

Альтернативный путь к Новой СИ

(Часть 2. О необходимости изменения набора основных величин)

Аннотация. Рассматривается идея М.Планка о создании естественной системы единиц для всех времен и любых цивилизаций. Рассмотрено необходимое и достаточное количество естественных основных величин для реализации этой идеи, в их число входят энергия и угол поворота. Обосновано утверждение о том, что масса и электрический заряд могут быть включены в набор основных величин лишь условно. Показано, что килограмм является мерой только гравитации, а под так называемой "инертной массой" подразумевается линейная инертность при прямолинейном движении, которая имеет другую единицу. Приведена классификация зарядов физического поля и установлены их размерности и единицы. Указано на принципиальное различие между потенциалом физического поля, потенциалом системы и разностью потенциалов системы, и в этой связи пересмотрены их размерности и единицы. Пересмотрены размерности и единицы напряженностей разных форм физического поля.

1. Естественные и условные основные величины и единицы.

1.1. В чем особенность естественных основных величин и основных единиц.

Идея создания систем единиц, зависящих только от фундаментальных физических констант (ФФК) и не зависящих от измерительных эталонов (артефактов), возникла еще в XIX веке. История возникновения этой идеи подробно описана в работе [1], в ней указано, что существование ФФК *"открывает возможность перехода от произвольных мер к абсолютным мерам Природы, т.е. к мерам, имеющим абсолютную собственную точность"*. Первым предложил две "универсальные системы единиц" в 1870 и 1873 г.г. Дж.Максвелл, а первую естественную систему единиц, основанную только на ФФК, предложил в 1874 г. Дж.Стони. В настоящее время *"развитие метрологии можно описать как переход от измерения фундаментальных постоянных к измерению фундаментальными постоянными"* [1].

Наиболее популярной в XX веке оказалась **естественная система единиц М.Планка**, предложенная в 1897 г. и базировавшаяся на постоянной Планка h , электродинамической постоянной c , гравитационной постоянной G и постоянной Больцмана k . Постоянные h и k были введены самим М.Планком. Кроме нее известны **система атомных единиц Хартри**, в которой основными являются единицы электрического заряда, массы и углового момента электрона, и **система релятивистских единиц**, где вместо единицы электрического заряда фигурирует единица скорости света.

Цель создания естественных систем единиц предельно четко описана самим М.Планком [2], она заключается в том, чтобы естественные единицы *"сохраняли своё значение для всех времен и для всех культур, в том числе, и внеземных, и нечеловеческих"*.

В настоящий период метрологическая общественность нацелена на переопределение основных единиц СИ на базе ФФК. Однако единицы ФФК привязаны к

основным единицам СИ, установленным на Земле, в том числе, и к условно принятым основным единицам. А это уже не совпадает с целью, провозглашенной М.Планком.

К.Томилин [1, п. 3.4.12] приходит к выводу, что "*единую естественную систему единиц лучше записывать в виде $(c, \hbar, E_0, e, \kappa)$, где E_0 – некоторый фундаментальный масштаб энергии*". Там же в таблице 3.4.1 указаны 4 варианта этого *фундаментального масштаба энергии*. Все они помещены автором таблицы в колонку "Единица массы", так как во всех созданных до сих пор естественных системах единиц основной единицей являлась единица массы электрона. Это подтверждает обоснованность изложенного в данной статье предложения о создании **естественной системы величин**, в которой энергия станет естественной основной величиной, а масса, как производная величина, сохранится в наборе основных величин в качестве "условно принятой".

1.2. Как влияет на идею Планка различие между размерностями и единицами.

Главный недостаток существующих естественных систем единиц состоит в том, что гравитационная постоянная G является не ФФК, а размерным коэффициентом в законе всемирного тяготения Ньютона. Истинным размерным коэффициентом в этом законе является не G , а $\gamma_0 = 4\pi G$ (см. раздел 3.5). При расчете планковских величин применяется не постоянная Планка h , а редуцированная постоянная Планка $\hbar = h/2\pi$, получившая распространение при использовании в физике математического метода векторных диаграмм. Так что существующие естественные системы единиц привязаны всё же к нашему времени и к нашей земной науке.

Даже если в будущем основные единицы будут базироваться не только на атомах, но и на элементарных частицах, как предлагается в работе [4], всё равно это будет земной подход, так как любая другая "внеземная" цивилизация сможет взять за основу другие атомы и другие элементарные частицы. Размерности же не нуждаются в наличии измерительных эталонов, даже если это будут размерности ФФК. В этом коренное преимущество размерностей перед единицами и оправдание существования размерностей.

Конечно, символы размерностей естественных основных величин, установленные на Земле, не будут совпадать с символами "внеземных" основных величин, но набор естественных основных величин совпадать должен, и уравнения связи совпадать тоже должны. Поэтому идея М.Планка о создании системы "внеземных" единиц должна быть истолкована как идея создания системы "внеземных" величин, поскольку единицы привязаны к размерностям, а не наоборот.

В то же время необходимо помнить, что и размерности, и единицы не отражают физическое содержание величин, хотя такое утверждение еще нередко случается встретить. Физическое содержание величины определяется только уравнением связи, в котором могут присутствовать и безразмерные величины, и числа, и логарифмические и тригонометрические функции, и операции сложения и вычитания. Поэтому широко используемый на практике анализ размерностей является необходимым, но далеко не достаточным критерием правильности уравнения связи. Все попытки сравнивать величины на основании их размерностей должны быть признаны не обоснованными. Например, закон излучения Рэлея-Джонса после введения в него М.Планком безразмерного множителя в виде разности экспоненциальной функции и числа 1 стал соответствовать опытным данным и уберек физику от "ультрафиолетовой катастрофы".

Играет отрицательную роль также недостаточное внимание к курсу метрологии при обучении физиков и инженеров. Очень многие специалисты даже высокого уровня не осознают различие в сущности понятий размерность и единица.

1.3. О необходимом и достаточном числе естественных основных величин.

В статье [5] предложено различать естественные и условно принятые основные величины, содержание этой статьи излагается. В статье представлен вариант структуры **системы величин** с пятью естественными основными величинами и одной условно принятой основной величиной. Схема этого варианта представлена на рис. 1.

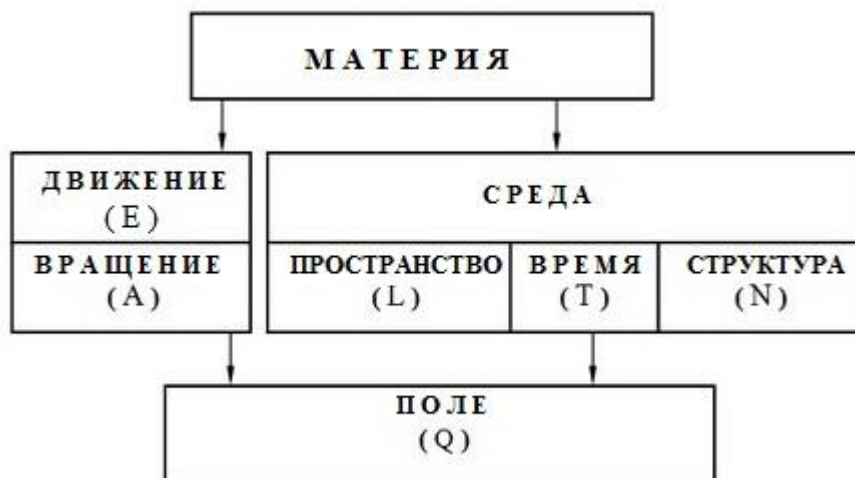


Рис. 1 Схема естественной системы величин

Естественные основные величины должны характеризовать категории, входящие в понятие "материя": **движение** материи, характер движения (**вращение**), **пространство**, в котором движется материя, **время**, определяющее темп движения, и **структуру** среды, в которой движется материя. Это и отражено на схеме. В круглых скобках указаны предлагаемые символы размерностей естественных основных величин.

В схему на рис. 1 добавлена еще одна категория: физическое **поле**. Оно характеризуется **зарядом** – производной величиной, принятой условно в качестве основной величины. Основная причина условного введения в систему величин размерности заряда Q – желание избежать дробных степеней у показателей размерностей и единиц. Принимаемая в течение почти двух веков в качестве основной величины **масса** является частным случаем заряда в гравитационном поле.

Движение является главным свойством материи, следствием неоднородности ее распределения в пространстве. На основании определения понятия "величина" [6, п.1.1] можно сделать вывод, что **движение** – это физическая величина. А с учетом необходимости учитывать векторный характер физических величин [7] можно сделать вывод, что **движение** – это векторная величина. Количественно движение, как физическая векторная величина, определяется своим модулем, каковым и является **энергия**. Поэтому символом размерности движения (и, естественно, энергии) принята буква E. К выводу о том, что энергия есть следствие неоднородности, пришел ранее И.Львов [8, п. 3].

Движение материи по своей природе является **вращением**, характеризуемым углом поворота, для размерности которого предложена буква A [3]. Собственное вращение отдельного материального объекта и направление вращения характеризуются его угловым моментом.

Прямолинейное движение является частным случаем движения объекта по криволинейной орбите при радиусе траектории, стремящемся к бесконечности [3]. В этом случае движение характеризуется линейным **перемещением**, для символа размерности которого существует буква L, а направление движения характеризуется импульсом.

Темп движения определяется **временем**, для символа размерности которого существует буква T.

Движение может осуществляться только в **среде**, состоящей из структурных элементов этой среды, для размерности числа которых предложена буква N [3].

Все величины, в размерность которых входит в первой степени размерность заряда физического поля Q (масса или электрический заряд), являются **величинами первого порядка**. В соответствии с законом всемирного тяготения Ньютона и законом Кулона все естественные основные величины являются **величинами второго порядка**. Если заряд поля не ввести в систему величин в качестве условной основной величины, то все размерности величин второго порядка будут иметь в формулах размерности дробные показатели степени с числом 2 в знаменателе (см. раздел 3.5). Именно поэтому в системе единиц СГС все электромагнитные величины имели дробные показатели степени размерностей. Некоторые ученые даже называли дробные показатели степени неестественными, но это не так. Они неудобные, но вполне естественные.

Предлагаемый набор естественных основных величин уже сейчас может решить несколько существующих в метрологии проблем [8]. Во-первых, исчезает мучающее метрологов равенство размерностей и единиц энергии и вращающего момента [9, п. 4.6], размерность вращающего момента становится равной EA^{-1} с единицей Дж об⁻¹, в отличие от единицы энергии джоуль. Во-вторых, единицы электромагнитных величин начинают соответствовать их размерностям, то есть перестают вводить в заблуждение [10] (см. раздел 2.3). Становится понятным, что заблуждение возникает не из-за того, что размерности и единицы электромагнитных величин в существующей СИ зрительно не соответствуют друг другу, а из-за того, что в системе величин ISQ отсутствуют размерности и единицы энергии и электрического заряда.

Что касается таких основных величин в ISQ, как термодинамическая температура, количество вещества и сила света, то это типичные условные основные величины. О массе же поговорим отдельно и подробно в разделе 2.

1.4. Каковы перспективы изменения набора основных величин.

Надеждам на то, что введение энергии в качестве естественной основной величины и замена электрического тока электрическим зарядом в качестве условной основной величины произойдет при предстоящем переопределении основных единиц СИ, сбыться в ближайшем будущем, скорее всего, не суждено.

В статье архитекторов переопределения единиц [9] сказано так: "*... общая структура существующей СИ, – т.е. современные основные величины СИ и их единицы – должны остаться неизменными. Причина заключается в том, что эти величины и единицы считаются удовлетворяющими современные и будущие потребности как метрологического, так и научного сообществ, и признаны и понятны огромному большинству пользователей СИ в мире. Ясно, что такое допущение исключает рассмотрение глобальной реструктуризации СИ, например, замещение массы энергией в качестве основной величины и превращение массы в производную величину, что привело бы к джоулю как основной единице, а килограмму как производной единице, или замещение электрического тока зарядом в качестве основной величины и превращение электрического тока в производную величину, что привело бы к кулону как основной единице, а амперу как производной единице.*" Данная точка зрения получила подтверждение в резолюции [11].

Как видим, самое важное препятствие к переходу на обновленную СИ по мнению авторов цитаты психологическое. К единице килограмм все привыкли, а к единице джоуль, как к основной единице, – нет. Но килограмм предлагается не заменять, как основную единицу, а по-новому трактовать. И дело также не в привычности килограмма как единицы массы. К единице силы ньютон до сих пор не привыкло "огромное большинство пользователей СИ в мире", оно не знает о существовании единицы ньютон и использует в быту единицу веса килограмм-сила, опуская слово сила и не подозревая при этом, что килограмм – это единица массы. Это большинство даже не заметит переопределения единиц.

Интересно, что метрологическое сообщество, как показано в разделе 2.3, предпочитает применять в электромагнетизме не единицы величин, соответствующие размерностям в существующей СИ, а те единицы, которые соответствуют размерностям при условии, что энергия введена в качестве основной величины. Не говоря уже о том, что по общему признанию и физиков, и метрологов, замещение электрическим током электрического заряда в качестве условной основной величины противоречит принципу причинности.

Нет сложности и при определении единицы энергии джоуль. Ее можно определить таким же образом, как предлагается сейчас определить килограмм, то есть "посредством фиксированного численного значения постоянной Планка, равной точно $6,6260693 \times 10^{-34}$, на основании выражения единицы СИ Дж с".

Можно выразить сомнение и в том, что единицы СИ удовлетворяют современным и, тем более, будущим потребностям научного и метрологического сообщества. Для перехода к действительно Новой СИ необходима как раз та "глобальная реструктуризация СИ", о которой и говорится в приведенной цитате. А вот сохранение существующего положения дел так и оставит нерешенным целый ряд проблем, описанных в работах [8,12]. И это означает, что в таком случае к их решению придется возвращаться в недалеком будущем.

2. Что такое масса?

Этим вопросом задаются уже несколько веков, и ответа на этот вопрос, удовлетворяющего если не всех, то большинство физиков и метрологов, пока нет. И это несмотря на две фундаментальные работы М.Джеммера [13] и Л.Окуня [14], после ознакомления с которыми, казалось бы, нет повода возвращаться к этому вопросу, разве что с точки зрения истории его развития [15]. Но недавно появилась работа В.Эткина [16], по-новому осветившая этот вопрос.

Мы рассмотрим метрологический аспект этой проблемы в связи с предстоящим переопределением единицы массы килограмм [11].

2.1. Применяемая по отношению к массе терминология

К термину "масса" в физике имеется много дополняющих слов: инертная масса, гравитационная масса, активная и пассивная массы, релятивистская масса, продольная и поперечная массы, масса покоя, электромагнитная масса. Но речь идет не о различных видах массы, а об одной и той же физической величине, которую еще И.Ньютон определил как количество вещества.

С точки зрения метрологии важно разобраться с терминами "инертная масса" и "гравитационная масса". В статье Д.Роша [15] сказано, что "А.Эйнштейн запустил в жизнь термины "инертная масса" и "гравитационная масса" с 1907 года". В этот период физика стала переходить от ньютоновой механики и принципа относительности Галилея (при скоростях тел $v \ll c$) к релятивистской механике (при $v \rightarrow c$). Но Л.Окунь [14] разъясняет, что "масса тела в ньютоновой механике и масса того же тела в релятивистской механике – это одна и та же величина". И понятия "инертная масса" и "гравитационная масса" применяются в его статье будучи заключенными в кавычки.

В данной статье мы будем говорить о массе, присутствующей в законе всемирного тяготения Ньютона и обозначаемой буквой m . В то же время следует выяснить, что определяет инертность тела при его прямолинейном движении и часто именуется "инертной массой". Именно это до сих пор влияет на определение размерности и единицы массы.

2.2. Что подразумевается под "инертной массой"?

Под "инертной массой" тела обычно подразумевается так называемая "линейная инертность" тела [15] при его прямолинейном движении.

Понятие "инертность системы" раскрывается в теории автоматического регулирования. В этой теории **уравнение переходного процесса** от одного равновесного состояния системы к другому выглядит в виде линейного дифференциального уравнения второго порядка с постоянными коэффициентами. Это уравнение связывает ступенчатое изменение входного сигнала $x(t)$ (воздействия на систему) с изменением выходного сигнала $y(t)$ (противодействия системы). В упрощенном виде это уравнение выглядит так:

$$a_0 y(t) + a_1 (dy/dt) + a_2 (d^2y/dt^2) = x(t) . \quad (2.1)$$

Запишем это уравнение в виде:

$$Dq_{fl} + R dq_{fl}/dt + I d^2q_{fl}/dt^2 = - \Delta P . \quad (2.2)$$

В уравнении (2.2) $\Delta P(t)$ – входной сигнал $x(t)$ в виде **разности потенциалов** между системой и окружающей ее средой; $q_{fl}(t)$ – выходной сигнал $y(t)$ в виде **перемещающейся координаты состояния** системы (индекс fl от слова flowing – текущий). Разность потенциалов $\Delta P(t)$ и перемещение координаты состояния $q_{fl}(t)$ являются векторными величинами, поскольку они определяются направлением движения энергоносителей при энергообмене: из среды в систему или в обратном направлении.

D , R и I – постоянные коэффициенты (параметры системы), соответствующие a_0 , a_1 и a_2 . В физике уравнение типа (2.1) применяется также как уравнение вынужденных затухающих колебаний, в котором параметры системы имеют другой вид, другое содержание и другие названия.

Термин "потенциал" имеет много различных значений. В данном случае под **потенциалом системы** для i -ой формы движения понимается скалярная величина, определяемая в термодинамике уравнением

$$P_i = \partial U / \partial q_i . \quad (2.3)$$

Содержание потенциала системы определяется как изменение внутренней энергии системы ∂U , отнесенное к изменению координаты состояния i -ой формы движения системы ∂q_i (при инвариантности относительно других форм движения). Потенциал системы P является функцией состояния системы. Он имеет иное физическое содержание, чем **потенциал поля** $\varphi(\mathbf{r})$, о котором говорится в разделе 4.1.

В отличие от потенциала P **разность потенциалов** $\Delta P(t)$ является функцией процесса изменения состояния системы при ее взаимодействии с окружающей средой.

Параметры системы из уравнения (2.1) называют так: D – **жесткость** системы (обратная величина $C = 1/D$ – **ёмкость** или **упругость** системы); R – диссипативное сопротивление системы (**резистивность**); I – **инертность** системы. Все величины уравнения (2.1) различны при прямолинейной и вращательной формах движения, в которых разность потенциалов $\Delta P(t)$ может принимать форму силы или вращающего момента. Поэтому инертность системы I может быть **линейной** или **вращательной**.

Для прямолинейного движения тела, при котором q_i соответствует линейному перемещению x , уравнение (2.2) записывается в виде:

$$Dx + Rv + Ia = F_D + F_R + F_I = - F , \quad (2.4)$$

где F – разность воздействующей на тело силы и суммы сил противодействия тела. Жесткость D определяет силу упругого противодействия $F_D = Dx$, сопротивление R

определяет силу внешнего трения $\mathbf{F}_R = R\mathbf{v}$ при движении со скоростью $\mathbf{v} = dx/dt$ и линейная инертность I определяет силу инерции тела $\mathbf{F}_I = I\mathbf{a}$ при ускорении $\mathbf{a} = d^2\mathbf{x}/dt^2$.

Линейную инертность I и называют обычно "инертной массой" [15].

Линейная инертность I имеет в существующей СИ размерность массы M и единицу килограмм. При обновлении набора основных величин СИ линейная инертность будет иметь, исходя из анализа размерностей уравнения (2.4), размерность $EL^{-2}T^2$ и единицу Дж $c^2 m^{-2}$.

Добавим важные замечания из работы [14]: *"Если попытаться определить как "инертную массу" отношение силы к ускорению, то эта величина в теории относительности зависит от взаимного направления силы и скорости, и потому однозначным образом ее определить нельзя. ... Масса релятивистски движущегося тела не является мерой его инертности. Более того, единой меры инертности для релятивистски движущихся тел вообще не существует, поскольку сопротивление тела ускоряющей его силе зависит от угла между силой и скоростью".*

Во втором законе Ньютона $d\mathbf{p}/dt = \mathbf{F}$ присутствует импульс \mathbf{p} . Однако массу m в выражении $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$ нельзя отождествлять с линейной инертностью I из уравнения (2.4), ибо линейная инертность I определяется в уравнении (2.4) выражением

$$I = F_I/a. \quad (2.5)$$

Модуль силы инерции $F_I \neq F$, так как при рассмотрении только силы инерции \mathbf{F}_I следует учитывать две остальные силы противодействия (\mathbf{F}_D и \mathbf{F}_R).

Сейчас равенство размерностей единиц массы m и линейной инертности I основывается на *принципе эквивалентности гравитационной и инертной масс*. Этот принцип опирается на предположение, что единица килограмм характеризует оба вида массы. Однако, во-первых, принцип эквивалентности масс при скоростях $v \rightarrow c$ не оправдывается. Во-вторых, эквивалентность не означает равенство. В работе [15], например, говорится о равенстве отношений "инертных масс" и "гравитационных масс" двух тел, а не о равенстве их самих.

Приведем мнения некоторых физиков, отрицающих принцип эквивалентности масс. В работе [17] указывается на то, что *"во всех экспериментах, проведенных на Земле по проверке принципа эквивалентности, все внешние влияния намеренно тщательно исключаются"*. В работе [18] рассматривается ситуация, при которой принцип эквивалентности масс входит в конфликт с законом сохранения энергии. Показано, что отношение гравитационной массы m фотона к его инертной массе m_{in} равно $k_m = m/m_{in} = 2\sin\varphi$, где φ – угол между направлением силы гравитационного взаимодействия и ее проекцией на плоскость, перпендикулярную силовым линиям гравитационного поля. Макроскопические тела анизотропны, и поэтому для них числовое значение k_m практически равно 1. Поэтому и оправдываются расчеты траекторий планет по законам Кеплера и справедливы результаты экспериментов, подтверждающие справедливость принципа эквивалентности масс, но только в макромире.

В работе [19] указывается на прямую аналогию между линейной инертностью в уравнении колебаний в механике и индуктивностью в уравнении колебаний в электродинамике. Но ведь никому не приходит в голову утверждать на этом основании, что существует принцип эквивалентности электрического заряда (аналога массы m , как заряда гравитационного поля) и индуктивности электрической цепи (аналога линейной инертности I).

Сказанное подтверждает мнения о том, что понятие "инертная масса" не совпадает по содержанию с понятием "линейная инертность". Если исключить из физики понятие "инертная масса", то исчезнет смысл в дискуссии по поводу того, эквивалентна ли "инертная масса" "гравитационной массе", да и само понятие "гравитационная масса" тоже станет излишним. К тому же, Л.Окунь [14] подчеркивает, что *"для релятивистского*

тела понятие гравитационной массы неприменимо", поскольку значение массы зависит от взаимного направления векторов силы и скорости релятивистской частицы. Поэтому для релятивистского тела линейная инертность имеет два компонента: вдоль направления движения и перпендикулярно к этому направлению.

При исключении из физики понятия "инертная масса" станет ясно, что проводившиеся эксперименты с целью подтверждения равенства "гравитационной массы" и "инертной массы" в условиях Земли при скорости тел $v \ll c$, оказались излишними, так как они лишь подтвердили равенство друг другу в макромире одной и той же величины – массы m . Что касается погрешности этих экспериментов, доведенной до 10^{-13} , то это погрешность экспериментальной установки.

2.3. Размерности и единицы параметров уравнения переходного процесса

Вернемся к уравнению связи для разности потенциалов системы (2.2). В существующей СИ его размерности в гравитодинамике $\dim P_i = L^2 T^{-2}$ с единицей $m^2 c^{-2}$ и в электродинамике $\dim P_i = L^2 M T^{-3} I^{-1}$ с единицей $m^2 kg^{-1} A^{-1}$. В обновленной СИ эта размерность выглядела бы проще: $\dim P_i = EQ^{-1}$, что соответствовало бы в гравитодинамике единице Дж kg^{-1} и в электродинамике единице Дж Кл $^{-1}$.

2.3.1. Размерность разности потенциалов ΔP равна размерности самого потенциала P_i , то есть $\dim \Delta P = \dim P_i$. Анализ размерностей первого слагаемого в левой части уравнения (2.2) в существующей СИ приводит к размерности динамической жесткости тела D в теории колебаний, равной MT^{-2} и соответствующей единице $kg\ c^{-2}$. В обновленной СИ это соответствовало бы размерности EL^{-2} с единицей Дж m^{-2} , равной применяемой на практике для этого случая единице Н m^{-1} .

В электродинамике вместо жесткости D применяют обратную ей величину, называемую электрической ёмкостью C . В существующей СИ размерность электрической ёмкости равна $L^{-2} M^{-1} T^4 I^2$, чему соответствует единица $m^{-2} kg^{-1} c^4 A^2$, которая совсем не похожа на применяемую единицу фарад, равную $\Phi = Кл\ В^{-1}$. На практике электрическую ёмкость определяют отношением заряда обкладки конденсатора к разности потенциалов поля между обкладками, $C = Q/\Delta\phi$, что и приводит к единице Кл $В^{-1}$. В обновленной СИ единица электрической ёмкости соответствовала бы размерности $E^{-1} Q^2$ с единицей Дж $^{-1}$ Кл 2 , которая легко пересчитывается в Кл $В^{-1}$, так как $1\ Дж = 1\ Кл\ В$.

Существует в теории электрического поля и другой вариант, когда ёмкость определяют по уравнению $C = 4\pi R\epsilon_0$, в соответствии с которым размерность электрической ёмкости C становится равной L , что соответствует единице метр. Такая единица применялась ранее для ёмкости в СГСЭ. Но в этом случае динамическая жесткость D должна иметь в СГСЭ размерность, равную L^{-1} с недопустимой единицей m^{-1} (обратный метр). Подобная ситуация в этом варианте устраняется, если учесть, что заряд тела Q состоит из какого-то количества N_Q элементарных зарядов q_e , то есть $Q = N_Q q_e$. И тогда уравнение $C = 4\pi R\epsilon_0$ должно быть заменено уравнением $C = 4\pi R\epsilon_0/N_Q$. При применении размерности N_Q , равной N , размерность ёмкости C станет равной LN^{-1} с единицей $m\ кв^{-1}$ (метр на квант), а размерность жесткости D будет равной $L^{-1}N$ с единицей $кв\ м^{-1}$ (квант на метр), где под квантом подразумевается один элементарный заряд. Такие единицы имеют следующее физическое содержание: электрическая ёмкость C указывает на длину поверхности заряженного тела, на которой укладывается определенное число элементарных зарядов, а динамическая жесткость D – на количество элементарных зарядов, приходящееся на единицу длины поверхности заряженного тела.

2.3.2. Анализ размерностей второго слагаемого в левой части уравнения (2.2) в существующей СИ приводит в механической прямолинейной форме движения к размерности сопротивления внешнего трения R , равной MT^{-1} с единицей $kg\ c^{-1}$. На

практике применяют единицу $\text{Н м}^{-1} \text{с}$. В обновленной СИ это соответствовало бы размерности $\text{ЕЛ}^{-2}\text{Т с}$ единицей Дж м⁻² с, как раз равной $\text{Н м}^{-1} \text{с}$.

В электродинамике анализ размерностей второго слагаемого приводит к размерности электрического активного сопротивления, равной $\text{Л}^2\text{МТ}^{-3}\text{Г}^{-2}$, которой соответствует единица $\text{м}^2 \text{кг с}^{-3} \text{А}^{-2}$. Такая единица очень неудобна, и в СИ в качестве единицы активного сопротивления принята единица Ом. Но она приравнивается к единице В А^{-1} (Вольт на Ампер), полученной из другого уравнения связи (из закона Ома в виде $R = U/I$). Ранее применение закона Ома в системе СГСЭ приводило к размерности, равной $\text{Л}^{-1}\text{Т с}$ единицей $\text{м}^{-1} \text{с}$. В обновленной СИ у электрического активного сопротивления была бы размерность ЕТQ^{-2} с единицей Дж с Кл⁻², легко пересчитываемой в единицу В А^{-1} .

2.3.3. О третьем слагаемом в левой части уравнения (2.2) (инертности I) в механике уже было рассказано в разделе 2.2, ему посвящен раздел 2.4.

В электродинамике инертность I называют **индуктивностью** и обозначают символом L . Размерность индуктивности L в существующей СИ равна $\text{Л}^2\text{МТ}^{-2}\text{Г}^{-2}$, чему соответствует неудобная в применении единица $\text{м}^2 \text{кг с}^{-4} \text{А}^{-2}$. В метрологии пользуются единицей Гн (Генри), равной Вб А^{-1} (Вебер на Ампер). Но в существующей СИ индуктивность определяют по уравнению связи $L = \Psi/i$, где Ψ – потокосцепление (сумма магнитных потоков токовых контуров). Применение этого уравнения связи ранее в системе СГСЭ приводило к размерности, равной $\text{Л}^{-1}\text{Т}^2$ с единицей $\text{м}^{-1} \text{с}^2$. В обновленной СИ у индуктивности была бы размерность $\text{ЕТ}^2\text{Q}^{-2}$ с единицей Дж с² Кл⁻², равной также единице $\text{В с}^2 \text{Кл}^{-1}$. В этой единице уже нет не нужной для электродинамики единицы массы кг.

Таким образом, из анализа размерностей уравнения (2.2) следует, что метрологи-практики не желают пользоваться в электромагнетизме единицами, вытекающими из размерностей существующей СИ, а предпочитают пользоваться единицами из той СИ, которую следовало бы обновить. Им в размерностях электромагнитных величин нужна размерность электрического заряда, а не размерность массы.

2.4. Каково уравнение связи для линейной инертности?

Ответ на этот вопрос приведен в статье В.Эткина [16]. Автор обращает внимание на то, что согласно теории необратимых процессов в зависимости между силой и скоростью должен быть добавлен нелинейный "феноменологический" коэффициент пропорциональности R_i , подлежащий экспериментальному определению. В частности, во второй закон Ньютона должен быть включен коэффициент $R_a(\mathbf{v})$, и поэтому второй закон Ньютона должен иметь вид

$$R_a \, d\mathbf{p}/dt = \mathbf{F}_a. \quad (2.6)$$

Заметим, что ускоряющая сила \mathbf{F}_a (обозначение и термин автора) равна по модулю и противоположна по знаку силе инерции \mathbf{F}_I . Подставляя в уравнение (2.6) вместо \mathbf{F}_a силу инерции $\mathbf{F}_I = I\mathbf{a}$ из уравнения (2.5) и раскрывая $d\mathbf{p}/dt$ как $m\mathbf{a}$, приходим к уравнению

$$I = R_a m. \quad (2.7)$$

Проанализировав уравнение (2.6), В.Эткин находит, что в нем "единицы измерения физических величин выбраны таким образом, чтобы коэффициент R_a был равен единице, и в случае его постоянства просто мог быть опущен" и что "масса m , играющая в выражении $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$ роль меры количества вещества, не имеет никакого отношения к

коэффициенту R_a как мере его инертности". Масса m является функцией состояния, в то время как коэффициент R_a является функцией процесса (функцией скорости \mathbf{v}).

По мнению В.Эткина зависимость $R_a = f(\mathbf{v})$ пока еще неизвестна, и множитель $R_a(\mathbf{v})$ отличается от множителя Лоренца $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$, применяемого в релятивистской механике. Поскольку при $v \rightarrow c$ никакая сила не может вызвать рост ускорения, то приращение импульса $d\mathbf{p}/dt \rightarrow 0$, а R_a стремится возрасти до бесконечности. "Это и наблюдается в ускорителях элементарных частиц, что в СТО ошибочно приписывается возрастанию массы" [16].

Подобная трактовка линейной инертности I приводит к важным следствиям в метрологии. Поскольку в существующей СИ нет различия между размерностями массы m и линейной инертности I , то коэффициент $R_a = I/m$ имеет размерность 1. Но в обновленной СИ линейная инертность I должна иметь иную размерность, нежели масса m , и поэтому коэффициент R_a должен иметь размерность, отличную от 1. И эта размерность должна остаться у R_a и при $v \ll c$, когда его числовое значение как угодно близко к 1. Размерность коэффициента R_a после анализа размерностей уравнения (2.7) становится равной $\text{E L}^{-2} \text{T}^2 \text{Q}^{-1}$ с единицей Дж м⁻² с² кг⁻¹.

2.5. Единицей чего является килограмм?

В метрологии измерительным эталоном массы является пока прототип массы или измерительное устройство, в котором массу измеряют взвешиванием. Сама единица килограмм первоначально был введена в 1799 году как единица веса. Метрологи измеряют массу тела в той точке гравитационного поля Земли, где расположен прототип килограмма или токовые весы (ватт-весы). Это свидетельствует о том, что на сегодняшний день килограмм является мерой только гравитации. Линейная инертность I имеет в существующей СИ единицу Дж с² м⁻², которая не соответствует единице килограмм, как мере гравитации.

В существующей СИ единица килограмм установлена произвольно. Размерность силы \mathbf{F} , равная LMT^{-2} , и единица силы 1 ньютон = 1 кг м с⁻² устанавливаются на основании анализа размерностей уравнения $\mathbf{a} = \mathbf{F}_I / I$ (2.5) без учета того, что равенство линейной инертности I и массы m не доказано.

Масса является только мерой гравитации. Следовательно, из закона всемирного тяготения следует, что единица массы зависит от единицы силы взаимодействия масс (силы тяготения) и от единицы расстояния между взаимодействующими массами. Поэтому единица массы килограмм – это производная единица. но она может быть принята в качестве основной единицы условно.

Относительно определения килограмма существуют две точки зрения, условно называемые "электрический килограмм" и "атомный килограмм" [20]. Первый определяется по постоянной Планка, второй – по постоянной Авогадро. Сторонники "атомного килограмма" упрекают сторонников "электрического килограмма" в том, что постоянная Планка трудна для восприятия в школе, но постоянная Авогадро не намного проще и, к тому же, должна быть заменена числом Авогадро [3].

По нашему мнению, всё упирается не в методику обучения, а в стоимость процесса измерения (по кремниевым шарам или с помощью ватт-весов). Кроме того, методика обучения должна не диктовать науке, как ей совершенствоваться, а подстраиваться под прогресс науки.

2.6. О взаимосвязи массы и энергии.

В XX веке в связи с приобретшим важное значение понятием "дефект массы" укрепилось мнение, что "масса может выступать как мера освобожденной или поглощенной энергии" [13]. В той же работе выдвинуто предложение рассматривать величину под названием "массэргия". Впрочем, еще в 1905 г. А.Эйнштейн [21] пришел к выводу: "Масса тела есть мера содержащейся в нем энергии". Л.Окунь [14] уточняет:

"...масса частицы является мерой энергии, "спящей" в покоящейся частице, мерой энергии покоя".

Но тогда возникает вопрос: нельзя ли считать важнейшим свойством элементарных частиц их энергию покоя E_0 , а не их массу m ? Нельзя ли массу считать всего лишь множителем между E_0 и c^2 в знаменитой формуле $E_0 = mc^2$? Ведь в релятивистской механике массу элементарных частиц измеряют единицей энергии электрон-вольт, а не единицей массы килограмм. Единица массы электрона m_e является сомножителем единицы энергии в основных типах атомных естественных систем единиц [1, п. 3.4.10]. Так что и с этой точки зрения в качестве естественной основной величины должна выступать энергия.

Конечно, создать измерительный эталон энергии – задача чрезвычайно сложная, но при определении единицы энергии с помощью постоянной Планка это и не требуется.

2.7. Размерности и единицы импульса силы и импульса тела.

Слово "импульс" присутствует в названиях двух величин: "импульс силы" и "импульс тела". У указанных величин в существующей СИ одинаковые размерности, но единицы различны, потому что они определяются по разным уравнениям связи.

Импульс силы \mathbf{S} – частный случай импульса разности потенциалов ΔP (см. раздел 2.2) при прямолинейной форме движения, когда в роли ΔP выступает сила \mathbf{F} . Он определяется уравнением связи $\mathbf{S} = \int \mathbf{F} dt$. В существующей СИ размерность \mathbf{S} равна ЛМТ^{-1} , но единица равна Н с, то есть единица импульса силы не соответствует его размерности. При обновлении СИ размерность \mathbf{S} будет равна $\text{ЕЛ}^{-1}\text{Т}$ с единицей, равной Дж м^{-1} с, то есть полностью соответствующей размерности.

Импульс тела имеет уравнение связи $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$. В существующей СИ размерность \mathbf{p} та же, что у \mathbf{S} , то есть равна ЛМТ^{-1} , но в данном случае единица импульса тела в СИ соответствует его размерности, то есть равна кг м с $^{-1}$. При обновлении СИ размерность \mathbf{p} будет равна ЛQT^{-1} , что совпадет с единицей кг м с $^{-1}$. В результате импульс силы и импульс тела будут иметь разные размерности, что и соответствует их различному содержанию.

У импульса силы и импульса тела различны не только уравнения связи, размерности и единицы, но могут и не совпадать значения. Действительно, импульсом \mathbf{p} обладает любое движущееся тело, в том числе, если тело движется по инерции. Но к такому телу нельзя применить понятие "импульс силы", поскольку сила \mathbf{F} отсутствует. Импульс силы \mathbf{S} появляется лишь после приложения к телу силы. При этом приращение импульса силы $d\mathbf{S}$ преобразуется в равное по значению приращение импульса тела $d\mathbf{p}$. И то только в том случае, если тело не деформируемо и отсутствует диссипация энергии при внешнем трении.

При столкновении двух движущихся неупругих тел изменение импульса одного тела $d\mathbf{p}_1$ преобразуется в импульс силы $d\mathbf{S}$, который приводит к изменению импульса другого тела $d\mathbf{p}_2$. Импульс силы \mathbf{S} может появляться и исчезать, а импульс тела \mathbf{p} – постоянно существующая характеристика движущегося тела.

3. О размерностях и единицах зарядов физического поля

3.1. Заряд тела – физический объект или физическая величина?

В связи с оживленной дискуссией по поводу переопределения единиц электрического заряда и электрического тока становится актуальным уточнение самих понятий "заряд" и "ток зарядов".

Общепринятого определения заряда тела нами не обнаружено. Имеется, например, определение: "Заряд – физическая величина, являющаяся источником поля, посредством которого осуществляется взаимодействие частиц, обладающих этой характеристикой", в котором заряд определяется и как величина, и как объект (источник поля). Однако

физическая величина является свойством физического объекта, то есть понятием, подчиненным по отношению к объекту. Чтобы устранить подобную двусмысленность, источник поля следует называть **заряженной системой** или **заряженным телом**, а **заряд тела** считать физической величиной. Далее при применении слова "заряд" будем иметь в виду "заряд тела", а не "заряженное тело". В электродинамике вместо термина "электрический заряд" встречается устаревший термин "количество электричества", который применять не рекомендуется.

Заряд тела следует определять как сумму **элементарных зарядов**. Слово "элементарный" в выражении "элементарный заряд" следует понимать не как бесконечно малый, а как неделимый, минимально возможный заряд, который не может быть разделен на части, не потеряв при этом своего физического содержания. Например, элементарными зарядами электромагнитного поля являются электроны и позитроны, а в гравитационном поле ими являются атомы, молекулы и т.п. физические объекты, из которых состоят тела в макромире. Термин "элементарный заряд" правильнее бы звучал как "единичный заряд", но заменять термин "элементарный заряд" было бы не рационально ввиду его распространенности.

Таким образом, **заряд тела** равен произведению элементарного заряда на количество элементарных зарядов, имеющее размерность количества объектов [3]. Поэтому у заряда тела и у элементарного заряда размерности и единицы должны быть разные, что будет показано в разделе 3.5. В существующей СИ различия между единицей заряда тела и единицей элементарного заряда нет, так как количество объектов в СИ пока не имеет единицы.

3.2. Уточненная терминология зарядов физического поля

В современной физике терминология зарядов физического поля не упорядочена. По этой причине определение их размерностей и единиц представляет определенную сложность. Приведем ту терминологию, которой мы будем придерживаться. Она в равной степени будет относиться к зарядам и электромагнитного, и гравитационного поля.

Если значение одного из двух зарядов взаимодействующих заряженных тел существенно больше, чем значение другого, то первый из них будем называть **полеобразующим зарядом**, а второй – **полевым зарядом**. С точки зрения взаимодействия они равноправны. Полеобразующий заряд будем обозначать символом Q , а полевой заряд – символом q .

В современной физике, если полевой заряд условно сосредоточен в точке, его называют **точечным зарядом**, иными словами, зарядом материальной точки. Точечный заряд, условно не искажающий поле, называют **пробным зарядом**. Эти термины отражают математические абстракции и поэтому нами не применяются.

Заряд тела, создающий центральное поле, логично назвать **статическим зарядом**. Статический заряд поля является скалярной величиной.

Элементарные заряды, движущиеся вместе с заряженным телом или движущиеся относительно неподвижного проводящего тела внутри него, образуют другие два вида заряда, создающие вихревое поле. Эти два вида заряда логично назвать **динамическими зарядами** и обозначать символами Q или q , поскольку это векторные величины.

Один из видов динамического заряда (элементарные заряды неподвижны относительно движущегося прямолинейно заряженного тела) называют в электродинамике **движущимся зарядом**, его обозначают Qv или qv , где v – скорость движения заряженного тела. Другой вид динамического заряда (элементарные заряды перемещаются через неподвижное проводящее тело) назовем **токовым зарядом**. Это понятие новое, и его следует разъяснить.

Уравнение связи для электрического тока сейчас записывается в электродинамике как $i = dq/dt$, в котором dq – количество электричества, переносимое через сечение проводника за интервал времени dt . Выражение (dq/dt) применимо для заряженного тела,

в котором изменяется общее количество элементарных зарядов q , это выражение характеризует скорость изменения количества зарядов в теле, но не движение элементарных зарядов через проводник. При движении элементарных зарядов в проводнике количество зарядов, входящих в проводник, равно количеству зарядов, выходящих из проводника, вследствие чего количество элементарных зарядов в проводнике q не изменяется, то есть в проводнике $dq/dt = 0$.

В проводнике следует рассматривать какое-то количество текущих по нему зарядов q_{fl} . Векторная величина $\mathbf{q}_{fl} = (q_{fl} \mathbf{v})$ является движущимся зарядом. **Линейная плотность** этого движущегося заряда \mathbf{q}_{fl} / l , где l – длина прямолинейного участка проводника, обозначаемая как \mathbf{i}_{fl} , и является **током зарядов**. В электродинамике \mathbf{i}_{fl} соответствует электрическому току \mathbf{i} , из чего следует, что электрический ток является векторной величиной и не равен скалярному выражению (dq/dt) .

Токовый заряд в электродинамике можно определить формулами $\mathbf{Q} = \mathbf{I}l$ или $\mathbf{q} = \mathbf{i}l$. Аналогичная скалярная величина в виде выражения (il) под названием "токовый элемент" была ранее предложена А.Чуевым [22].

В законе Био-Савара-Лапласа в виде $d\mathbf{B} = k i [d\mathbf{l} \mathbf{r}] / r^3$ элементарный токовый заряд $(i dl)$ присутствует в формуле неявно и не заключается в скобки. Векторный характер магнитной индукции $d\mathbf{B}$ определяется векторным произведением элементарной длины $d\mathbf{l}$ на радиус-вектор \mathbf{r} . Но элементарная длина $d\mathbf{l}$ не является векторной величиной, она как неподвижный дорожный знак на шоссе, по которому движутся автомобили. Поэтому правильна такая запись закона Био-Савара-Лапласа: $d\mathbf{B} = k [(i dl) \mathbf{r}] / r^3$.

Аналогично и при записи закона Ампера в виде $d\mathbf{F} = i [d\mathbf{l} \mathbf{B}]$, когда векторный характер силы взаимодействия $d\mathbf{F}$ определяется векторным произведением элементарной длины $d\mathbf{l}$ на вектор магнитной индукции \mathbf{B} . Правильна запись закона Ампера в виде $d\mathbf{F} = [(i dl) \mathbf{B}]$.

Движущийся заряд $(q\mathbf{v})$ и токовый заряд $(i l)$ имеют разное физическое содержание при одной и той же размерности. Оба вида динамического заряда создают вихревое поле, но движущийся заряд движется вместе с созданным заряженным телом центральным полем, а неподвижный проводник, внутри которого движется ток зарядов, центрального поля не создает. В обновленной СИ размерности движущегося и токового зарядов одинаковы и равны $LT^{-1}Q$ с единицей $m \text{ c}^{-1} \text{ kg}$ в гравитационном поле и единицей $m \text{ c}^{-1} \text{ Кл}$ в электромагнитном поле. И движущийся заряд $(q\mathbf{v})$, и токовый заряд $(i l)$ являются самостоятельными физическими величинами, поэтому выносить за скобки любой из сомножителей нельзя, не утратив при этом физического содержания этих величин. В качестве примера приведем физическую величину количество движения $(m\mathbf{v})$.

Синонимом понятия "токовый заряд" является **магнитный заряд**. Чтобы не смущать тех, кто считает, что магнитных зарядов не существует, поясним, что токовые заряды существуют только в замкнутом токовом контуре, в котором токовый заряд одного знака в одной из ветвей контура уравнивается токовым зарядом другого знака в противоположной ветви контура. Поэтому суммарный токовый заряд замкнутого контура (магнитный заряд контура) всегда равен нулю. Суммарный заряд, но не элементарный.

3.3. Заряд поля – это производная физическая величина.

Законы, определяющие силы взаимодействия заряженных тел по значениям их зарядов, рассматриваются как опытные законы. И поэтому в уравнения связи для выравнивания размерностей неизбежно включаются **размерные коэффициенты**. В электродинамике ими являются электрическая постоянная ϵ_0 и магнитная постоянная μ_0 , а в гравитационике – гравитационная постоянная G (иногда обозначаемая как γ). Эти "постоянные" не являются ФФК, как их иногда трактуют, они имеют только метрологическое содержание.

Раньше при применении системы единиц СГС заряды тел определялись по силе их взаимодействия, то есть противоположно тому, как это делается сейчас. Но в СГС

проблемой являлось наличие дробных степеней в показателях размерностей и единиц электрических и магнитных величин. В СИ от дробных степеней избавились ценой введения электрического тока в качестве условной основной величины. В этом смысле ничего не изменится и после переопределения единиц, если электрический ток в качестве условной основной величины будет заменен электрическим зарядом.

Энергия поля, окружающего заряженное тело, зависит от значения заряда тела. В свою очередь, значение заряда тела зависит от энергии, содержащейся в элементарных зарядах. Поэтому заряд поля – это величина, в размерность которой должна входить размерности энергии и количества элементарных зарядов. Следовательно, *заряд – это производная величина*.

Заряд поля должен быть включен в систему величин ISQ как условная основная величина с размерностью Q (см. раздел 1.3). Но в обновленной системе единиц у него могут быть две различные основные единицы (килограмм и кулон), которые устанавливаются произвольно. Их определение является предметом обсуждения, а их соотношение приводится в разделе 3.5.

3.4. О размерных коэффициентах в электромагнетизме.

Для того чтобы размерности и единицы электромагнитных величин не имели дробных показателей степеней, в уравнения связи введены размерные коэффициенты, которые неверно называются константами.

Еще в 1785 г. в законе Кулона появился коэффициент пропорциональности k , зависящий от свойств эфира и от системы единиц, который стали называть **размерным (размерностным) коэффициентом**. Другой размерный коэффициент появился в 1820 г. в законе Био-Савара-Лапласа. Эти два коэффициента, обозначенные впоследствии как ϵ_0 и μ_0 , стали называть **диэлектрической и магнитной проницаемостями** вещества и считать физическими константами. Дж.Максвелл в 1860-1865 г.г. нашел, что их произведение связано с фазовой скоростью распространения электромагнитных волн c 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 $\epsilon_0 = 1$) и магнитных величин (при $\mu_0 = 1$). Затем их объединили в смешанную систему единиц СГС (при $\epsilon_0 = \mu_0 = 1$), в которой уравнение Максвелла $c = 1/\sqrt{(\epsilon_0 \mu_0)}$ уже не стало соблюдаться. Поэтому в СГС часты совпадения размерностей разнородных величин, это серьезный недостаток СГС и одна из причин, по которой СГС была заменена.

После рационализации единиц по О.Хевисайду в первой половине XX века появилась система единиц МКСА, в которой $1/\epsilon_0$ и μ_0 умножались на $(1/4\pi)$, и размерные коэффициенты стали равными $(1/4\pi\epsilon_0)$ и $(\mu_0/4\pi)$. МКСА перешла во второй половине XX века в СИ с теми же размерными коэффициентами.

Теорема Гаусса требует, чтобы размерность потока вектора напряженности электростатического поля была бы равной размерности статического заряда. Этому требованию соответствует $\epsilon_0 = 1$ с размерностью, равной 1. Другие размерности ϵ_0 к выполнению этого требования не приводят. И тогда в соответствии с уравнением Максвелла $\mu_0 = (1/c^2)$ с размерностью, равной $L^{-2}T^2$. Такие значения ϵ_0 и μ_0 ранее были в СГСЭ, в Новой СИ следовало бы к ним вернуться.

В существующей СИ ϵ_0 определяется по μ_0 , которая задана численно, но такая последовательность противоречит принципу причинности. Размерность ϵ_0 в существующей СИ равна $L^{-3}M^{-1}T^4I^2$, чему соответствует единица $m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$, а размерность μ_0 равна $L^2MT^{-2}I^2$, чему соответствует единица $m^2 kg s^{-2} A^2$. Не удивительно, что вместо таких неудобных и непонятных для электромагнетизма единиц в СИ принята для ϵ_0 единица $F m^{-1}$, а для μ_0 единица $Gn m^{-1}$.

Множитель $(1/4\pi)$, введенный О.Хевисайдом, по нашему мнению, необходим не ради рационализации записи уравнений связи, а потому, что он отражает обратную

пропорциональность напряженности поля площади эквипотенциальной поверхности $4\pi r^2$, а не обратную пропорциональность квадрату радиуса r^2 . Именно по этой причине часто применяющееся выражение (\mathbf{r}/r^3) в законах Ньютона и Кулона следует обязательно заменить на равное ему выражение (\mathbf{e}_r/r^2) , где \mathbf{e}_r – орт радиус-вектора, соединяющего центры взаимодействующих заряженных тел. И применять следует не понятие "закон обратных квадратов", а понятие "закон обратных площадей".

3.5. Размерности и единицы заряда тела и элементарного заряда.

Определяться размерности и единицы заряда тела и элементарного заряда должны в Новой СИ по закону всемирного тяготения Ньютона или по закону Кулона.

Запишем обобщенное уравнение для определения силы взаимодействия статических зарядов Q и q в центральном поле \mathbf{F}_f в виде

$$\mathbf{F}_f = k_f Q q \mathbf{e}_r / S_f = k_f N_Q N_q q_e^2 \mathbf{e}_r / S_f, \quad (3.1)$$

где k_f – размерный коэффициент центрального поля (соответствует в электродинамике $1/\varepsilon_0$); S_f – площадь эквипотенциальной поверхности центрального поля; q_e – элементарный заряд; N_Q и N_q – количества элементарных зарядов в полеобразующем и полевом заряженных телах; $Q = N_Q q_e$ – заряд полеобразующего тела; $q = N_q q_e$ – заряд тела в поле.

Уравнение для определения силы взаимодействия движущихся заряженных тел \mathbf{F}_c с движущимися зарядами $(Q\mathbf{v}_Q)$ и $(q\mathbf{v}_q)$, образующими вихревое поле, запишется в виде

$$\mathbf{F}_c = k_c [(Q\mathbf{v}_Q) (q\mathbf{v}_q)] / S_c = k_c N_Q N_q q_e^2 [\mathbf{v}_Q \mathbf{v}_q] / S_c, \quad (3.2)$$

где k_c – размерный коэффициент вихревого поля (соответствует в электродинамике μ_0); \mathbf{v}_Q и \mathbf{v}_q – скорости движущихся зарядов; S_c – площадь эквипотенциальной поверхности вихревого поля.

В современной физике отношение k_f/S_f из уравнения (3.1) расшифровывается в электродинамике не как $k_f/S_f = (1/\varepsilon_0)(1/4\pi r^2)$, а как $(1/4\pi\varepsilon_0)(1/r^2)$, то есть k_f записывается как $(1/4\pi\varepsilon_0)$ вместо $(1/\varepsilon_0)$. Вполне допустимая с точки зрения математики перестановка сомножителей приводит к неверному толкованию физического содержания закона Кулона. Точно так же отношение k_c/S_c из уравнения (3.2) расшифровывается не как $k_c/S_c = \mu_0(1/4\pi r^2)$, а как $(\mu_0/4\pi)(1/r^2)$, то есть k_c записывается как $(\mu_0/4\pi)$ вместо μ_0 . Это приводит к неверному толкованию физического содержания закона Кулона для магнитных масс в электротехнике и закона Ампера.

В гравитинамике дело обстоит хуже. В законе всемирного тяготения Ньютона вообще нет в знаменателе множителя 4π , так что о существовании эквипотенциальной поверхности гравитационного центрального поля и не догадаешься, если об этом не упомянуть при преподавании. Для того чтобы физическое содержание уравнения (3.1) стало понятным и в гравитинамике, следует ввести размерный коэффициент $k_f = (1/\gamma_0)$, аналогичный коэффициенту $(1/\varepsilon_0)$ в электрическом поле. Этот коэффициент $\gamma_0 = 1/(4\pi G)$, откуда $G = 1/(4\pi\gamma_0)$. (Введение множителя 4π в числовое значение G может привести к пересмотру численных значений планковских постоянных.) А в гравитинамическом вихревом поле должен появиться размерный коэффициент, соответствующий μ_0 в электродинамике.

В существующей СИ размерность заряда тела в электродинамике равна ТІ. Анализ размерностей уравнения (3.1) с учетом новых символов размерностей (E и N), с учетом размерности силы \mathbf{F}_f , равной EL^{-1} , и с учетом $\varepsilon_0 = 1$ приводит в обновленной СИ к **размерности заряда тела** $\dim q = E^{1/2}L^{1/2} = Q$ и к **размерности элементарного заряда** $\dim q_e = E^{1/2}L^{1/2}N^{-1} = QN^{-1}$. Анализ размерностей уравнения (3.2) при $\mu_0 = (1/c^2)$ приводит к тому же выводу.

Размерности элементарного заряда $E^{1/2}L^{1/2}N^{-1}$ соответствует единица Дж^{1/2} м^{1/2} шт⁻¹, где шт (штука) – единица количества объектов, в данном случае, количества элементарных зарядов. А размерности QN^{-1} соответствует единица Кл шт⁻¹ или кг шт⁻¹.

В работе [23] дано подробное обоснование необходимости введения в Новую СИ в качестве условной основной величины электрического заряда с определением "Кулон – электрический заряд, равный точному числу $1/(1,60217653 \times 10^{-19})$ элементарных зарядов и который взаимодействует в вакууме с равным ему зарядом на расстоянии 1 метра с силой $(299792458)^2 \times 10^{-7}$ ньютонов." Только в предлагаемом определении кулона единицу ньютон следует записать как Дж м⁻¹, чтобы подчеркнуть взаимосвязь единицы электрического заряда с единицами энергии и длины.

Соотношение значений единиц зарядов гравитационного и электрического полей (килограмма и кулона) в макромире можно рассчитать. Например, в работе [24] исходят из того, что масса и линейная инертность в макромире считаются одной и той же величиной, и на этом основании приравниваются сила притяжения и сила инерции. Из этого предположения вытекает, что масса имеет единицу м³ с⁻² и что $1 \text{ кг} = 8,385539 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3 \text{ с}^{-2}$. Такая же единица (м³ с⁻²) приписывается электрическому заряду, и по закону Ампера рассчитано, что $1 \text{ Кл} = 9,73175(4) \text{ м}^3/\text{с}^2$. Это приводит к такому равенству для макромира: $1 \text{ кг} = 8,61641199 \cdot 10^{-11} \text{ Кл}$.

4. При обновлении СИ должны измениться размерности и единицы полевых величин.

4.1. Размерности и единицы потенциалов физического поля.

Современное определение скалярного потенциала φ в какой-то точке поля, по которому определяется его размерность и единица, исходит из формулы $\varphi = W_p/q$, в которой W_p – потенциальная энергия взаимодействия пробного заряда q , помещенного в эту точку, с полем. Однако потенциал поля φ характеризует напряженное состояние полевой среды в точке, независимо от того, находится ли в этой точке какой-либо заряд. Поэтому формула $\varphi = W_p/q$ не соответствует принципу причинности. К тому же, она не учитывает значение полеобразующего заряда Q и расстояние r от центра полеобразующего заряда до указанной точки.

В векторном исчислении [25] **скалярный потенциал поля $\varphi(\mathbf{r})$** не имеет определяющего уравнения, а является аргументом векторной функции напряженности поля $\mathbf{E}(\mathbf{r})$, определяемой как $\mathbf{E}(\mathbf{r}) = -\text{grad } \varphi(\mathbf{r})$. Напряженность поля $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ определяется в физике значением полеобразующего заряда Q . Таким образом, уравнение связи для потенциала φ не будет совпадать с приведенным выше уравнением $\varphi = W_p/q$.

Попутно заметим, что потенциал поля φ – иная физическая величина по сравнению с потенциалом системы P , рассматривавшемся в разделе 2.2.

4.1.1. Потенциал центрального поля, созданного зарядом Q и равномерно распределенного по сферической эквипотенциальной поверхности площадью $S = 4\pi r^2$ равен [26, с.185]

$$\varphi = k_f Q r / S = k_f Q / 4\pi r . \quad (4.1)$$

В Новой СИ размерный коэффициент k_f должен быть равен 1 (см. раздел 3.4). Согласно уравнению (4.1) потенциал центрального поля зависит только от значений Q и r , размерность потенциала φ согласно уравнению (4.1) будет равна $L^{-1}Q$, что соответствует единицам Кл м⁻¹ в электродинамике или кг м⁻¹ в гравидинамике. Площадь эквипотенциальной поверхности может не быть сферической, но это не повлияет на размерность потенциала поля.

В существующей СИ размерность электрического потенциала равна $L^2MT^{-3}I^{-1}$, чему соответствует единица м² кг с⁻³ А⁻¹, но применяются совсем другие единицы (Дж Кл⁻¹ и В).

Единица Дж Кл⁻¹ вытекает из уравнения $\varphi = W_p/q$, о котором выше сказано, что оно не соответствует принципу причинности, и поэтому единица Дж Кл⁻¹ применяться не должна. Единица В (вольт) вытекает из уравнения $U = P/I$, где U – падение напряжения на участке электрической цепи, I – электрический ток, P – мощность. Однако ток I и мощность P отношения к потенциалу поля не имеют. Поэтому единица вольт тоже не должна применяться для потенциала поля. Таким образом, принятые в существующей СИ единицы потенциала электрического поля не соответствуют его физическому содержанию. Остается для применения только единица Кл м⁻¹.

4.1.2. Потенциал вихревого поля (векторный потенциал) обозначают символом \mathbf{A} . В векторном исчислении [25] **векторный потенциал \mathbf{A}** также не имеет определяющего уравнения, а является аргументом векторной функции напряженности вихревого поля (в электродинамике – магнитной индукции) \mathbf{B} , определяемой как $\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A}$.

Приведем для векторного потенциала уравнение, аналогичное (4.1). Для вихревого поля, образованного токовым зарядом $\mathbf{Q} = \mathbf{I}l$ (см. раздел 3.2), эквипотенциальной поверхностью является не сфера, а цилиндр с площадью боковой поверхности $S = 2\pi bl$, где b – радиус цилиндра и l – длина цилиндра. Поэтому можно записать уравнение

$$\mathbf{A} = k_c \mathbf{Q}b/S = k_c \mathbf{Q}/2\pi l, \quad (4.2)$$

В магнитном поле $k_c = \mu_0$. Так что уравнение (4.2) преобразуется в уравнение

$$\mathbf{A} = \mu_0 (\mathbf{I}l) / 2\pi l. \quad (4.3)$$

В соответствии с уравнением (4.3) размерность \mathbf{A} в существующей СИ должна быть равна $\text{LMT}^{-2}\text{I}^{-1}$, чему соответствует единица $\text{кг м с}^{-2} \text{А}^{-1}$. Но для электродинамики единица кг чужая, поэтому там принята для векторного потенциала единица $\text{Вб м}^{-1} = \text{Тл м}$. Остается сделать вывод, что введение единиц Вб (вебер) и Тл (Тесла) продиктовано не физическим содержанием векторного потенциала, а удобством записи. В обновленной СИ размерность \mathbf{A} должна быть равна L^{-2}TQ , чему в электродинамике соответствует единица $\text{Кл м}^{-2} \text{с}$, а в гравидинамике – единица $\text{кг м}^{-2} \text{с}$.

4.2. Размерности и единицы напряженностей в физическом поле.

При рассмотрении размерностей и единиц напряженностей поля в существующей СИ в различных формах физического поля не заметна какая-либо закономерность. Это объясняется тем, что исторически эти единицы постоянно менялись при переходе от одной системы единиц к другой. В качестве основных выбирались такие единицы, которые удобны для измерения и создания измерительных эталонов.

Формулы размерностей напряженностей поля в СИ базируются на комплекте размерностей MLTI. Покажем, что в Новой СИ можно будет ограничиться комплектом размерностей ELT или, при желании избавиться от дробных степеней в показателях размерностей, комплектом размерностей LTQ, учитывая, что $\dim \mathbf{Q} = \text{E}^{1/2}\text{L}^{1/2}$. Рассмотрим соответствующую таблицу (прочерк означает отсутствие в СИ необходимого символа, размерности и единицы для данной величины).

Таблица размерностей и единиц напряженностей физического поля

Форма физического поля	Вид среды	Напряжен-ность	Размерность и единица в СИ		Размерность и единица в обновленной СИ	
Гравистатическое	физический вакуум	G	LT^{-2}	м с^{-2}	L^{-2}Q	кг м^{-2}
Гравистатическое	внутри вещества	-	-	-	L^{-2}Q	кг м^{-2}

Электрическое	без учета среды	$\epsilon_0 \mathbf{E}$	$L^{-2} T I$	$Кл м^{-2}$	$L^{-2} Q$	$Кл м^{-2}$
Электрическое	физический вакуум	\mathbf{E}	$L M T^{-3} I^{-1}$	$\frac{Н Кл^{-1}}{В м^{-1}}$	$L^{-2} Q$	$Кл м^{-2}$
Электрическое	внутри вещества	\mathbf{P}	$L^{-2} T I$	$Кл м^{-2}$	$L^{-2} Q$	$Кл м^{-2}$
Электрическое	с учетом вещества	\mathbf{D}	$L^{-2} T I$	$Кл м^{-2}$	$L^{-2} Q$	$Кл м^{-2}$
Гравидинамическое	физический вакуум	-	-	-	$L^{-3} T Q$	$кг с м^{-3}$
Гравидинамическое	внутри вещества	-	-	-	$L^{-1} T^{-1} Q$	$кг м^{-1} с^{-1}$
Магнитное	без учета среды	\mathbf{B}/μ_0	$L^{-1} I$	$А м^{-1}$	$L^{-1} T^{-1} Q$	$Кл м^{-1} с^{-1}$
Магнитное	физический вакуум	\mathbf{B}	$M T^{-2} I^{-1}$	$Тл$	$L^{-3} T Q$	$Кл с м^{-3}$
Магнитное	внутри вещества	\mathbf{M}	$L^{-1} I$	$А м^{-1}$	$L^{-1} T^{-1} Q$	$Кл м^{-1} с^{-1}$
Магнитное	с учетом вещества	\mathbf{H}	$L^{-1} I$	$А м^{-1}$	$L^{-1} T^{-1} Q$	$Кл м^{-1} с^{-1}$

4.3. Выводы, вытекающие из таблицы напряженностей.

1. При обновлении СИ во всех размерностях напряженностей появится размерность Q . Соответственно, в каждой единице напряженности появится единица заряда. Сумма показателей степеней при размерностях L и T везде будет одна и та же и будет равна (-2) .

В существующей СИ равенство суммы показателей степеней при размерностях L и T числу (-2) наблюдается частично. Это не касается напряженностей в физическом вакууме, отчего у последних и единицы индивидуальные ($м с^{-2}$, $Н Кл^{-1}$, $В м^{-1}$, $Тл$, $Вб$), что создает впечатление хаотичности, особенно в электромагнетизме. Связано это с неправильным подбором значений размерных коэффициентов (электрической и магнитной постоянных, см. раздел 3.4). Размерности и единицы напряженности электрического поля в физическом вакууме в настоящее время необъективно отражают физическое содержание этой величины.

2. Устанавливая размерность и единицу напряженности \mathbf{G} гравистатического (гравитационного центрального) поля на основании уравнения для ускорения свободного падения $\mathbf{g} = \mathbf{F}/m$, а не на основании закона всемирного тяготения Ньютона, мы приходим к тому, что единицей напряженности \mathbf{G} становится единица ускорения свободного падения \mathbf{g} , равная $м с^{-2}$. Но в такой единице напряженности отсутствует единица энергии джоуль, хотя любое силовое поле обладает энергией. Единицей напряженности гравидинамического поля (гравитационного вихревого поля) после соответствующих расчетов по этой методике становится $с^{-1}$, в которой отсутствует даже единица длины.

Однако нельзя приравнивать единицу линейной инертности I и единицу массы m (см. раздел 2). И это приводит к двум важным следствиям. Во-первых, единица напряженности гравистатического поля перестает быть равной единице ускорения $м с^{-2}$. Во-вторых, лишается научной основы привлекая симпатии многих физиков так называемая кинематическая LT -система размерностей, основанная на приравнивании единиц линейной инертности I и массы m .

3. При рассмотрении напряженностей полей внутри вещества (поляризованности \mathbf{P} и намагниченности \mathbf{M}) и с учетом вещества (электрического смещения \mathbf{D} и напряженности магнитного поля \mathbf{H}) видно, что поля связанных и сторонних зарядов характеризуются напряженностями, не учитывающими свойства среды (физического вакуума). В физике не акцентируется на этом внимание, и понятие "**чистая**

напряженность" ($\epsilon_0\mathbf{E}$ или \mathbf{V}/μ_0) 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.

4. В электрическом поле совпадают размерности \mathbf{D} и $\epsilon_0\mathbf{E}$, а в магнитном поле – размерности \mathbf{H} и \mathbf{V}/μ_0 . Но напряженность магнитного поля \mathbf{H} – это 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} , а магнитную индукцию \mathbf{B} . Соответственно, в уравнении связи для вектора Пойнтинга должна присутствовать не \mathbf{H} , а \mathbf{B} , как это имеет место в фейнмановских лекциях по физике [27].

5. В Новую СИ естественным образом должны быть введены размерности и единицы для напряженностей гравитационного поля, отсутствующие сейчас в СИ.

6. Для облегчения психологических трудностей при переходе к новым размерностям и единицам напряженностей при преподавании физики и электротехники можно указывать размерности и единицы напряженностей поля параллельно в существующей СИ и в Новой СИ, подобно тому, как это делается сейчас в учебниках физики в отношении напряженностей поля, единицы которых указываются параллельно в СИ и в СГС.

5. Общие выводы

Общие выводы сделаем совместно по части 1 [3] и по настоящей части 2.

1. Предлагается введение в набор основных величин энергии и угла поворота. Отторжение понятия "энергия" массовым пользователем не предвидится ввиду того, что понятие "энергия" становится с каждым годом всё популярнее среди всех слоёв населения. А угол поворота давно уже просится занять стабильное место в метрологических документах.

2. Не предлагается ни одной новой и незнакомой основной единицы, за исключением единицы величины "количество объектов"; эта величина уже признается официально основной величиной [6], нет только общего согласия по поводу названия единицы этой величины.

3. Предлагается пересмотр статуса основных величин. Естественными основными величинами предлагается считать энергию, угол поворота, длину, время и количество объектов. Массу предлагается считать условно принятой основной величиной, а ее единицу считать единицей заряда гравитационного поля. Электрический ток, как условно принятую основную величину, предлагается заменить электрическим зарядом.

4. Предлагаемое введение новых символов для размерностей энергии, угла поворота и количества объектов, и последовательность расположения символов в формулах размерности нужно обсудить. Последовательность расположения символов размерностей принципиального значения с точки зрения метрологии не имеет, но это важно с точки зрения физики и философии.

5. Предлагается введение новых размерностей для новых основных величин, но не изменение уже имеющихся у них единиц. Подавляющее большинство пользователей СИ просто не заметит подобные изменения, поскольку не имеет представления о понятии "размерность" либо не различает понятия "размерность" и "единица", и потому никакого дискомфорта не ощутит.

6. Применение в обновленной СИ новых размерностей и единиц для жесткости, ёмкости, сопротивления и индуктивности приведет к таким единицам, которые и сейчас используются на практике вместо тех единиц, которые вытекают из размерностей в существующей СИ.

7. Предложение заменить радианную меру угла градусной мерой может не понравиться физикам, но метрологи пользуются на практике только градусной мерой. Физики же могут продолжать пользоваться радианной мерой, когда им это удобнее.

8. Введение единицы угла поворота в качестве основной единицы устранил такие не имеющие физического смысла единицы, как обратная секунда и обратный метр [3, п.4]. Возврат к определению моля с помощью числа Авогадро вместо постоянной Авогадро устранил такую не имеющую смысла единицу, как обратный моль [3, п.3].

9. Определение единицы энергии джоуль с помощью постоянной Планка потребует некоторого пересмотра школьных учебных программ. В частности, придется объяснять различие между непрерывностью и квантуемостью изменения физических величин. Но это ничуть не сложнее для психологии школьника, чем переход от арифметики к алгебре или изучение в старших классах тригонометрических функций и логарифмов. Изучать основы теории относительности для знакомства с постоянной Планка не обязательно, эта постоянная была введена М.Планком раньше, чем появилась теория относительности А.Эйнштейна.

10. В отдельных случаях используются термины, не применяемые или редко применяемые в современной физике (например, токовый заряд, гравистатическое и гравидинамическое поле, чистая напряженность). Но метрологи обязаны следить и за соответствием названий физических понятий их физическому содержанию.

11. Следует обсудить изменение единиц производных величин в электродинамике и гравидинамике. В качестве варианта возможного усовершенствования названий, обозначений, уравнений связи, размерностей и единиц в этих разделах физики предлагается взглянуть на Таблицу величин физического поля в существующей СИ [28] и аналогичную таблицу в предлагаемой обновленной СИ [29] и сравнить их.

12. Возможно, некоторые предложения несколько преждевременны. Но в наше время стремительного обновления науки и технологии следует готовиться к тому, что эти предложения станут на повестку дня в самом недалеком будущем.

Литература

- [1] Томилин К.А., 2006. Фундаментальные физические постоянные в историческом и методологическом аспектах. – М.: Физматлит. – 368 с
- [2] Планк М., 1975. Избранные труды. – М.: Наука.
- [3] Коган И.Ш., 2015. Альтернативный путь к Новой СИ. (Часть 1. О величинах с размерностью единица). *Законодательная и прикладная метрология*, **1**.
- [4] Chyla W.T., 2011. Evolution of the International Metric System of Units SI. *Acta Physica Polonica*, **120**, № 6, p.p. 998-1011
- [5] Коган И.Ш., 2009. Набор естественных основных величин. <http://physicalsystems.org/index03.1.16.1.html>
- [6] JCGM 200:2012. International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM), 3rd edition.
6. Коган И.Ш., 2012, Энергия как основная физическая величина. – *Законодательная и прикладная метрология*, **1**, с.с. 48-53.
- [7] Emerson W., 2014. The SI should not ignore the directional nature of vector quantities. *MetrologyBytes.net*. Opinion Directotias.
4. Львов И.Г., 2004, Что такое энергия? – <http://www.sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/6652.html>
- [8] Foster M.P., 2010. The next 50 years of the SI: a review of the opportunities for the e-Science age. Review Article. *Metrologia*, **47**, R41–R51

- [9] Mills I.M., Mohr P.J., Quinn T.J., Edwin R Williams E.R., 2006, Redefinition of the kilogram, ampere, kelvin and mole: a proposed approach to implementing CIPM recommendation 1 (CI-2005) . *Metrologia*, **43**, 227-246.
- [10] Emerson W.H., 2005. On the concept of dimension. *Metrologia*. **42**, L21–22
- [11] 24th meeting of the General Conference on Weights and Measures (2011). About future revision of the International System of Units, the SI.
- [12] Emerson W., 2012. Some Illogicalities of the SI. *MetrologyBytes.net*. Opinion Directotias.
- [13] M. Jammer, 1961, Concepts of mass in classical and modern physics. Harvard University press. Ambridge-Massachusetts. (Русский перевод)
- [14] Окунь Л.Б., 1989. Понятие массы (Масса, энергия, относительность). – М.: ”Успехи физических наук”, т. 158, вып.3, с.с.511-530
- [15] Roche J., 2005. What is mass? *Eur. J. Phys.*, **26**, 225–242
- [16] Эткин В.А., 2011. Изменяется ли масса со скоростью? – <http://sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/10904.html>
- [17] Репченко О. Н., 2006. Полевая физика или как устроен Мир? Изд. 2-е. М.: Галерия, 320 с., а также <http://www.fieldphysics.ru>
- [18] Зайцев О.В., 2002, Принцип эквивалентности и законы сохранения. – <http://www.sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/2910.html>
- [20] Трунов Г.М., 2009. Такой килограмм нам не нужен. *Мир измерений*. **8**. с.с. 20 –22
- [21] Einstein A., *Ann. d. Phys.*, 1905, Bd 18.
- [22] Чуев А.С., 2003. О существующих и теоретически возможных силовых законах, обнаруживаемых в системе физических величин. <http://www.sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/5811.html>
- [23] Трунов Г.М., 2009. Новый ампер? Нет, новый кулон. *Мир измерений*, **8**. с.с.23 - 25
- [24] Ерохин В.В., 2008. Абсолютная система физических единиц. http://vev50.narod.ru/LT_.doc
- [25] Бронштейн И.Н., Семендяев К.А., 1986. Справочник по математике. 13-е изд. – М.: Наука, Физматлит, 544 с.
- [26] Яворский Б.М., Детлаф А.А., 1990, Справочник по физике. 3-е изд. М.: Наука, Физматгиз, 624 с.
- [27] Feynman R.P., Leighton B.R., Sands M.. 1963. The Feynman Lectures On Physics. Addison. Wesley Publishing Company, INC.
- [28] Коган И.Ш., 2014. Таблица величин физического поля (в существующей СИ). – <http://physicalsystems.org/index05.03.index.html>
- [29] Коган И.Ш., 2014. Таблица величин физического поля (в обновленной СИ). – <http://physicalsystems.org/index05.03.index.ESQC.html>