \cdot 10^{-12}$, Ф/м, а $\mu_a \approx 1,256 \cdot 10^{-6}$, Гн/м. Для любых иных сред и $\varepsilon \neq 1$, и $\mu \neq 1$.

Неправомерность присвоения каких-либо свойств вакууму можно продемонстрировать на следующем примере [2]. В системе МКСМ в нерациональном виде основные единицы те же, что и в системе СИ. Однако электрическим и магнитным свойствам присвоены следующие, иные, чем в системе СИ, значения: $\mu_0 = 10^{-7}$ Гн/м, а $\varepsilon_0 = 1,1 \cdot 10^{-10}$ Ф/м. Как видим, единицы и размерности ε_0 и μ_0 в обеих системах идентичны, а значения различны. Но тогда, согласно уравнению (2), скорость

распространения электромагнитной волны в вакууме в системе МКСМ составит величину $c = 3,33 \cdot 10^7$ м/с, то есть почти на порядок меньше истинного значения.

Правильней следовало бы в систему СИ, как и в любую другую систему, ввести величину скорости света и электромагнитных волн в вакууме без введения величин ε_0 и μ_0 , то есть ввести значение этой величины как физической константы $c = 3 \cdot 10^8$ м/с, а $\varepsilon_0 = \mu_0 = 1$, как это принято в системе единиц СГС.

Тогда скорости этих волн в среде вместо

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon \varepsilon_0 \cdot \mu \mu_0}},$$

можно представить уравнением

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon \cdot \mu}}, \quad (4)$$

а величины ε и μ для сред распространения из относительных следует перевести в абсолютные характеристики.

Это предложение вполне логично, поскольку отклоняет необходимость присвоения электромагнитных свойств вакууму и характеристики сред становятся физическими параметрами. Однако без утверждения этого предложения, пользоваться следует установленными положениями.

Эти установленные положения несут в себе и другие неудобства. Ещё с древних времён опыты электризации веществ привели к мнению, что все нейтральные в электрическом плане вещества – суть диэлектрики, то есть они состоят из двух частей, заряженных различными по знаку зарядами.

Диэлектрик (изолятор) – материал, плохо проводящий или совсем не проводящий электрический ток. Концентрация свободных носителей заряда в диэлектрике не превышает 10^8 см⁻³. Основное свойство диэлектрика состоит в способности поляризоваться во внешнем электрическом поле. С точки зрения зонной теории твёрдого тела диэлектрик – вещество с шириной запрещённой зоны больше 3 эВ.

Как показали опыты с электролитами (золочение, серебрение, покрытие медью и т.д.) диэлектриками являются кислотные соли, окислы и т.п. Простые молекулы, например, молекулы атмосферного газа диэлектрическими свойствами не обладают.

Условно, к проводникам относят материалы с удельным электрическим сопротивлением $\rho < 10^{-5}$ Ом·м, а к диэлектрикам (изоляторам) – материалы, у которых $\rho > 10^8$ Ом·м. При этом удельное сопротивление хороших проводников может составлять всего 10^{-8} Ом·м, а у лучших диэлектриков превосходить 10^{16} Ом·м. Удельное сопротивление полупроводников в зависимости от строения и состава материалов, а также от условий их эксплуатации может изменяться в пределах 10^{-5} - 10^8 Ом·м. Хорошими проводниками электрического тока являются металлы. Из 105 химических элементов лишь двадцать пять являются неметаллами, причём двенадцать элементов могут проявлять полупроводниковые свойства. Но кроме элементарных веществ существуют тысячи химических соединений, сплавов или композиций со свойствами проводников, полупроводников или диэлектриков. Чёткую границу между значениями удельного сопротивления различных классов материалов провести достаточно сложно. Например, многие полупроводники при низких температурах ведут себя подобно диэлектрикам. В то же время диэлектрики при сильном нагревании могут проявлять свойства проводников или полупроводников. Качественное различие состоит в том, что для металлов проводящее состояние является основным, а для полупроводников и диэлектриков – возбуждённым.

Зачастую в электрическом плане среды разделяют на *диэлектрики*, *полупроводники* и *проводники* по отношению плотностей тока смещения j_v и тока проводимости j . Оно зависит от электрической проницаемости, проводимости и длины волны и равно

$$\left| \frac{j_v}{j} \right| = \frac{\varepsilon}{60 \cdot \lambda \cdot \sigma}, \quad (5)$$

где $\lambda = c/f$ – длина волны, f – частота, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света.

Как уже упоминалось (1), магнитная проницаемость – физическая величина, характеризующая изменение магнитной индукции B среды при воздействии магнитного поля H [3]. Для физического вакуума $\mu = 1$. Относительная магнитная проницаемость для большинства материалов (например, для воздуха), равняется единице, $\mu = 1$. Материалы с относительной магнитной проницаемостью меньшей единицы $\mu < 1$ называются *диамагнетиками*, с положительной, но большей единицы, относительной магнитной проницаемостью $\mu > 1$ - *парамагнетиками* и с очень большой относительной магнитной проницаемостью $\mu \gg 1$ - *ферромагнетиками*.

Таблица 3 - Используемые и рекомендуемые единицы сред распространения электромагнитных волн

Физические характеристики и их обозначения			
Теория электромагнетизма		Рекомендуемые	
Единицы	Размерности	Единицы	Размерности
ε_0	$8,854 \cdot 10^{-12}, [\text{А} \cdot \text{с} \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}]$	ε_0	1, бр*
μ_0	$1,256 \cdot 10^{-6}, [\text{В} \cdot \text{с} \cdot \text{А}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}]$	μ_0	1, бр
ε	бр	$\varepsilon = k_\varepsilon$	$[\text{А} \cdot \text{с} \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}]$
μ	бр	$\mu = k_\mu$	$[\text{В} \cdot \text{с} \cdot \text{А}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}]$
$\varepsilon_a = \varepsilon \cdot \varepsilon_0$	$[\text{А} \cdot \text{с} \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}]$	$\varepsilon_a = k_\varepsilon \cdot \varepsilon_0 = k_\varepsilon$	$[\text{А} \cdot \text{с} \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}]$
$\mu_a = \mu \cdot \mu_0$	$[\text{В} \cdot \text{с} \cdot \text{А}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}]$	$\mu_a = k_\mu \cdot \mu_0 = k_\mu$	$[\text{В} \cdot \text{с} \cdot \text{А}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}]$
c_0	$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \approx 3 \cdot 10^8, \text{м} \cdot \text{с}^{-1}$	const**	$\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$

*бр – безразмерная величина,

** - константа

Таким образом, теория электромагнетизма требует пересмотра и коррекции в терминологии.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Козин И.Д., Федулina И.Н. Космическая погода и ее влияние на распространение радиоволн: Учебное пособие – Алматы: АУЭС, 2012, - 79 с.
 [2] Сена Л.А. Единицы физических величин и их размерности. – М.: Наука, 1977. - 336 с.
 [3] Физический энциклопедический словарь. - М.: Советская энциклопедия, 1983. - 928 с.

REFERENCES

- [1] Kozin I.D., Fedulina I.N. Space weather and its influence on radiowave propagation. Almaty: AUES, 2012. 79 p. (in Russ.).
 [2] Sena L.A. Edinicy fizicheskikh velichin i ih razmernosti. M.: Nauka, 1977. 336 p. (in Russ.).
 [3] Fizicheskij enciklopedicheskij slovar. M.: Sovetskaja enciklopedija, 1983. 928 p. (in Russ.).

И.Д. Козин, И.Н. Федулina

Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы, Қазақстан

РАДИОФИЗИКА ЕСЕПТЕРІН ШЕШУДЕГІ ВАКУУМ – ОРТА

Аннотация. Өлшемдер жүйесінде ӨЖ вакуумге электрлік және магниттік сипаттамаларды меншіктеу, таралу орталарына тек коэффициенттердің рөлін ойнайтын дәл сол параметрлердің салыстырмалы мәндерін енгізудің қажеттілігі көрсетілді. Вакуум үшін өлшемдер жүйесіне ӨЖ тұрақты шама ретінде жарық жылдамдығын енгізу, диэлектрлік және магниттік өткізгіштіктерін бірге теңеу, ал орта үшін бұл мәндерді абсолютті ету ұсынылады. Электромагниттік теориясының кейбір өлшемдерінің меншіктелген өлшемдеріне сәйкес еместігі келтірілген.

Тірек сөздер: өлшемділік, бірліктер, бірліктер жүйесі, электрлік қасиеттер, магниттік қасиеттер