

Природа размерности и классификация физических величин

Аннотация. Настоящая статья является продолжением статьи [1] о принципах выбора основных физических величин. Раскрывается суть дискуссии сторонников А.Зоммерфельда и М.Планка о природе размерности. Показано, что речь идет о различных аспектах систематизации важных понятий в метрологии. В этой связи подробно рассматривается различие между системами физических величин и системами единиц измерений. Указывается на неоднородность основных и производных величин и приводится их классификация.

1. Суть дискуссии о природе размерности

Дискуссия между сторонниками А.Зоммерфельда и М.Планка идет не только по поводу принципов выбора основных величин. По поводу понятия “размерность величины” также имеются два противоположных мнения. Вот как описана эта ситуация в статье [2]: *“Более ста лет продолжают споры о физическом смысле размерностей. Одна точка зрения – размерность выражает физическую связь между данной величиной и основными величинами системы. Вторая, противоположная, предполагает, что единственный смысл размерности – указание на то, как изменится единица данной величины при известном изменении единиц, принятых за основные”*.

Первую точку зрения отстаивал А.Зоммерфельд. Его точка зрения отражена в определении размерности, взятом из справочника [3]: *“Размерность физической величины – выражение в форме степенного одночлена, составленного из произведений символов основных физических величин в различных степенях и отражающее связь данной физической величины с физическими величинами, принятой в данной системе величин за основные, и с коэффициентом пропорциональности, равным единице”*. В этом определении нет ни слова о единицах. Ключевую роль играет выбор основных величин.

Вторую точку зрения отстаивал М.Планк [4], который считал, что *“размерность физической величины не есть свойство, связанное с существом ее, но представляет некоторую условность, определяемую выбором системы измерений”*. Л.Сена [5] придерживался мнения, согласно которому размерность относится вообще не к физической величине, а к ее единице. Эта же точка зрения изложена и в учебнике [6].

Автор [7] считает, что *“это мнение подтверждается зависимостью размерности от выбранной системы единиц”*, не упоминая о том, что такая зависимость установлена учеными, а не природой. Там же говорится, что размерностями можно пользоваться лишь до тех пор, пока они *“определены только в рамках соответствующих систем единиц”*. Но в этих рамках можно, в принципе, обходиться и без размерностей. Сам автор [7] отмечает в качестве недостатка систем единиц *“совпадение размерностей величин, имеющих различную физическую природу”*.

Согласно [8] единица сама по себе является физической величиной, и потому понятие “размерность” может относиться одновременно и к величине, и к ее единице. В [8] сказано: *“Каждой из основных величин приписывают (подчеркнуто нами – И.К.) свою особую, независимую от других размерность”*. Правда, в другом параграфе сказано иное: *“Пользование единицами СИ приводит к убеждению в том, что каждой физической величине присуща своя собственная неизменная размерность”*. Так и остается неясным, приписывают ли размерность физической величине люди, или она присуща каждой физической величине от природы. [1]

Интересно комментируется эта ситуация в работе [9]: *“В настоящее время считается, что спор решен в пользу Планка. Между тем в ГОСТе 16263-70, изданном в 1970 году и действующем поныне, указано, что размерность физической величины*

определяется как "выражение, отражающее связь величины с основными величинами системы, в котором коэффициент пропорциональности принят равным 1". Это позиция Зоммерфельда. Так что по существу вопрос о природе размерности остается открытым“.

2. Различие и общность во взглядах на природу размерности

Сторонники А.Зоммерфельда не увязывают размерности с единицами измерений, а сторонники М.Планка ставят выбор размерностей основных величин в зависимость от выбора системы единиц. В этом состоит различие их взглядов.

Сторонники А.Зоммерфельда говорят о физических величинах, **принятых** в данной системе величин за основные, а сторонники М.Планка говорят об **условности** выбора основных величин, определяемой выбором системы единиц. Таким образом, и те, и другие являются сторонниками **субъективности** по отношению к определению перечня основных физических величин. В этом состоит общность их взглядов.

Поэтому нет смысла противопоставлять их взгляды, ибо при этом можно искусственно приравнять размерности основных величин, установленные природой [1], к размерностям единиц основных величин, принятых людьми. При таком противопоставлении затушевывается необходимость выявления основных величин, данных нам Природой, в отличие от априорного субъективного выделения единиц основных величин, которые можно придумать какими угодно и какими удобно.

Различие во взглядах сторонников А.Зоммерфельда и М.Планка, по нашему мнению, менее важно по сравнению с общностью их взглядов. А именно эта общность взглядов и препятствует решению проблемы систематизации физических величин.

2. Ситуация с природой размерности с точки зрения системного подхода

Чтобы расставить приоритеты, необходимо воспользоваться системным подходом и выяснить, что от чего зависит, систематизация каких понятий и в какой последовательности приводит к созданию систем физических величин и систем их единиц. Такой подход приводит к необходимости создания иерархии уровней систематизации в физике. На рис. 1 представлен вариант такой иерархии.

Из приведенной схемы следует, что физические величины и их единицы находятся на самых нижних уровнях иерархии. И это естественно, так как физические величины – это свойства более крупных, иерархически более высоких уровней. Понятно, что релевантность систематизации физических величин зависит от релевантности систематизации более высоких уровней. После критического осмысления существующих принципов систематизации этих уровней автор пришел к выводу, что ряду из них необходима коррекция, результаты которой приведены в статьях [10–13].

В принципе, наличие размерности и единицы не является необходимым условием для систематизации физических величин. Размерность вытекает из уравнения, определяющего величину, и является вспомогательным средством для анализа правильности определяющего уравнения. Единицы же образуются после выяснения размерности, а не в обратном порядке, и выбираются они условно с точки зрения удобства и экономичности процесса измерения. Размерности одних и тех же величин должны быть одинаковыми на любой планете в любой звездной системе, тогда как единицы могут оказаться там какими угодно и, конечно же, не похожими на наши земные. Поэтому на схеме иерархии систематизация величин находится на более высоком уровне, чем унификация единиц.

Применение термина “унификация единиц“ вместо термина “систематизация единиц“ не случайно. Это вытекает из условности выбора основных величин при создании любой системы единиц. Условность выбора не соответствует системному подходу.

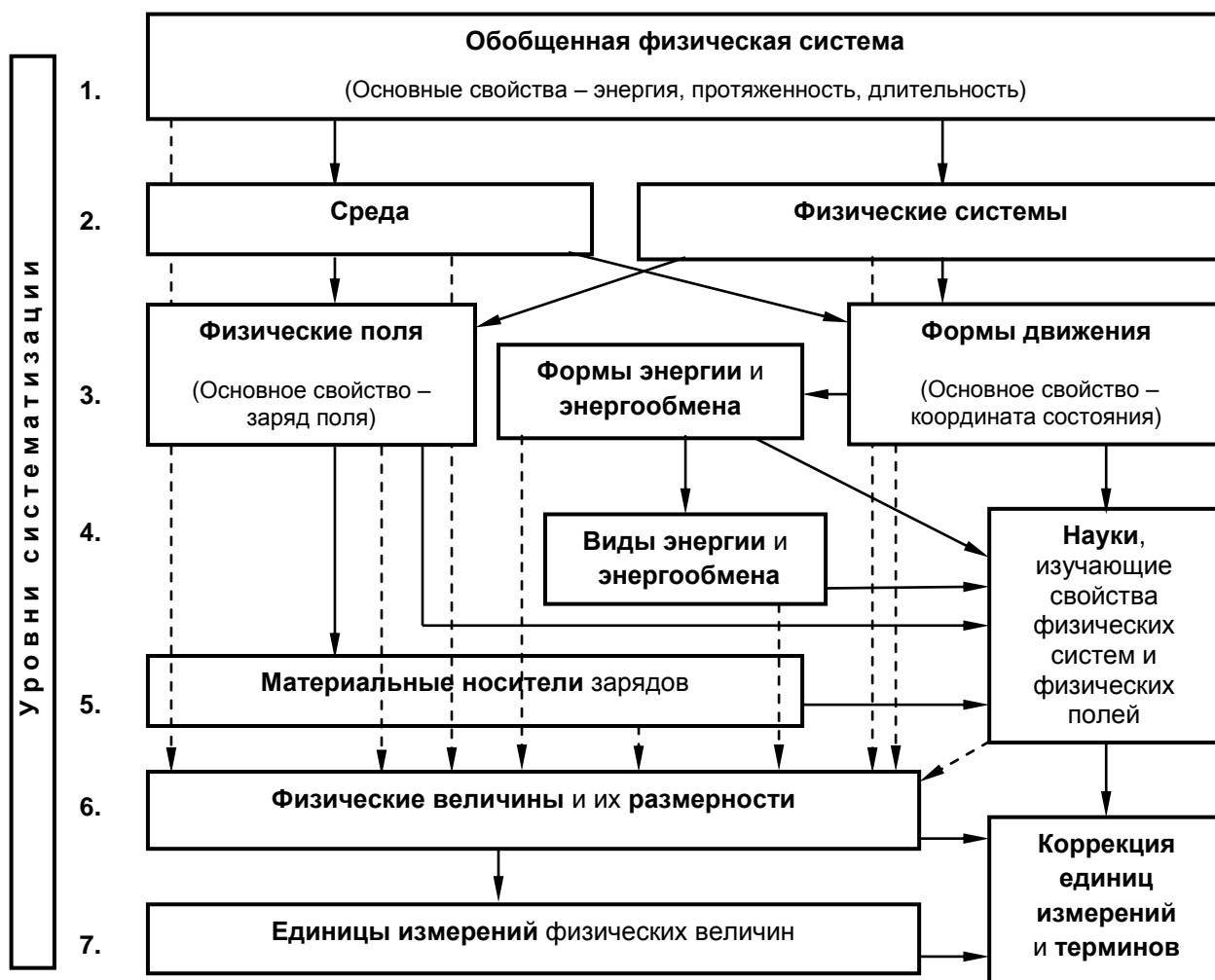


Рис. 1 Иерархия уровней систематизации в физике

3. Системы физических величин и системы единиц – принципиально несравнимые понятия

Название заголовка вытекает непосредственно из результатов системного анализа. Однако читатели, знакомящиеся с системами физических величин, обычно сравнивают мысленно системы величин с Международной системой единиц СИ, и их первый вопрос часто бывает таков: "Зачем нужны системы величин, если уже есть СИ?". Ответ обычно не выслушивается, так спрашивающие убеждены в том, что ответ кроется в самом вопросе.

Однако сравнивать разные системы величин, обзор которых приведен в статье [14], резонно только друг с другом, а не с системами единиц. Поэтому, начиная знакомиться с любой системой величин любого автора, следует настроить себя на то, что это не система единиц.

Согласно [3] "*Система единиц физических величин (система единиц) – совокупность основных и производных единиц физических величин, образованная в соответствии с принятыми принципами для заданной системы физических величин*". Иерархическая последовательность в приведенной цитате выражена достаточно четко. Система единиц является следствием заданной системы величин, а не наоборот. Только нет в цитате ответа на вопрос: системы величин надо задавать или выявлять.

Развернутый ответ автора на вопрос "Зачем нужны системы величин, если уже есть СИ?" приведен в Таблице сравнения.

Таблица сравнения систем физических величин и систем единиц

	СИСТЕМЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН (СФВ)	СИСТЕМЫ ЕДИНИЦ ИЗМЕРЕНИЙ (СЕИ)
Зачем нужны эти системы?	Для систематизации физических закономерностей, представляющих собой уравнения связи между физическими величинами.	Для унификации единиц измерений в международном масштабе.
Какая польза от этих систем?	<ol style="list-style-type: none"> 1. Установление обобщенных закономерностей в природе и на их основе частных закономерностей в различных научных направлениях. 2. Устранение разобщенности в символике и определениях в разных разделах физики и в различных технических дисциплинах. 3. Облегчение процесса преподавания физики и технических дисциплин и процесса усвоения учебного материала. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Обеспечение единства измерений. 2. Устранение возможных препон для общения ученых и инженеров различных специальностей. 3. Возможность легкого сравнения результатов научных экспериментов. 4. Облегчение торговли и, как следствие, создание условий для роста экономики.
Влияют ли СФВ и СЕИ друг на друга?	<ol style="list-style-type: none"> 1. СФВ предлагают изменение отдельных терминов, символов и индексов в СЕИ. 2. СФВ указывают на желательность корректировки ряда единиц в СЕИ. 	СЕИ в принципе не должны влиять на СФВ, но по чисто психологическим причинам мешают их внедрению в науку и педагогику.
Препятствуют ли СФВ и СЕИ друг другу?	СФВ не препятствуют развитию СЕИ, у них другие цели и задачи.	СЕИ не должны препятствовать развитию СФВ, но по чисто психологическим причинам препятствуют.
Наличие размерностей	Для СФВ обязательны, размерность – это скрытая закономерность, основа анализа уравнений связи.	В СЕИ размерности обязательны, в том числе, для установления единиц.
Наличие единиц измерений	В СФВ не обязательны, но могут применяться в качестве справочного материала.	В СЕИ единицы обязательны, именно для их унификации и создаются СЕИ.
Основные физические величины	Существуют в природе объективно, задача науки – выявить их. Комплект основных физических величин в СФВ не обязан совпадать с комплектом основных величин в СЕИ.	Комплект основных величин в СЕИ принимается условно, отвечает требованиям практической целесообразности и существует только на Земле.
Независимость основных физических величин	В СФВ должна быть абсолютной.	Единицы основных величин в СЕИ могут определяться через другие основные единицы.
Измерительные эталоны единиц	В СФВ в них нет необходимости.	Краеугольный камень в любых процессах измерения.
Расположение величин в перечнях величин	Строго определенное, построенное на базе принципа последовательности, вытекающего из принципа причинности.	Априорное, в разных разделах физики зависит от предпочтений составителя перечня величин.

Формула размерности	Формула размерности величины определяется только по уравнению, определяющему эту величину. Словесные формулировки при определении формулы размерности недопустимы.	Формулы размерности определяются по уравнениям связи, но эти уравнения не всегда подчиняются принципу причинности. В стандартах допускается определение формулы размерности согласно словесной формулировке.
Возможность предсказания новых закономерностей	СФВ могут и обязаны предсказывать новые закономерности, корректировать уравнения для существующих в науке закономерностей.	Возможность предсказания новых закономерностей в СЕИ отсутствует.
Удобство при измерениях	В качестве одной из задач СФВ не рассматривается.	Определяет предпочтительность применения той или иной СЕИ.
Удобство при преподавании	Наличие СФВ, отвечающей законам природы, может существенно облегчить процесс преподавания.	В качестве одной из задач СЕИ не рассматривается.
Удобство при научных исследованиях	Наличие СФВ, отвечающей законам природы, может способствовать успешным исследованиям в любом разделе физики.	Ученые при исследованиях стремятся использовать ту СЕИ, которая наиболее удобна в данном разделе физики.

4. Комментарии к Таблице сравнения, связанные с СИ

1. Исторически в связи с развитием электромагнетизма физики вводили последовательно 9 (девять!) систем единиц измерений, а всего в работе [7] их перечислено 16 (шестнадцать!), не считая естественных систем единиц. Исторический процесс формирования современных систем единиц описан в работах [8, 15].

Этот сложный процесс является следствием того, что наука не знает достоверно, что такое электрический и гравитационный заряды. При увязке одного с другим используются законы Ньютона и Кулона, в которые вводятся размерные коэффициенты, некорректно называемые гравитационной, электрической и магнитной постоянными [15, 16, 17]. Вводили и вводят эти коэффициенты по-разному, отсюда такое большое количество систем единиц.

После создания единой СИ продолжает широко применяться система СГС. Автор статьи [16] указывает на то, что СИ навязана физикам, что СИ неоправданно усложняет и научные исследования, и преподавание.

2. В системах величин комплект основных величин может быть отличен от такового в системах единиц. В системах величин имеются основные величины, а в системах единиц имеются единицы основных величин. Это не одно и то же!

3. В СИ в качестве некоторых единиц основных величин приняты единицы производных величин. Эта условность касается только планеты Земля. При систематизации физических величин подобная априорность недопустима.

4. В таблицах систем величин все величины расположены в строгом соответствии с принципом последовательности, который требует, чтобы в перечнях величин производные величины следовали после тех величин, которые их определяют. А в таблицах систем единиц, включая СИ, этот принцип, как правило, не учитывается.

5. Размерности в системах величин устанавливаются только по определяющим уравнениям, а не по словесным формулировкам, как это иногда допускается в СИ. Как остроумно заметил по этому поводу Р.Фейнман [18], "...из одного определения никогда ничего никто не выводил...".

6. Решение проблемы систематизации физических величин ни теоретически, ни практически не мешает применению единиц СИ и не мешает дальнейшему развитию самой СИ. Но прислушаться к выводам системного подхода было бы полезным.

Например, единица объёмной плотности энергии в СИ равна Дж/м³, и такая единица выглядит понятно и естественно. А размерность той же объёмной плотности энергии в СИ равна ML⁻¹T⁻², что в переводе на единицы означает кг/(м•с²), хотя это то же самое, что Дж/м³. Такое раздвоение у практиков кроме раздражения ничего вызвать не может.

7. Не секрет, что многие инженеры и физики при анализе размерностей пользуются вовсе не размерностями, а единицами СИ. И даже называют единицы размерностями. Так что понятны чувства тех читателей, которым предлагается расстаться с иллюзией того, что СИ – наилучшая и чуть ли не единственно возможная система единиц. Она действительно хороша, но лишь для того, для чего создана. И не более того.

5. Естественные системы единиц

Основной причиной различных комплектов основных величин в системах единиц [1] являются слова “*условно принятая*“ из стандартного определения основной величины. Поэтому уже давно создаются естественные системы единиц, история возникновения и развития которых подробно описана в работе [19]. В справочнике [20] им дано такое определение: «**Естественными системами единиц называют системы, в которых за основные единицы приняты фундаментальные физические постоянные**». Основные и производные величины в естественных системах единиц будем называть **естественными физическими величинами**.

Цель создания естественных систем единиц четко описана М.Планком [21]. Она заключается в том, чтобы естественные физические величины “*сохраняли своё значение для всех времен и для всех культур, в том числе, и вземных, и нечеловеческих*“. Предложенная М.Планком в 1906 г. естественная система единиц базировалась на 4-х физических постоянных: постоянной Планка h , электродинамической постоянной c , гравитационной постоянной G и постоянной Больцмана k .

Как указывается в работе [19], развитие естественных систем единиц идет “*по направлению к единой системе абсолютных эталонов Природы*“. И утверждается, что “*развитие метрологии можно описать как переход от измерения фундаментальных постоянных к измерению фундаментальными постоянными*“.

Автор [19] полагает, что количество фундаментальных физических постоянных должно быть равно пяти. Четырьмя из них должны быть c , h , k и электрический заряд e . Необходимость включения в этот перечень гравитационной постоянной G ставится под сомнение. Недостающей пятой фундаментальной физической константой, по мнению автора [19], является “*некоторый фундаментальный масштаб энергии*“.

Развитие естественных систем единиц ведет, по мнению автора [19], к созданию единой естественной системы единиц, и основным препятствием на пути создания являются “*непреодолимые финансовые затраты и психологические проблемы, связанные с кардинальным изменением всех уже ставших привычными практических мер*“.

Автором [19] предложена система величин FSVQ (F – размерность частоты, S – размерность действия, V – размерность скорости, Q – размерность электрического заряда), которая опирается на существующие естественные системы единиц. Однако в ней все основные величины являются фактически производными величинами.

6. Естественные системы величин и естественные основные величины

Реализация идеи систематизации физических величин с опорой только на явления Природы возможна при базировании на **естественные системы величин**, в которых **естественные основные величины** не привязаны к системам единиц и принципиально не зависят ни от каких других величин. Любые производные величины, условно принятые основными в системах единиц, будем называть **условными основными величинами**.

Автором [20] предложена естественная система величин ELANT, содержащая **пять** естественных основных величин: энергию с размерностью E , протяженность с размерностью L , время с размерностью T , угол поворота с размерностью A и число структурных элементов с размерностью N . Она названа энергодинамической системой величин и понятий ЭСВП. Эта система величин базируется на структурной схеме строения материи, изображенной на рис. 2.

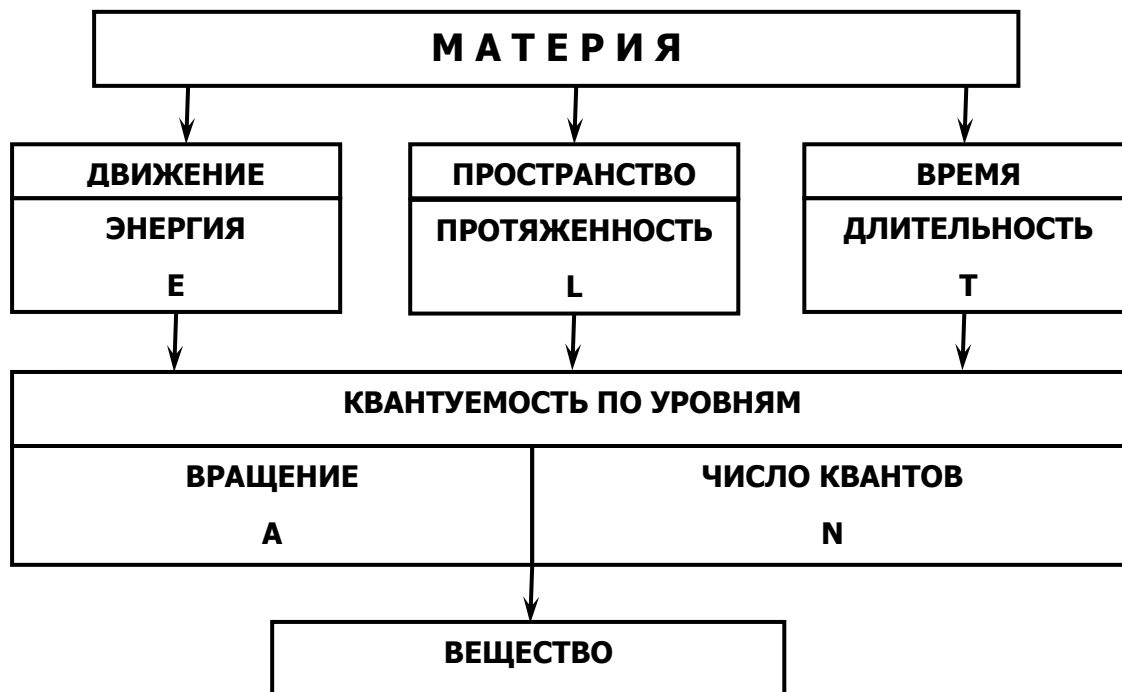


Рис. 2 Структурная схема строения материи

Основным свойством материи является движение, количественно характеризуемое энергией. Идея включить в состав основных физических величин энергию была высказана еще в начале XX века французским физиком А. Пуанкаре: *“Поскольку мы не в состоянии дать общее определение энергии, закон сохранения энергии следует рассматривать просто как указание на то, что существует нечто, остающееся постоянным (в любом физическом процессе). К каким бы открытиям не привели нас будущие эксперименты, мы заранее знаем, что и тогда будет нечто, обладающее способностью сохраняться, и это нечто мы можем называть энергией”*.

Для замкнутых физических систем существуют особые функции, называемые интегралами движения, характеризующие физическую систему в целом. Среди них выделяют три особых интеграла движения, обладающие свойством аддитивности. Под этим свойством понимается то, что значение интеграла движения для всей системы равно сумме значений интегралов движения для каждой из частей системы. Эти три аддитивных интеграла движения называются энергией, импульсом и моментом импульса.

В основе сохранения движения, количественно характеризуемого энергией (символ размерности E), лежит однородность времени, характеризуемого длительностью процесса движения системы (символ размерности T). В основе сохранения импульса лежит однородность пространства, характеризуемого протяженностью (символ размерности L). В основе сохранения момента импульса лежит изотропия пространства, понимаемая в том смысле, что поворот системы, характеризуемый углом поворота (символ размерности A), не отражается на свойствах системы. Вот почему эти четыре физические величины и являются естественными основными величинами.

Иерархия уровневого строения материи [21] показывает, что переход от более высокого уровня к более низкому уровню характеризуется тем, что материальные объекты, более энергичные, меньшие по размерам и с большими угловыми скоростями вращения, объединяются в объекты, менее энергичные, большие по размерам и с меньшими угловыми скоростями вращения. Каждый уровень характеризуется минимальными (граничными) значениями указанных характеристик, воспринимаемыми как фундаментальные физические константы. Материальный объект с такими граничными значениями воспринимается как неделимый структурный элемент данного уровня (квант). Все остальные материальные объекты данного уровня состоят из целого числа структурных элементов этого уровня (символ размерности N).

При уменьшении значений характеристик ниже значений фундаментальных физических констант материальные объекты переходят на более низкий иерархический уровень с другими значениями фундаментальных физических констант.

7. Условные основные физические величины

В системы единиц в качестве основных величин кроме естественных величин вводятся условно некоторые производные величины. Они дополняют, а иногда и заменяют естественные основные величины, что будет проиллюстрировано ниже.

Подобное условное введение основных величин допускается стандартом. Основной причиной условности является удобство и экономичность измерения и создания измерительных эталонов. Производную величину, условно введенную в качестве основной величины, будем называть **условной основной величиной**.

К сожалению, в современное стандартное определение основной величины не включено дополнение, в котором указана допустимость введения в систему единиц основной величины с размерностью, состоящей из размерностей других основных величин. Если бы такое дополнение существовало, то введение условной основной величины было бы легитимным, а не носило бы, как сейчас, характер волюнтаристского решения.

8. Физические величины первого и второго порядка

Изучение истории создания различных систем единиц показало необходимость разделения физических величин на величины первого и второго порядка.

К **величинам первого порядка** относятся свойства физического поля: статический заряд [17], производная заряда по времени (поток заряда), а также все величины, в определяющие уравнения которых входят заряд и поток заряда в первой степени. Это, например, потенциал поля, напряженность поля, электрический момент диполя, магнитная индукция, магнитный момент, поляризованность, намагниченность и др.

К **величинам второго порядка** относятся такие величины, в определяющие уравнения которых входят наряду с основными величинами величины первого порядка во второй степени. Это величины, производные от таких основных величин, как энергия, длина, время. Например, виды энергии, мощность, сила, вращающий момент, скорость, ускорение, угловая скорость, импульс, момент импульса и др.

9. Причины появления дробных чисел в показателях степени размерности

Из деления физических величин на величины первого и второго порядка следует важный вывод. *Если в комплекте основных величин присутствуют только величины второго порядка, то в показателях размерностей и единиц величин первого порядка неминуемо окажутся дробные степени с числом 2 в знаменателе ($1/2$, $3/2$, $5/2$ и т.д.).* Подобное наблюдается во всем семействе систем единиц СГС, где дробные степени присутствуют в размерностях и единицах электрических и магнитных величин.

Если же условной основной величиной сделать любую производную величину первого порядка, то показатели степени размерностей и единиц величин первого порядка

станут целыми числами. В СИ, а до нее в системе единиц МКСА, избавились от дробных степеней путем введения в качестве условной основной величины электрического тока, не совсем корректно называемого силой тока. Это не случайная удача создателей СИ, как полагает автор статьи [22]. Дробные степени показателей стандартом допускаются [23].

А.Зоммерфельд назвал размерности с дробными степенями показателей “противоестественными”. С ним согласны авторы статей [22, 24], в которых утверждается, что дробные степени не несут физического смысла. Автор [15] считает наличие дробных показателей размерностей одним из принципиальных недостатков системы единиц СГС и рационализованной системы единиц Хевисайда-Лоренца. Дробные степени всегда раздражали и сейчас раздражают многих ученых и инженеров. В действительности же главной причиной раздражения является то, что с дробными степенями неудобно записывать определяющие уравнения и проводить анализ размерностей.

Дробные степени исчезнуть не могут. Они существуют потому, что основной физической величиной в любой системе величин или единиц является длина. А длина, возведенная во вторую степень, находится в знаменателе закона притяжения Ньютона и закона Кулона в виде квадрата расстояния между зарядами. Поэтому в размерность заряда физического поля неизбежно должен войти корень квадратный из размерности длины.

И вообще нельзя фетишизировать ни размерности, ни единицы, ни показатели их степеней. Нет причин искать физический смысл в дробных показателях степеней размерностей. Физическое содержание величин следует выяснять только при анализе определяющих уравнений, а не искать его в формулах размерностей или единиц. Единица c^2 , присутствующая в формуле единиц, имеет не больше физического смысла, чем единица $m^{1/2}$. Считать наличие дробных показателей недостатком системы единиц можно только с точки зрения психологии их восприятия.

Однако психология восприятия тоже важна, поэтому и принято решение убрать дробные степени показателей в СИ. Имеются физики (например, [16]), не довольные СИ и предпочитающие систему СГС. Однако СГС, объединившая системы единиц СГСЭ и СГСМ, имеет серьезный недостаток: напряженности центрального и вихревого полей в СГС имеют одну и ту же размерность, что противоречит их определяющим уравнениям. Этого недостатка нет в системах СГСЭ и СГСМ, взятых в отдельности.

10. Сила тока как условная основная величина

На роль условной основной величины логичнее подошел бы электрический заряд. Именно он с размерностью Q введен в качестве условной основной величины автором [20] в предложенную систему величин (ЭСВП). Символом Q уже обозначалась ранее размерность электрического заряда в системе СГСФ, существовавшей в конце XIX века. Но точно и экономично можно сделать измерительный эталон электрического тока, поэтому при создании СИ условной основной величиной стала сила тока.

Размерность тока I во всех системах ЛМТ, равна:

$$\dim I = L^{3/2}M^{1/2}T^{-2} . (1)$$

После введения в СИ в качестве условной основной величины силы тока система единиц электромагнитных величин стала системой ЛМТИ. И размерность величины в ней стала получаться путем двойной операции. Сначала размерность конкретной величины в системе ЛМТ умножается на размерность тока в соответствии с формулой (1), а затем размерность той же величины делится на размерность тока в СИ, то есть, на I .

Это привело к любопытной ситуации. Оказалось, что электромагнитные величины первого порядка (напряженности поля и все производные от напряженностей величины) могут иметь в СИ две равнозначные записи размерностей: одну в системе ЛМТИ, а другую – в системе ЛТИ, что видно из рассмотрения Таблицы величин физического поля [25]. Размерности напряженностей поля в вакууме стандарт [23] предписывает применять в

системе LMTI, а размерности напряженностей поля в веществе – в системе LTI. И чтобы узнать, какая из этих двух записей должна быть использована, приходится смотреть в справочник. Такая ситуация нелогична.

Интересно, что при подстановке размерности I из формулы (1) в размерность магнитной постоянной μ_0 в СИ, у этой константы получается размерность LT^{-1} , соответствующая формуле $\mu_0 = 1/c^2$. Такая же подстановка в размерность электрической постоянной ϵ_0 делает эту константу безразмерной. И это соответствует подлинным размерностям этих констант, являющихся фактически размерными коэффициентами [26].

11. Масса как условная основная величина

Во всех системах единиц, начиная с первой гауссовой системы, единица массы является единицей основной величины. При этом масса трактуется [23], как *”одна из основных характеристик любого материального объекта, являющаяся мерой его инертности и гравитации”*. В этом определении не уточняется, какая именно масса, инертная или гравитационная, имеется в виду, хотя измерительный эталон килограмма до его предстоящего переопределения основан на измерении силы тяготения.

Однако высокая точность совпадения значений этих двух видов масс в опытах, проведенных в земных условиях, еще не свидетельствует о совпадении их физического содержания и их размерностей. В тех работах [27, 28], в которых размерности инертной и гравитационной масс приравниваются друг другу в двух законах Ньютона (во втором законе и в законе всемирного тяготения), легитимной считается LT-система размерностей, предложенная еще в 1965 г. Р.О.ди Бартини [29]. Однако в работе [19] убедительно продемонстрирована несостоятельность LT-системы, отнесенной автором этой работы к разряду спекулятивных. Жаль, что LT-система до сих пор прельщает многих внешним изяществом форм таблиц физических величин.

В большинстве естественных систем единиц XX века [19] в качестве единицы массы присутствует масса электрона. Но в атомной физике массу электрона измеряют в единицах энергии, то есть в эВ (электрон-вольтах), а не в килограммах. В работе [19, табл. 3.4.1] приводятся 4 физические величины, претендующие на то, чтобы заменить единицу массы электрона в перечне единиц основных величин. Все они имеют единицу энергии. Масса в качестве основной величины заменена энергией и в системе величин ЭСВП [20].

12. Термодинамическая температура как условная основная величина

В молекулярно-кинетической теории газов температура входит в уравнение для средней кинетической энергии поступательного движения молекулы идеального газа

$$W_k = m\hat{u}^2/2 = 3kT/2, (2)$$

где m – инертная масса молекулы; \hat{u} – среднеквадратичная скорость молекулы; k – постоянная Больцмана. Термодинамической температуре в СИ присвоены размерность Θ и единица *”Кельвин (К)”*, что автоматически приводит к единице постоянной Больцмана *”Джоуль на Кельвин (Дж/К)”*. По поводу размерности температуры хорошо сказано в работе [30]: *”Если температуре приписать свою особую размерность, например – Θ , как это сделано в СИ, то практически теряется возможность выяснения ее физической сути (то, в чем измеряют, само не измеримо)”*. Численные значения температуры определяются по шкале, составленной для идеального газа и обратимого процесса.

Образно эта ситуация охарактеризована в работе [9]: *”Введение температуры, условной шкальной величины, в число основных явно преследует практическую цель – потрогать привычности и широкой распространенности термометра как измерительного прибора. Температура определяет кинетическую энергию молекул вещества и количество тепла. Введение основной единицы – кельвина – приводит к сложной и труднопонимаемой физической размерности теплоёмкости $L^2MT^{-2}\Theta^{-1}$, то*

есть энергии, поделенной на температуру... Между тем совершенно ясно, что физическая природа температуры – энергетическая, а единица кельвин условна”.

Известно также [19], что сам Л.Больцман измерял температуру в единицах энергии. Постоянная Больцмана введена в 1900 г. М.Планком. Поэтому в уравнении (2) константа k фактически безразмерна и является числовым коэффициентом. Согласно кинетической теории газов постоянная Больцмана соответствует кинетической энергии двух степеней свободы молекулы. В естественной системе единиц Планка единица постоянной Больцмана является единицей условной основной величины.

В работе [20] рассмотрено уравнение состояния физической системы для тепловой формы упорядоченного движения:

$$\delta Q = \Delta T d\Theta, (3)$$

где δQ – приращение теплообмена системы со средой; ΔT – температурный напор; $d\Theta$ – приращение теплового заряда, под которым понимается вошедшее в систему количество теплоты, которое не отождествляется с приращением теплообмена δQ . Из уравнения (3) следует, что единицу ”Джоуль на Кельвин (Дж/К)” имеет тепловой заряд Θ . Такая интерпретация приводит к выводу о том, что основная идея теории теплорода оказывается верной, если под теплородом понимать не количество теплоты Q , а тепловой заряд Θ , то есть упорядоченную часть теплового движения. Именно так и понимал эту ситуацию С.Карно. Тепловой поток существует как поток упорядоченной части тепловой энергии.

В работе [30] проанализировано 11 разных вариантов размерностей температуры и связанных с ними размерностей теплоёмкости, энтропии и постоянных Больцмана, Стефана-Больцмана и Вина. Вариант с размерностью частоты T^{-1} для температуры считается автором [30] ”наиболее подходящим”.

В статье [31] показано, что закон смещения Вина приводит к доказательству того, что размерность температуры совпадает с размерностью частоты колебаний. Закон Вина обычно записывают в таком виде:

$$T\lambda_m = b, (4)$$

где λ_m – длина волны теплового излучения, соответствующая максимуму зависимости испускательной способности абсолютно черного тела от длины волны теплового излучения λ ; $b = hc/x_mk$ – постоянная Вина, в которой $x = hv/kT$ – критерий подобия, а $x_m = 4,965$ – значение x , соответствующее максимуму зависимости испускательной способности абсолютно черного тела от частоты колебаний ν . Подстановка значений фундаментальных констант в уравнение (4) приводит к зависимости $T = 9,666 \cdot 10^{-11} \nu_m$, где ν_m – значение частоты колебаний, соответствующее λ_m . Отсюда следует, что температура T имеет ту же размерность, что и частота колебаний ν_m . Можно даже подсчитать, что 1 Кельвин соответствует значению $\nu_m = 103,45$ ГигаГерц.

Известно также, что при условии $x \ll 1$, то есть на нижнем пределе частотного диапазона инфракрасного излучения, закон излучения Планка переходит в формулу Рэля-Джинса, определяющую равновесную плотность теплового излучения. Отсюда можно сделать вывод о том, что представление кинетической энергии с помощью величины kT применимо лишь на уровне макромира, а с помощью величины $h\nu$ – на уровне микромира.

Инженерная деятельность протекает на уровне низких температур, где единица ГигаГерц оказывается неудобной по сравнению с единицей Кельвин. А единица Кельвин оказывается неудобной при измерении высоких температур. Поэтому практическая температурная шкала 1968 года [23] разрешает пользоваться единицей Кельвин до 1338 К, а выше этого значения рекомендуется использовать закон излучения Планка, где используется единица частоты колебаний.

Создание эталона термодинамической температуры в диапазоне от 0 до 1338 К с точностью до 0.01 К на базе измерения энергетической светимости абсолютно черного тела представляется практически нереальной задачей. Тем более, что даже существующий эталон термодинамической температуры находится почти на последнем месте по своей точности среди других измерительных эталонов основных величин [32].

Размерность частоты колебаний NT^{-1} не противоречит природе периодических процессов в микромире, а размерность температуры в СИ пришлось принять условно, чтобы ее было удобнее измерять в макромире, где термодинамическая температура пропорциональна энергии. Но эта пропорциональность базируется лишь на одном уровне состояния материи: на уровне газа, к тому же, идеального газа. А пропорциональность энергии частоте периодического процесса существует на всех уровнях.

13. Количество вещества как условная основная величина

По определению [23]: *”Количество вещества n – физическая величина, равная числу структурных элементов, составляющих систему”*. Единица этой величины в СИ – моль. Для количества вещества n в работе [23] приведено определяющее уравнение

$$n = N/N_A, \quad (5)$$

где N – искомое число структурных элементов однородной системы; N_A – число атомов в 0,012 кг изотопа углерода-12 (**число Авогадро**), то есть тоже число структурных элементов. Значит, количество вещества n зависит и от N , и от N_A . Это критерий подобия, или обычная производная величина.

В СИ количество вещества n сделали условной основной величиной. Число структурных элементов N в СИ размерностью не обладает, а число Авогадро N_A (то же число структурных элементов, только имеющее фиксированное значение) имеет размерность и единицу моль⁻¹. Налицо пренебрежение логикой. Ведь по физическому содержанию числа N и N_A из уравнения (5) ничем друг от друга не отличаются.

При систематизации физических величин подобная ситуация противоречит условию о недопустимости существования величины с размерностью основной физической величины в минус первой степени [33]. Приведем также мнение химиков [34], подтверждающее это условие: *”Естественная единица измерений числа частиц штука пока не узаконена. В результате эта величина (имеется в виду N – И. К.) оказывается безразмерной, а постоянная Авогадро имеет абсурдную единицу измерений моль⁻¹ (чего ”на моль”?)”*.

В системе величин ЭСВП [20] и N , и N_A являются частными случаями основной физической величины ”число структурных элементов”, имеющей размерность N и единицу ”штука”.

14. Сила света как условная основная величина

Оптическое излучение характеризуется тремя видами фотометрических величин [23]: энергетическими, фотонными и редуцированными. Первые из них измеряются в единицах энергии, вторые – в единицах числа фотонов, то есть в единицах числа структурных элементов. Редуцированные фотометрические величины, к которым относится сила света, связаны с энергетическими фотометрическими величинами расчетными зависимостями.

Решение ввести в СИ в качестве условной основной величины редуцированную фотометрическую величину с единицей ”кандела (кд)” принято в связи с тем, что измерительный эталон этой единицы оказался наиболее точным.

15. Классификация производных величин

Производные величины также не однородны. В справочнике [23] производные величины классифицируются по признаку очередности образования. Говорится о подборе такой последовательности определяющих уравнений, *”в которой каждое последующее уравнение содержит только одну новую производную величину”*. Соответственно, **производными величинами первой очереди** являются величины, в определяющих уравнениях которых присутствуют только основные величины, **производными величинами второй очереди** являются производные величины, в определяющих уравнениях которых имеется (кроме основных величин) хотя бы одна величина первой очереди. И так далее в том же порядке. Отметим, что в современных справочниках и учебниках признак очередности в перечнях физических величин соблюдается плохо.

Производные величины классифицируются также по признаку отсутствия или наличия числового коэффициента в формуле размерности на когерентные и некогерентные производные величины. В СИ производные величины когерентны, то есть числовой коэффициент равен 1. Но не во всех системах единиц было такое.

16. Удельные производные физические величины

Существует еще один вид производных величин – **удельные величины**, которые справочником [23] не выделяются. Удельная производная величина – это отношение любой физической величины к любой другой физической величине, условно принятой за основу. Чаще всего такими условно принятыми величинами бывают длина, площадь, объём, масса, время.

Если базовыми величинами являются длина, площадь или объём, то такие удельные физические величины называются **плотностями**: линейной, поверхностной и объёмной. Если базовыми величинами являются величины той же размерности, что и величина, находящаяся в числителе отношения, то речь идет о **критериях подобия**.

По причине условности выбора базовой величины удельные величины, будучи производными величинами, не участвуют в процессе систематизации физических величин. На удельные величины не распространяется условие однозначности, которое требует, чтобы величины, имеющие одинаковые размерности, были бы одной физической природы. Ведь удельные величины могут иметь одинаковые размерности при разном физическом содержании.

Не распространяется на удельные величины и условие показателей степеней, заключающееся в том, что производная величина не может иметь размерность основной величины с показателем степени, равным минус единице.

17. Заключение

1. Дискуссия о природе размерностей между сторонниками точек зрения А.Зоммерфельда и М.Планка показала необходимость классификации основных физических величин, подразделяющей их на **естественные**, вытекающие из объективных законов Природы, и **условные**, принимаемые субъективно на планете Земля, исходя из условий удобного и экономичного создания измерительных эталонов.

2. Применение системного подхода при систематизации материальных объектов и построение уровневой иерархии систематизации в физике приводит к выводу, что систематизация физических величин и их размерностей должна предшествовать унификации единиц измерений. Системы величин и системы единиц являются принципиально различными понятиями также потому, что у них разные цели и задачи.

3. СИ является системой единиц. Выводы, к которым приводит системный подход при систематизации физических величин, подсказывают желательность коррекции некоторых единиц СИ и определяющих уравнений, которые к ним приводят.

4. Естественные системы единиц и их развитие базируются на фундаментальных физических константах. Современное развитие этих систем показывает, что число этих констант равно **пяти**. Этой цифре должно соответствовать и число естественных основных величин.

5. Тенденции развития естественных систем единиц приводят к выводу о том, какими именно должны быть 5 естественных физических величин: это энергия, протяженность, длительность, угол поворота, число структурных элементов.

6. Показана необходимость деления физических величин на величины первого и второго порядка. С присутствием или отсутствием величин первого порядка в комплекте основных величин для системы величин или системы единиц связано присутствие или отсутствие дробных чисел в показателях степени размерностей и единиц.

7. Проанализированы все условные основные величины в СИ (масса, сила тока, термодинамическая температура, количество вещества, сила света), и показана их зависимость от естественных основных величин.

8. Приведена классификация производных физических величин.

Литература

1. Коган И.Ш., Основные физические величины назначаются или продиктованы природой? – Законодательная и прикладная метрология, 2011, **3**
2. Брянский Л.Н., Кое-что о размерностях единиц измерений. – Законодательная и прикладная метрология, 1993, **3**
3. Юдин М.Ф., Селиванов М.Н, Тищенко О.Ф., Скороходов А.И., Основные термины в области метрологии. – М.: Изд. Стандартов, 1989.
4. Планк М., Введение в теоретическую физику. ч.1. – М.: ГТТИ, 1932.
5. Сена Л.А., Единицы физических величин и их размерности. – М.: 1988, 336 с.
6. Савельев И.В., Курс общей физики (в 5 книгах). – М.: АСТ: Астрель, 2005.
7. Брянский Л.Н., Непричесанная метрология. М.: ПОТОК-ТЕСТ, 2002, 160 с.
8. Власов А.Д., Мурин Б.П., Единицы физических величин в науке и технике. – М., Энергоатомиздат, 1990, 176 с.
9. Конторов Д.С., Михайлов Н.В., Саврасов Ю.С., Основы физической экономики (Физические аналогии и модели в экономике). – М.: Радио и связь, 1999, 184 с.
10. Коган И.Ш. Систематизация и классификация определений и дополнений к понятию “энергия”. – “Автоматизация и ИТ в энергетике”, 2009, **2-3**, с.с. 56-63, также <http://physicalsystems.narod.ru/index03.1.09.html>.
11. Коган И.Ш. Виды движения и формы движения. – <http://physicalsystems.narod.ru/index07.01.1.1.html>.
12. Коган И.Ш. Классификация физических систем. – <http://physicalsystems.narod.ru/index04.02.html>.
13. Коган И.Ш. Классификация зарядов физического поля.– <http://physicalsystems.narod.ru/index07.04.2.1.html>.
14. Коган И.Ш., Обобщение и систематизация физических величин. (Аналитический обзор). – <http://www.sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/8910.html>. – 2008.
15. Трунов Г.М., Уравнения электромагнетизма и системы единиц электрических и магнитных величин. – Пермь, ПГТУ, 2006, 130 с.
16. Сивухин Д.В., О Международной системе физических величин. – “Успехи физических наук”, 1979, **129**, вып. 2, с.с. 335-338.
17. Коган И.Ш. Развитие идеи объединения электромагнетизма и гравитации. – “Мир измерений”, 2011, **3**, с.с. 51-53.

18. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М., Фейнмановские лекции по физике, в 9 томах. М.: "Мир", 1965 – 1977.
19. Томилин К.А. Фундаментальные физические постоянные в историческом и методологическом аспектах, – М.: Физматлит. 2006, 368 с.
20. Коган И.Ш., Обобщение и систематизация физических величин и понятий. – Хайфа, Изд. Рассвет, 2006, 207 с., также <http://physicalsystems.narod.ru/index>
21. Пакулин В.Н., 2010, Структура материи (Вихревая модель микромира). – СПб, НТФ "Истра".
22. Ацюковский В.А., Всеобщие физические инварианты и предложения по модернизации Международной системы единиц СИ. – Энергетика Сибири, 2006, 3 (8), с.с. 10-11.
23. Чертов А.Г., Физические величины. – М.: Высшая школа, 1990, 336 с
24. ди Бартини Р. О., Кузнецов П. Г., 1978, О множественности геометрий и множественности физик. – Свердловск, Уральский научный центр АН СССР, Сб.: "Проблемы и особенности современной научной методологии", с. 55-65, также <http://pobisk-memory.narod.ru>
25. Коган И.Ш., Таблица величин физического поля в СИ. – 2008. – <http://physicalsystems.narod.ru/index05.03.index.html>
26. Трунов Г.М., Магнитная постоянная μ_0 : фундаментальная физическая константа или просто размерный коэффициент? – "Законодательная и прикладная метрология", 2007, 2.
27. Васильев В.А. Периодическая система физики и биологическая картина мира. - Десногорск, Изд. ООО "Газета Авоось-ка", 2004, 140 с.
28. Ерохин В.В. Абсолютная система физических единиц. – 2008. – <http://new-idea.kulichki.net/?mode=physics&pn=1>
29. ди Бартини, Роберт Орос. Некоторые соотношения между физическими константами. – Доклады АН СССР, 1965, 163, № 4.
30. Чуев А.С., Система физических величин. Текстовая часть электронного учебного пособия. 2007, <http://www.chuev.narod.ru/>
31. Коган И.Ш. Естественная размерность температуры. – 2008. <http://physicalsystems.narod.ru/index07.06.0.html>
32. Брянский Л.Н. Непричесанная метрология. М.: ПОТОК-ТЕСТ, 2002, 160 с.
33. Коган И.Ш. Условия успешной систематизации физических величин. – 2008. – <http://physicalsystems.narod.ru/index03.4.0.html>
34. Дайнеко В.И. и др. Памятка для решения расчетных задач по химии. - М.: Интеллект, 1997, 49 с.