

Размерности и единицы напряженностей в физическом поле

Аннотация. Проанализированы размерности и единицы напряженностей в гравитационном и электромагнитном полях в системе единиц СИ и в системе величин. Их сравнение показало преимущество системы величин и необходимость корректировки системы единиц СИ. В этой связи проанализированы определяющие уравнения напряженностей в разных системах единиц выявлены причины сложившейся ситуации.

1. Введение

При рассмотрении размерностей и единиц напряженностей различных физических полей не заметна какая-либо объединяющая их закономерность. Это объясняется тем, что исторически эти размерности и единицы постоянно менялись при переходе от одной системы единиц к другой [1]. Ничего не может поменяться и при попытке систематизации физических величин, если руководствоваться следующим стандартным определением [2]: *"Система физических величин (система величин) – совокупность взаимосвязанных физических величин, образованная в соответствии с принятыми принципами, когда одни величины принимаются за независимые, а другие являются функциями независимых величин"*. Согласно этому определению **базис системы величин** (перечень основных величин) образуется, *"в соответствии с принятыми принципами"*. Что это за принципы?

На международных конференциях физиков и метрологов принимается комплект основных единиц, в соответствии с которым устанавливается комплект основных величин (якобы независимых). В качестве же основных единиц выбираются такие, которые удобны для измерения и для создания измерительных эталонов. Отсюда следует, что базис системы величин де факто определяется комплектом основных единиц. И поэтому основные физические величины не являются независимыми. Возникает алогизм, заключающийся в том, что по определению, заложенному в стандарт, система единиц зависит от системы величин, а на деле получается наоборот.

Поэтому многие, в том числе, и квалифицированные инженеры и физики при проверке справедливости физических закономерностей пользуются не анализом размерностей, а анализом единиц (в настоящее время анализом единиц СИ). И даже часто называют единицы размерностями, путая одно с другим. Чтобы устранить этот алогизм, необходимо изменить само стандартное определение системы физических величин.

В статье [3] предложена другая формулировка: *"Система физических величин (система величин) – совокупность независимых физических величин, набор которых соответствует законам природы, и других физических величин, которые являются функциями независимых величин"*. Слова *"соответствует законам природы"*, заменяющие слова *"в соответствии с принятыми принципами"*, могут в корне изменить ситуацию. На место априорного подхода к выбору базиса основных величин придет строго научный подход. Это не обязательно должно коснуться унификации единиц в рамках существующих систем единиц, но откроет дорогу систематизации физических величин.

В частности, предложена энергодинамическая система физических величин и понятий ЭСВП [3-6], в которой комплект основных физических величин лишь частично базируется на основных величинах СИ. Если система единиц СИ – это система размерностей MLTI (масса, длина, время, сила тока), то система величин ЭСВП – это система размерностей ELANT (энергия, длина, угол поворота, число структурных элементов, время). Тенденция развития современной теоретической физики в сторону признания базиса системы величин именно из этих пяти основных величин подтверждается в работе [7], анализирующей исторический процесс развития естественных систем единиц.

Для анализа размерностей напряженностей поля можно ограничиться базисом ELT. Из анализа размерностей законов Ньютона и Кулона (при размерности размерного коэффициента, равной 1) вытекает размерность заряда поля Q ($\dim Q = E^{1/2}L^{1/2}$).

Соответственно, единица заряда поля равна $\text{Дж}^{1/2}\cdot\text{м}^{1/2}$. Единицы заряда гравитационного и электромагнитного поля отличаются друг от друга только разными численными значениями. В статье [10, параграф 2] приведено это соотношение: $1 \text{ кг} = 8,617\cdot 10^{-11} \text{ Кл}$.

При желании избавиться от дробных степеней в показателях размерностей можно заменить базис ELT на базис LTQ [5, параграф 9]. К слову, этой же цели послужило в своё время введение в систему СИ размерности силы тока I .

2. Таблица размерностей и единиц напряженностей физического поля

Приведенная ниже таблица с очевидностью показывает, чем система величин ЭСВП с базисом LTQ выгодно отличается от системы единиц СИ с базисом MLTI при рассмотрении размерностей напряженностей поля. В таблице гравитационное поле подразделяется аналогично электромагнитному полю на гравистатическое поле (аналогичное электрическому полю) и гравидинамическое поле (аналогичное магнитному полю).

Форма физического поля	Вид среды	Напряженность	Размерность в ЭСВП	Единица в ЭСВП	Размерность в СИ	Единица в СИ
Гравистатическое ¹⁾	физический вакуум	G	$L^{-2}Q$	$\text{кг}/\text{м}^2$	$L T^{-2}$	$\text{м}/\text{с}^2$
Гравистатическое ²⁾	внутри вещества	-	$L^{-2}Q$	$\text{кг}/\text{м}^2$	-	-
Электрическое ³⁾	без учета среды	$\epsilon_0 E$	$L^{-2}Q$	$\text{Кл}/\text{м}^2$	$L^{-2}T I$	$\text{Кл}/\text{м}^2$
Электрическое ⁴⁾	физический вакуум	E	$L^{-2}Q$	$\text{Кл}/\text{м}^2$	$L M T^{-3} I^{-1}$	$\text{Н}/\text{Кл}; \text{В}/\text{м}$
Электрическое ⁵⁾	внутри вещества	P	$L^{-2}Q$	$\text{Кл}/\text{м}^2$	$L^{-2}T I$	$\text{Кл}/\text{м}^2$
Электрическое ⁶⁾	с учетом вещества	D	$L^{-2}Q$	$\text{Кл}/\text{м}^2$	$L^{-2}T I$	$\text{Кл}/\text{м}^2$
Гравидинамическое ²⁾	физический вакуум	-	$L^{-3}T Q$	$\text{кг}\cdot\text{с}/\text{м}^3$	-	-
Гравидинамическое ²⁾	внутри вещества	-	$L^{-1}T^{-1}Q$	$\text{кг}/(\text{м}\cdot\text{с})$	-	-
Магнитное ²⁾	без учета среды	B/μ_0	$L^{-1}T^{-1}Q$	$\text{Кл}/(\text{м}\cdot\text{с})$	$L^{-1}I$	$\text{А}/\text{м}$
Магнитное ⁷⁾	физический вакуум	B	$L^{-3}T Q$	$\text{Кл}\cdot\text{с}/\text{м}^3$	$M T^{-2} I^{-1}$	Тл
Магнитное ⁸⁾	внутри вещества	M	$L^{-1}T^{-1}Q$	$\text{Кл}/(\text{м}\cdot\text{с})$	$L^{-1}I$	$\text{А}/\text{м}$
Магнитное ⁹⁾	с учетом вещества	H	$L^{-1}T^{-1}Q$	$\text{Кл}/(\text{м}\cdot\text{с})$	$L^{-1}I$	$\text{А}/\text{м}$

Примечания к таблице:

1. В современной физике напряженность отмеченной формы поля называют:

- 1) **напряженностью поля тяготения**,
- 2) нет конкретного названия для этой напряженности,
- 3) иногда **чистой напряженностью**,

- 4) **напряженностью электрического поля,**
 - 5) **поляризованностью,**
 - 6) **электрическим смещением,**
 - 7) **магнитной индукцией,**
 - 8) **намагниченностью,**
 - 9) **напряженностью магнитного поля.**
2. ϵ_0 и μ_0 – электрическая и магнитная постоянные.

3. Важные выводы, вытекающие из таблицы напряженностей

1. В системе ЭСВП во всех размерностях напряженностей размерность заряда Q везде в плюс первой степени, а алгебраическая сумма показателей степеней при размерностях L и T во всех формах физического поля одна и та же и равна (-2) . Соответственно, в каждой единице напряженности имеется единица заряда поля (гравитационной массы в килограммах либо электрического заряда в Кулонах).

2. В системе СИ размерность гравитационного заряда LT^{-2} неверна по причине применения неверного по своей сути принципа эквивалентности гравитационной и инертной масс [9]. Именно применение этого принципа привело к появлению в литературе так называемой LT -системы размерностей [10]. Для напряженностей же гравидинамического поля в СИ размерностей и единиц вообще нет. (Если следовать анализу размерностей, то единицей напряженности гравидинамического поля была бы единица c^{-1}). Подобная ситуация свидетельствует о том, что размерности и единицы напряженностей гравитационного поля в СИ нуждаются в обновлении. Система ЭСВП в этом плане имеет явное преимущество перед системой СИ.

3. В системе СИ равенство суммы показателей степеней при размерностях L и T числу (-1) наблюдается частично. Это не касается напряженностей полей в физическом вакууме, отчего у последних и единицы особые. Следовательно, размерности и единицы в СИ для напряженностей полей в физическом вакууме необъективно отражают действительность, что связано с неправильным подбором значений размерных коэффициентов в СИ (электрической и магнитной постоянных).

4. При рассмотрении напряженностей полей внутри вещества и с учетом вещества видно, что поля связанных и сторонних зарядов характеризуются чистыми напряженностями, то есть напряженностями без учета свойств физического вакуума. В современной физике внимание на этом не акцентируется, а понятие "чистая напряженность" почти не применяется. В результате создается ошибочное впечатление, что электрическое смещение \mathbf{D} и напряженность магнитного поля \mathbf{H} можно применять к полям в физическом вакууме даже тогда, когда о наличии вещества речь не идет. Этот недостаток особенно заметен при рассмотрении распространения электромагнитных волн в физическом вакууме.

5. В электрическом поле размерности \mathbf{D} и $\epsilon_0\mathbf{E}$ совпадают, а в магнитном поле совпадают размерности \mathbf{H} и \mathbf{V}/μ_0 . Так называемая напряженность магнитного поля \mathbf{H} – это фактически напряженность магнитного поля с учетом свойств вещества, но без учета свойств физического вакуума. Если же в магнитном поле вещества нет (например, нет сердечника в катушке индуктивности), то следует применять не \mathbf{H} , как это часто делается, а только магнитную индукцию \mathbf{V} . Соответственно, в определяющем уравнении для вектора Пойнтинга должна присутствовать \mathbf{V} [11], а не \mathbf{H} [12].

4. Эволюция определяющих уравнений напряженностей в системах единиц

Всё, что было сказано выше, становится понятнее, если проследить за эволюцией определяющих уравнений напряженностей в различных системах единиц XIX и XX века. Это видно из составленной нами таблицы.

Таблица определяющих уравнений напряженностей

Название величины	Символ	Системы единиц				Система величин
		СГСЭ	СГСМ	СГС	СИ	
Размерные коэффициенты	$k_e =$	1	$1/c^2$	1	$1/4\pi\epsilon_0$	1
	$k_m =$	$1/c^2$	1	1	$\mu_0/4\pi$	$1/c^2$
Напряженности поля в вакууме	$\mathbf{E} =$	$Q\mathbf{e}_r/r^2$	$Q\mathbf{e}_r/r^2$	$Q\mathbf{e}_r/r^2$	$Q\mathbf{e}_r/\epsilon_0 4\pi r^2$	$Q\mathbf{e}_r/4\pi r^2$
		\mathbf{F}/q	\mathbf{F}/q	\mathbf{F}/q	\mathbf{F}/q	-
	$\mathbf{B} =$	$Q[\mathbf{v}\mathbf{e}_r]/r^2$	$Q[\mathbf{v}\mathbf{e}_r]/r^2$	$Q[\mathbf{v}\mathbf{e}_r]/r^2$	$(\mu_0/4\pi)Q[\mathbf{v}\mathbf{e}_r]/r^2$	$[(Q\mathbf{v})\mathbf{e}_r]/4\pi r^2 c^2$
		$\mathbf{F}/(q [\mathbf{v}\mathbf{e}_r])$	$\mathbf{F}/(q [\mathbf{v}\mathbf{e}_r])$	$\mathbf{F}/(q [\mathbf{v}\mathbf{e}_r])$	$\mathbf{F}/(q [\mathbf{v}\mathbf{e}_r])$	-
Напряженности поля связанных зарядов в веществе	$\mathbf{P} =$	$\Sigma_V \mathbf{p}_e/V$	$\Sigma_V \mathbf{p}_e/V$	$\Sigma_V \mathbf{p}_e/V$	$\Sigma_V \mathbf{p}_e/V$	$\Sigma_V \mathbf{p}_e/V$
		$\chi\mathbf{E}/4\pi$	$\chi\mathbf{E}/4\pi$	$\chi\mathbf{E}/4\pi$	$\chi\epsilon_0 \mathbf{E}$	$\chi\mathbf{E}$
	$\mathbf{M} =$	$\Sigma_V \mathbf{p}_m/V$	$\Sigma_V \mathbf{p}_m/V$	$\Sigma_V \mathbf{p}_m/V$	$\Sigma_V \mathbf{p}_m/V$	$\Sigma_V \mathbf{p}_m/V$
		$\kappa \mathbf{B} c^2/(1+4\pi\kappa)$	$\kappa \mathbf{B}/(1+4\pi\kappa)$	$\kappa \mathbf{B}/(1+4\pi\kappa)$	$\kappa(\mathbf{B}/\mu_0)/(1+\kappa)$	$\kappa \mathbf{B} c^2$
Напряженности поля сторонних зарядов (с учетом вещества)	$\mathbf{D} =$	$\mathbf{E} + 4\pi\mathbf{P}$	$\mathbf{E}/c^2 + 4\pi\mathbf{P}$	$\mathbf{E} + 4\pi\mathbf{P}$	$\epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}$	$\mathbf{E} + \mathbf{P}$
		$\epsilon_0 \mathbf{E}$	$\epsilon_0 \mathbf{E}/c^2$	$\epsilon \mathbf{E}$	$\epsilon_0 \epsilon \mathbf{E}$	$\epsilon \mathbf{E}$
	$\mathbf{H} =$	$\mathbf{B} c^2 - 4\pi\mathbf{M}$	$\mathbf{B} - 4\pi\mathbf{M}$	$\mathbf{B} - 4\pi\mathbf{M}$	$\mathbf{B}/\mu_0 - \mathbf{M}$	$\mathbf{B} c^2 - \mathbf{M}$
		$\mathbf{B} c^2/\mu_0$	\mathbf{B}/μ_0	\mathbf{B}/μ	$\mathbf{B}/\mu_0 \mu$	$\mathbf{B} c^2/\mu$

Обозначения в таблице:

k_e – размерный коэффициент в электрическом поле,

k_m – размерный коэффициент в магнитном поле,

c – электромагнитная постоянная,

Q – полеобразующий заряд,

q – полевой заряд,

\mathbf{e}_r – орт радиус-вектора,

\mathbf{F} – сила взаимодействия зарядов,

\mathbf{v} – скорость движения заряженной системы,

\mathbf{p}_e – электрический момент диэлектрика,

\mathbf{p}_m – магнитный момент магнетика,

V – объём вещества,

χ – абсолютная диэлектрическая восприимчивость,

κ – относительная магнитная восприимчивость,

ϵ – относительная электрическая проницаемость,

μ – относительная магнитная проницаемость.

Примечание к таблице: Определяющие уравнения для напряженности \mathbf{H} указаны для того случая, когда вещество является ферромагнетиком.

Рассмотрим основные выводы, вытекающие из сравнения определяющих уравнений напряженностей.

5. Размерные коэффициенты или физические постоянные?

Еще в 1785 г. в законе Кулона появился коэффициент пропорциональности k , зависящий от свойств эфира и от системы единиц, который стали называть **размерным коэффициентом** (хотя правильнее было бы говорить о размерностном коэффициенте). Другой размерный коэффициент появился в 1820 г. в законе Био-Савара-Лапласа. Эти два коэффициента, обозначенные впоследствии символами ϵ_0 и μ_0 , стали называть **диэлектрической и магнитной проницаемостями** вещества. Их стали называть

физическими константами, однако от этого они не перестали быть размерными коэффициентами в уравнениях для определения силы взаимодействия зарядов. Дж.Максвелл в 1860-1865 г.г. обнаружил, что произведение этих размерных коэффициентов связано с фазовой скоростью распространения электромагнитных волн с уравнением $c = 1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$.

В 1870-1881 г.г. физики пользовались системами СГСЭ и СГСМ, созданными отдельно для электрических величин (при предположении $\epsilon_0 = 1$) и магнитных величин (при предположении $\mu_0 = 1$). Затем их объединили в смешанную систему единиц СГС (при предположении $\epsilon_0 = \mu_0 = 1$), в которой уравнение Максвелла уже не соблюдается, что является серьезным недостатком системы СГС. Поэтому в СГС очень часты совпадения размерностей разнородных величин [1]. Это очень серьезный недостаток СГС, как бы не любили эту систему единиц физики-теоретики. И это одна из причин, по которой СГС была заменена на СИ. Но и в СИ хоть и редко, но тоже встречаются совпадения размерностей разнородных величин, правда, по другим причинам. Систематизация физических величин такой недостаток не приемлет, и в системе величин ЭСВП этого недостатка нет.

После рационализации единиц по О.Хевисайду в первой половине XX века появилась система единиц МКСА, в которой ϵ_0 и μ_0 умножались на $(1/4\pi)$, и размерные коэффициенты стали равными $(1/4\pi\epsilon_0)$ и $(\mu_0/4\pi)$. Система МКСА плавно перешла во второй половине XX века в систему СИ с такими же размерными коэффициентами. В системе СИ значение μ_0 задается, и по нему определяется значение ϵ_0 , что противоречит принципу причинности.

В системе величин ЭСВП значения ϵ_0 и μ_0 соответствуют их значению в системе единиц СГСЭ, в частности, $\epsilon_0 = 1$ с размерностью, равной 1. Именно такая размерность приводит к тому, что размерность потока вектора напряженности электростатического поля оказывается равной размерности статического заряда, что и требует теорема Гаусса. Другие размерности ϵ_0 к такому выводу не приводят. И тогда в соответствии с уравнением Максвелла μ_0 становится равным $(1/c^2)$ с размерностью, равной $L^{-2}T^2$. При этом μ_0 определяется по ϵ_0 , именно такая последовательность соблюдает принцип причинности.

6. Что соответствует принципу причинности при определении напряженностей в физическом вакууме?

Напряженности поля **E** и **B** не зависят от силы взаимодействия **F**, поскольку напряженность поля заряженной системы существует независимо от того, присутствует ли в создаваемом ею поле другая заряженная система. Поэтому уравнения типа **E** = **F**/*q* или типа **B** = **F**/(*q*[[**v***e*_r]]) (нижние строки в таблице) не включены в систему величин ЭСВП, как не соответствующие принципу причинности. Приходится с сожалением констатировать, что базирующиеся на этих уравнениях выводы не соответствуют принципу причинности в современной методологии электромагнетизма.

Принципу причинности соответствуют лишь уравнения типа **F** = *q***E** или типа **F** = [[*Q*[[**v***e*_r]]]**B**], в которых сила взаимодействия зависит от напряженности поля. Поэтому напряженность поля должна определяться уравнениями типа **E** = *f*(**Q***e*_r, *r*) или уравнениями типа **B** = *f*([[*Q***v**]*e*_r], *r*), записанными в верхних строках таблицы.

7. О сути рационализации систем единиц

Система СИ отличается от семейства систем СГС наличием множителя 4π в определяющих уравнениях для напряженностей, ее называют рационализованной системой единиц. Имеется множитель 4π и в системе величин ЭСВП. Но он необходим не ради рационализации записи уравнений, как предполагал ее автор О.Хевисайд. Этот множитель необходим потому, что отражает обратную пропорциональность напряженности поля не квадрату радиуса эквипотенциальной поверхности *r*, а ее площади $4\pi r^2$. В частности, именно по этой причине выражение (\mathbf{r}/r^3) в законах Ньютона и Кулона

следует заменять на равное ему выражение (e_r / r^2) и говорить не о законе обратных квадратов, а о законе обратных площадей.

8. Напряженности поля в веществе

Напряженности поля связанных зарядов в веществе \mathbf{P} (поляризованность) и \mathbf{M} (намагниченность) записаны в таблице в двух строках: в верхних строках – как суммируемые по объему электрический и магнитный моменты, и в нижних строках – как функции от напряженностей поля в физическом вакууме, то есть в окружающей вещество среде, с учетом абсолютной диэлектрической восприимчивости вещества χ и относительной магнитной восприимчивости вещества κ .

Определяющие уравнения для поляризованности $\mathbf{P} = f(\mathbf{E})$ и для намагниченности $\mathbf{M} = f(\mathbf{B})$ в системе величин ЭСВП отличаются от уравнений в системах единиц тем, что в ЭСВП отсутствует множитель 4π и размерные коэффициенты ϵ_0 и μ_0 .

Напряженности поля сторонних зарядов \mathbf{D} (электрическое смещение) и \mathbf{H} (напряженность магнитного поля) записаны в таблице также в двух строках: в верхних строках – как функции от напряженностей поля связанных зарядов, и в нижних строках – как функции от напряженностей поля в физическом вакууме с учетом размерных коэффициентов ϵ_0 и μ_0 .

Определяющие уравнения для электрического смещения $\mathbf{D} = f(\mathbf{E}, \mathbf{P})$ и для напряженности магнитного поля $\mathbf{H} = f(\mathbf{B}, \mathbf{M})$ отличаются в системе величин ЭСВП от уравнений в системах единиц тем, что в ЭСВП отсутствует множитель 4π и размерные коэффициенты ϵ_0 и μ_0 . Последние заменены относительной электрической проницаемостью ϵ и относительной магнитной проницаемостью μ вещества.

9. Заключение

Авторы монографии [1] так характеризуют системы единиц электромагнетизма, они *"обладают единством, которое выражается в том, что размерность любой из электрических и магнитных величин одинакова во всех системах. Это сохранение (инвариантность) размерности, однако, маскируется различием ее формальных выражений, обусловленным разным выбором основных единиц, а в некоторых системах – и некорректностью их построения"*. В системе величин ЭСВП эти недостатки устранены.

Система величин ЭСВП естественным образом вводит размерности и единицы для напряженностей гравитационного поля, отсутствующие или неверно указанные в системах единиц.

Это означает, по крайней мере, что при преподавании физики и электротехники пришла пора указывать размерности и единицы напряженностей поля параллельно и в системе единиц, и в системе величин. Как это делается сейчас в учебниках по физике (например, в [12]) в отношении напряженностей поля, которые указываются параллельно в системе СИ и в системе СГС.

Литература

1. Власов А.Д., Мурин Б.П., Единицы физических величин в науке и технике. – М., Энергоатомиздат, 1990, 176 с.
2. Чертов А.Г., Физические величины. – М.: Высшая школа, 1990, 336 с.
3. Коган И.Ш., О возможном принципе систематизации физических величин. – Законодательная и прикладная метрология, 1998, **5**, с.с 30-43.
4. Коган И.Ш., Физические величины (Обобщение и систематизация) . – 2008. – <http://physicalsystems.narod.ru/index.html>.
5. Коган И.Ш., Природа размерностей и классификация физических величин. – Законодательная и прикладная метрология, 2011, **4**, с.с 40-50.
6. Коган И.Ш., Системы величин не должны зависеть от систем единиц. –

- “Мир измерений”, 2012, **7**, с.с. 46-50.
7. Томилин К.А. Фундаментальные физические постоянные в историческом и методологическом аспектах. – М.: Физматлит. – 2006. – 368 с.
 8. Коган И.Ш., Размерность и единица статического заряда. – 2008. – <http://physicalsystems.narod.ru/index07.04.9.0.1.html>.
 9. Коган И.Ш., Метрологические проблемы, связанные с понятием «масса». – Законодательная и прикладная метрология, 2013, **2**, с.с. 37-43.
 10. Коган И.Ш., Система величин на основе длины L и времени T: Pro et Contra Законодательная и прикладная метрология, 2012, **3**, с.с. 50-57.
 11. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М., Фейнмановские лекции по физике, в 9 томах. – М.: “Мир”, 1965 - 1977
 12. Савельев И.В., Курс общей физики (в 5 книгах). – М.: АСТ: Астрель, 2005