

Альтернативный путь к Новой СИ

(Часть 3. Кельвин - вариант единицы количества объектов)

Аннотация. В статье разъясняется суть электротепловой аналогии [1], на базе которой возникла теория теплового заряда, позволившая по-новому взглянуть на физическое содержание термодинамической температуры и ее единицы кельвин. Подтверждено, что измеряется не абсолютное значение температуры, а разность температур [2] и что кельвин является единицей именно разности температур. Утверждается, что единица кельвин является частным случаем единицы количества объектов, которым в термодинамике является количество элементарных тепловых зарядов. Констатируется, что в метрологии до сих пор остается незамеченной теория теплового заряда, по-новому раскрывающая физическое содержание термодинамической температуры и разности температур, хотя эта теория опубликована более полувека назад [3]. Выводы этой теории приводят к иным размерностям и единицам тепловых величин, чем те, которые существуют в СИ.

1. Общие сведения о теории теплового заряда.

1.1. Вкратце об истории возникновения понятия "тепловой заряд".

Развитие теории электромеханических аналогий в первой половине XX века и их успешное практическое применение привело к попыткам включить в теорию аналогий и тепловые величины. В этом смысле выделяются подробные рассуждения об электротепловой аналогии в монографии А.Эйнштейна и Л.Инфельда [1, с.66].

“Теплота

Электричество

Два тела, имеющих вначале различную температуру, спустя некоторое время после того, как они приведены в соприкосновение, достигают одной и той же температуры.

Два изолированных проводника, имеющих вначале различные электрические потенциалы, очень скоро после того, как они приведены в соприкосновение, достигают одного и того же потенциала.

Равные количества теплоты производят различные изменения температуры в двух телах, если теплоемкости этих тел различны.

Равные величины электрических зарядов производят различные изменения электрических потенциалов в двух телах, если электрические емкости тел различны.”

В монографии [1] проведена аналогия между такими ключевыми электрическими и тепловыми понятиями, как электрический потенциал и термодинамическая температура, электрический заряд (количество электричества) и количество теплоты, электрическая ёмкость и теплоемкость. Именно на основании этой аналогии И.Львов [4] предложил ввести понятие "тепловой заряд" как аналог понятию "электрический заряд".

На самом деле понятие "тепловой заряд" под названием "термический заряд" появилось еще в 50-х годах XX века в Общей Теории А.Вейника, опубликованной им в монографии [3]. К сожалению, труды А.Вейника были отвергнуты АН СССР настолько категорически, что весь тираж его монографии [3] был сожжен, а разосланные в библиотеки обязательные экземпляры были закрыты для открытого доступа, вследствие чего "тепловой заряд" открывался другими исследователями как бы заново. На Общую теорию А.Вейника было наложено клеймо "лженауки", не снятое до сих пор.

Работы А.Вейника по термодинамике были переведены на английский язык в Израиле [5] и в Англии [6], но ссылки на эти переводы в англоязычной литературе нами не обнаружены. В дальнейшем А.Вейник сумел выпустить за свой счет небольшим тиражом новую монографию [7]. В ней он вместо термина "термический заряд" применил термин "вермический заряд" (от немецкого слова Wärme – теплота), что в буквальном переводе и есть тепловой заряд.

Обоснованность введения понятия "тепловой заряд" подтверждена впоследствии исследованиями других ученых. Например, под влиянием монографии [3] это понятие было применено в 90-х годах XX века в процессе систематизации физических величин [8]. Уже в XXI веке идея о тепловом заряде была заново, независимо от А.Вейника, разработана автором статьи [9] и подтверждена им дополнительными обоснованиями. В частности, автором [9] введено понятие "тепловая частица", аналогичное понятию "элементарный электрический заряд" в электродинамике.

А.Вейник указал, что тепловой заряд включен в "**ансамбли зарядов**", которые являются упорядоченно движущимися материальными объектами, переносящими энергию. Мы полагаем, что более подходящим термином для таких объектов является "**энергоносители**". Ими, например, в газах и жидкостях являются атомы и молекулы, а упорядоченно движущиеся ионы и электроны являются энергоносителями также и электрического заряда. Энергоносителями являются свободно перемещающиеся в твердых телах электроны проводимости. Ими являются также волны электромагнитного излучения.

К сожалению, теория теплового заряда игнорируется физикой и метрологией до сих пор, хотя, как будет показано в данной статье, именно эта теория раскрывает физическую природу термодинамической температуры.

1.2. Два вида теплового заряда.

Если какой-то участок системы или среды находится в равновесном состоянии, то тепловое движение энергоносителей в нем носит характер броуновского движения. Кинетическая энергия каждого отдельного движущегося энергоносителя определяется его скоростью. В молекулярно-кинетической теории газов уравнение для кинетической энергии поступательного движения молекулы идеального газа W_k выглядит так:

$$W_k = m\hat{u}^2/2, \quad (1.1)$$

где m – масса молекулы; \hat{u} – ее среднеквадратичная скорость. Суммарный вектор среднеквадратичной скорости \hat{u} всех энергоносителей на любом элементарном участке при броуновском (неупорядоченном) движении равен нулю.

Но равновесные состояния существуют только в теории, в природе они не встречаются. В реальной неравновесной среде или системе из общего количества энергоносителей можно выделить какое-то количество упорядоченно движущихся энергоносителей, которое и определит **тепловой заряд** системы, который будем обозначать символом Θ . Элементарное количество упорядоченно движущихся энергоносителей, содержащих тепловой заряд, является также и количеством элементарных тепловых зарядов $d\Theta$.

Если в системе присутствует только неупорядоченное движение, то это свидетельствует о том, что произошло рассеяние упорядоченно движущихся энергоносителей (их диссипация). Тепловой заряд неупорядоченно движущихся энергоносителей будем называть **тепловым зарядом диссипации**.

Оба вида теплового заряда могут взаимно переходить друг в друга. Например, в равновесной системе существуют только тепловой заряд диссипации, но при соприкосновении с другой системой, в которой значение температуры иное, возникает упорядоченное движение энергоносителей через поверхность соприкосновения систем.

Понятие "**элементарный тепловой заряд**" следует уточнить. При применении электротепловой аналогии оно сравнивается с понятием "элементарный электрический заряд", под которым в физике понимается электрон или позитрон. Но такая трактовка элементарного электрического заряда некорректна с точки зрения математики, где термин "элементарный" обозначает бесконечно малое количество. В реальности же электрон – это не элементарный, а такой заряд, который не может быть разделен на части, не потеряв при этом своего физического содержания. Однако термин "элементарный заряд" настолько прочно вошел в физическую терминологию, что исправлять его, видимо, уже поздно. Но при применении термина "элементарный заряд" следует иметь в виду, что под ним понимается наименьший неделимый заряд.

1.3. О физическом содержании некоторых терминов в термодинамике.

Уточним физическое содержание терминов "**количество теплоты**" и "**тепловая энергия**". А.Вейник [3] указал на то, что величина, которую физики называют "количеством теплоты" или сокращенно "теплотой", отличается от той величины, которая была названа С.Карно "тепловой энергией". Термин "количество теплоты" означает "*количество энергии, переданной системе внешними телами путем теплообмена*" [10, с. 102] без указания на упорядоченность или неупорядоченность движения. Но тепловая энергия, как ее понимал С.Карно, – это такая же форма энергии упорядоченно движущихся объектов, как механическая, электрическая и другие формы энергии [11]. То есть тепловая энергия – это лишь часть количества теплоты.

В популярном учебнике по физике [12, с. 61] рекомендуется избегать применение термина "тепловая энергия" на том основании, что он по смыслу совпадает с внутренней энергией. Но это зависит от того, как понимать тепловую энергию. Если тепловую энергию понимать как энергию неупорядоченно движущихся энергоносителей, то автор [12] прав. Если же тепловую энергию понимать, как энергию упорядоченно движущихся энергоносителей, то есть как функцию процесса теплообмена, как одной из форм энергообмена между равновесной системой и средой или между разными участками неравновесной системы, то тогда тепловая энергия не совпадает по содержанию с внутренней энергией системы, являющейся функцией состояния.

Рассуждения А.Вейника [3] подтверждают вывод о том, что движение теплового заряда является проявлением обмена тепловой энергией среды с системой или теплообмена между различными участками неравновесной системы. То есть движение теплового заряда является лишь частью полного теплообмена. Энергию движения теплового заряда следует понимать как тепловую энергию, присущую упорядоченно движущимся энергоносителям.

Возврат к пониманию тепловой энергии в трактовке С.Карно не означает возврат к теории теплорода XIX века, а переосмысление этой теории в связи с переходом от термодинамики равновесных процессов к термодинамике неравновесных процессов. Обычное проявление философского закона движения по спирали. По этому поводу Р.Фейнман выразился так: "*Часто говорят, что аргументы Карно были ложными. На самом же деле логика Карно безукоризненна. Неверно только упрощенное толкование этих аргументов Клаузиусом, а именно с ним все обычно знакомятся.*"

1.4. О потенциале системы и о разности потенциалов между системой и средой.

Чтобы определить теплообмен между системой и окружающей ее средой, необходимо применить уравнение для определения **полной энергии** равновесной термодинамической системы W [10, с. 100]. "*Под термодинамическими системами понимаются макроскопические объекты, которые могут обмениваться энергией как друг с другом, так и с внешней средой*". [10, с. 95]

$$W = W_k + W_p + U \quad (1.2)$$

где W_k – кинетическая энергия движения системы как целого, W_p – потенциальная энергии системы во внешних силовых полях и U – внутренняя энергия. Изменение полной энергии dW является суммой изменений ее слагаемых, в том числе изменением внутренней энергии dU . Заметим, что в термодинамической системе рассматриваются лишь две формы движения: тепловая и механическая.

Если рассматривать систему с произвольным числом форм движения, равным i , то изменение внутренней энергии dU системы будет определяться уравнением

$$dU = \sum_i (\partial U / \partial q_i) dq_i = \sum_i P_i dq_i \quad (1.3)$$

где dq_i – изменение координаты состояния i -ой формы движения. Физические величины $P_i = (\partial U / \partial q_i)$ называют **обобщенными потенциалами системы**. Потенциал системы относится к **интенсивным величинам**, значение которых не зависит от размера системы, они не аддитивны. Интенсивной величиной в тепловой форме движения является термодинамическая температура.

Окружающая систему среда также имеет потенциал для каждой формы движения. Если потенциалы системы и среды для i -ой формы движения не совпадают, то возникает **разность потенциалов** между системой и средой ΔP_i для этой формы движения. Разность потенциалов $\Delta P(t)$ является векторной величиной, поскольку она определяет направление движения энергоносителей при энергообмене: из среды в систему или в обратном направлении. Она определяется **уравнением переходного процесса** от одного равновесного состояния системы к другому.

В теории автоматического регулирования это уравнение 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 $y(t)$ (следствия воздействия). В упрощенном виде это уравнение выглядит так:

$$a_0 y(t) + a_1 (dy/dt) + a_2 (d^2 y/dt^2) = x(t) \quad (1.4)$$

Его можно записать в виде:

$$Dq_{fl} + R dq_{fl}/dt + I d^2 q_{fl}/dt^2 = - \Delta P \quad (1.5)$$

где $\Delta P(t)$ – 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 (нижний индекс fl от слова flowing – текущий).

Разность потенциалов не аддитивна, она не является интенсивной величиной. В то же время, она не относится и к **экстенсивным величинам**, то есть к величинам, "*которые изменяются пропорционально массе системы*" [12, т. 2, с. 139], так как разность потенциалов характеризует не систему, а ее отличие от среды или от соседних систем.

В уравнении (1.5) D , R и I – это постоянные коэффициенты (параметры системы), соответствующие a_0 , a_1 и a_2 . Уравнение типа (1.5) применяется в механике [14] в виде

$$D\mathbf{x} + R\mathbf{v} + I\mathbf{a} = -\mathbf{F}, \quad (1.6)$$

где \mathbf{F} – сила воздействия на систему, представляющая собой разность давлений на граничную поверхность между системой и средой, отнесенную к площади этой поверхности, \mathbf{x} – перемещение, $\mathbf{v} = d\mathbf{x}/dt$ – скорость, $\mathbf{a} = d^2\mathbf{x}/dt^2$ – ускорение, D – жесткость системы, R – сопротивление внешнего трения, I – линейная инертность.

Уравнение типа (1.5) применяется и в электродинамике, только в скалярном виде

$$(1/C)q + RI + L dI/dt = \Delta U, \quad (1.7)$$

где ΔU – разность электрических потенциалов, q – электрический заряд, $I = dq/dt$ – электрический ток, C – электрическая ёмкость, R – омическое сопротивление, L – индуктивность. Фактически же в уравнении (1.7) q – это перемещающийся (текущий) электрический заряд q_{fl} , и, соответственно, электрический ток I также является векторной величиной [13]. В каком виде уравнение (1.5) применяется в теории теплопередачи, будет показано ниже.

В Физическом энциклопедическом словаре [14] сказано: "Если система не изолирована, то ее энергия может изменяться либо при одновременном изменении энергии окружающих тел на такую же величину, либо за счет изменения энергии взаимодействия тела с окружающими телами". Этот процесс носит название **энергообмен**. Таким образом, изменение полной энергии системы dW (при неизменных W_k и W_p) определяется изменением внутренней энергии dU в соответствии с уравнением (1.3) и изменением энергообмена с окружающей средой dW_{ch} в соответствии с уравнением

$$dW = dU + dW_{ch} = \sum_i P_i dq_i + \sum_i \Delta P_i (dq_{fl})_i, \quad (1.8)$$

в котором $(dq_{fl})_i$ – элементарное количество перемещающихся из системы в среду (или в обратном направлении) энергоносителей i -ой формы движения. Для тепловой формы движения разностью потенциалов ΔP является **разность температур** системы и среды ΔT , которая в теории теплопередачи называется **температурным напором**, а перемещающийся заряд dq_{fl} соответствует элементарному количеству упорядоченно движущихся тепловых зарядов $d\Theta$.

В неравновесной системе вектор среднеквадратичной скорости энергоносителей на любом участке системы нулю не равен, он направлен от участка с большим потенциалом к участку с меньшим потенциалом. К неравновесным системам применимо понятие "**локальный потенциал**", под которым следует понимать потенциал подсистемы бесконечно малых размеров, находящейся внутри неравновесной системы. В разных местах неравновесной системы значения локального потенциала, естественно, разные, что является причиной появления внутри неравновесной системы разности локальных потенциалов и потока тепловых зарядов.

Анализ размерностей уравнения (1.5) применительно к тепловой форме движения привел автора [8] к выводу о необходимости пересмотра единиц тепловых величин.

2. Обновление единиц тепловых величин.

2.1. Необходимость модификации закона Фурье.

Процесс систематизации тепловых величин [8] показал, что она возможна только при условии модификации основной закономерности из теории теплопередачи – закона Фурье. Эта модификация проведена А.Вейником [4], поясним ее суть.

Закон Фурье приведен в работе [4] в его упрощенной записи:

$$\Phi = -\lambda (\partial T/\partial n)S \quad , \quad (2.1)$$

где $\Phi = dQ/dt$ – тепловой поток; Q – количество теплоты; λ – коэффициент теплопроводности; $\partial T/\partial n$ – градиент температуры по нормали к изотермической поверхности; S – площадь сечения, сквозь которое протекает тепловой поток.

При использовании закона Фурье в существующей записи (2.1) тепловая форма движения оказывается единственной из всех форм движения, систематизация величин которой приводит к необычным результатам. Если в роли модуля разности потенциалов ΔP_i используется температурный напор ΔT с единицей кельвин, а в роли элементарного количества перемещающейся координаты состояния $(dq_{fl})_i$ используется **элементарное количество теплоты** δQ с единицей джоуль, то изменение энергообмена dW_{ch} приобретает не существующую в физике единицу Дж К. А поскольку элементарное количество теплоты δQ тоже имеет единицу джоуль, то это приводит к выводу, что у температурного напора ΔT исчезает единица измерения, точнее она становится равной 1. Ситуация стала понятной лишь недавно [15], что будет разъяснено ниже.

А.Вейник [4] установил, что запись закона Фурье в виде (2.1) нуждается в модификации, а именно: тепловой поток следует отнести к единице термодинамической температуры T (при условии $T \neq 0$). В работе [4] закон Фурье записывается в модифицированном виде:

$$\Phi_a = -a (\partial T/\partial n)S \quad , \quad (2.2)$$

где $\Phi_a = \Phi/T$ назван "термическим потоком", а $a = \lambda/T$ названа "термопроводностью".

Понятно, что такая математическая операция не влияет на практические расчеты в теории теплопередачи, поэтому формально можно пользоваться законом Фурье и в записи (2.1). Именно поэтому терминология и единицы тепловых величин в современной теории теплопередачи вытекают из использования не модифицированного закона Фурье.

Но А.Вейник [4] показал на многочисленных примерах, что уравнение (2.1) приводит к неверному истолкованию результатов экспериментов, тогда как модифицированный закон Фурье в записи (2.2) приводит к естественной трактовке целого ряда явлений не только в теории теплопередачи, но и в термодинамике в целом.

В процессе систематизации физических величин автор [8] пришел к выводу, что только модифицированный закон Фурье в записи (2.2) позволяет систематизировать тепловые величины подобно механическим, гидравлическим, электрическим и другим величинам. Но в процессе такой систематизации тепловые величины изменяются и приобретают другие единицы.

Лишь использование модифицированного закона Фурье в записи (2.2) позволяет систематизировать тепловую форму движения аналогично всем другим формам движения. И только при условии введения понятия "тепловой заряд".

2.2. Введение понятия "тепловой заряд" изменяет единицы тепловых величин.

При систематизации физических величин во всех формах движения автор [8] руководствовался вытекающим из уравнения (1.8) обобщенным уравнением энергообмена системы с окружающей ее средой в виде

$$dW_{ch} = \sum_i \Delta P_i (dq_{fl})_i \quad . \quad (2.3)$$

Обобщенное уравнение энергообмена (2.3) для тепловой формы движения будет иметь вид:

$$\delta Q = \Delta T d\Theta \quad , \quad (2.4)$$

а уравнение (1.5) приобретает вид:

$$D_{tm} \Theta + R_{tm} d\Theta/dt + I_{tm} d^2\Theta/dt^2 = -\Delta T, \quad (2.5)$$

где $D_{tm} = dT/d\Theta$ – термическая жесткость; $R_{tm} = \delta/aS$ – термическое сопротивление, δ – толщина теплопроводящего слоя, $a = \lambda/T$ – коэффициент теплопроводности; λ – коэффициент теплопроводности в современной теплопередаче, S – площадь сечения, сквозь которое протекает тепловой поток, I_{tm} – термическая инертность.

Более понятным является уравнение, аналогичное уравнению (1.7) в электродинамике

$$(1/C_{tm}) \Theta + R_{tm} \Phi_a + I_{tm} d\Phi_a/dt = \Delta T, \quad (2.6)$$

где $C_{tm} = d\Theta/dT$ – термическая ёмкость; $\Phi_a = d\Theta/dt$ – поток тепловых зарядов, при этом тепловой поток в современной теории теплопередачи $\Phi = \Phi_a T$.

Всё это потребовало обновления единиц тепловых величин, что показано в Таблице 1. Главным новшеством в Таблице 1 является то, что изменением координаты состояния считается бесконечно малое количество перемещающегося теплового заряда $d\Theta$.

Таблица 1. Единицы тепловых величин современные и обновленные

Наименование физической величины	Символ или формула	Единица измерений	
		обновленная	в СИ
Современная теория теплопередачи			
Элементарное количество теплоты	δQ	-	Дж
Термодинамическая температура	T	-	К
Теплоёмкость	$C = dQ/dT$	-	Дж К ⁻¹
Термическое сопротивление	$R_{tm} = \delta/\lambda S$	-	Вт ⁻¹ К
Термическая проводимость	$Y_{tm} = \lambda S/\delta$	-	Вт К ⁻¹
Коэффициент теплопроводности	λ	-	м ⁻¹ Вт К ⁻¹
Тепловой поток	Φ	-	Вт
Обновленная теория теплопередачи			
Элементарное количество теплоты	δQ	Дж	Дж
Бесконечно малое количество перемещающегося теплового заряда	$d\Theta$	Дж К ⁻¹	К
Температурный напор	ΔT	К	-
Термическая жесткость	$D_{tm} = dT/d\Theta$	Дж ⁻¹ К ²	-
Термическая ёмкость	$C_{tm} = d\Theta/dT$	Дж К ⁻²	-
Термическое сопротивление	$R_{tm} = \delta/aS$	Вт ⁻¹ К ²	-
Термическая проводимость	$Y_{tm} = aS/\delta$	Вт К ⁻²	-
Термическая инертность	I_{tm}	Вт К ⁻¹	-
Коэффициент теплопроводности	$a = \lambda/T$	м ⁻¹ Вт К ⁻²	-
Поток тепловых зарядов	$\Phi_a = d\Theta/dt$	с ⁻¹ К	-

Величина “термическая ёмкость”, отражающая интенсивность изменения теплового заряда в зависимости от изменения температурного напора, заменила современную величину “теплоёмкость”. Используемый в современной теории теплопередачи коэффициент теплопроводности λ вошел в качестве множителя в состав

коэффициента теплопроводности a . Термический поток Φ_a стал представлять собой поток тепловых зарядов, в отличие от теплового потока Φ из современной теории теплопередачи, отражающего лишь интенсивность теплообмена.

В работе [9] появились новые убедительные аргументы, доказывающие, что термическая ёмкость с единицей Дж К⁻² и термическое сопротивление с единицей, равной Дж⁻¹ с К² объективно отражают суть физических явлений. Тогда как используемые сейчас в теории теплопередачи теплоёмкость с единицей, равной Дж К⁻¹, и термическое сопротивление с единицей, равной Вт⁻¹ К, этой сути не отражают и приводят “к множеству дополнительных ненужных вычислений, формул, таблиц, поправочных коэффициентов и оговорок”. В работе [9] приведены свидетельства того, что расчет термического КПД по абсолютным значениям термодинамической температуры T приводит к физическому абсурду и что расчет термического КПД следует вести только по разности температур ΔT .

2.3. Разъяснение понятия "термическая ёмкость".

Пусть в уравнении (2.4) под изменением теплового заряда $d\Theta$ мы будем понимать входящее в систему какое-то количество энергоносителей упорядоченной тепловой формы движения, не отождествляя его с полным изменением теплообмена между системой и средой, то есть с суммой изменений энергий упорядоченного и неупорядоченного теплового движения. И тогда нам приходится прийти к парадоксальному, на первый взгляд, выводу о том, что основная идея теории теплорода оказывается верной, если под теплородом понимать не общее количество вошедшей теплоты, а количество вошедшей тепловой энергии упорядоченного теплового движения, ассоциированное с движением теплового заряда. Именно так и понимал эту ситуацию С.Карно, он не отождествлял тепловую энергию с изменением теплообмена.

В соответствии с такой интерпретацией поток теплового заряда должен рассматриваться не как поток энергии тепловой формы движения, а как поток упорядоченной части тепловой энергии. Именно тепловой заряд и может накапливаться в системе. Поэтому *в тепловой форме движения энергоёмкость системы следует рассматривать, как ёмкость по отношению к тепловому заряду, а не как ёмкость по отношению к общему количеству теплоты.*

Поэтому приведенная в Таблице 1 **термическая ёмкость** $C_{tm} = d\Theta/dT$, имеющая единицу Дж К⁻², отличается от применяемой в современной термодинамике **теплоёмкости** $C = \delta Q/dT$, имеющей единицу Дж К⁻¹. Точно так же бесконечно малое количество тепловых зарядов $d\Theta$, входящее в систему, меньше подведенного к системе элементарного количества теплоты δQ . Входящее в систему количество тепловых зарядов $d\Theta$ является частью количества теплоты δQ .

2.4. Вкратце о термодинамической энтропии в теории теплового заряда.

Мы преднамеренно не включили в Таблицу 1 "термодинамическую энтропию". При этом мы не смешиваем это понятие с понятиями "статистическая энтропия" и "информационная энтропия", имеющими иное содержание. Мы совершенно согласны с А.Вейником [3] и многими другими учеными, считающими введение Р.Клаузиусом энтропии в термодинамику причиной болезни, поразившей термодинамику, от которой она не может излечиться на протяжении уже полутора веков.

Элементарное количество перемещающегося теплового заряда определяется уравнением $d\Theta = \delta Q/\Delta T$, оно не может трактоваться как изменение термодинамической энтропии, определяемой по Р.Клаузиусу уравнением $dS = \delta Q/T$, хотя бы потому, что ΔT и T – это две разные физические величины. Количество теплового заряда $d\Theta$ и изменение термодинамической энтропии dS определяются разными уравнениями связи и, следовательно, имеют разное физическое содержание.

В ряде статей по метрологии (например, в обзорной статье [16]) наличие одинаковых размерностей у теплоёмкости и термодинамической энтропии рассматривается как один из недостатков СИ. Однако СИ в данном случае не при чем. Стремление некоторых ученых к поиску идентичности физического содержания величин на основании идентичности их размерностей или единиц совершенно не обосновано. Физическое содержание величины определяется только уравнением связи, а вовсе не формулой размерности. И если две физические величины различной природы имеют одну и ту же размерность, то причину этого надо искать в неверности уравнения связи одной из этих величин.

3. О единице температуры и единице разности температур.

3.1. В метрологии измеряется разность температур, а не температура.

В разделе 1.4 показано, что разность потенциалов ΔP и потенциал системы P являются разными по своему содержанию физическими величинами. Это относится, соответственно, и к температурному напору ΔT и абсолютной температуре T . В статьях В.Эмерсона [2, 17, 18] уже указывалось на то, что *"разность температур не является величиной той же природы, что и термодинамическая температура, и, возможно, не того же вида"* и что *"все термодинамические температуры являются разностями температур и их следует оценивать с использованием единицы разности температур"*. В статье [16, проблема 9] обращено внимание на то, что компьютерные программы, разрабатываемые для использования в метрологии, к сожалению, не видят различия между T и ΔT .

Наконец, включение тепловой формы движения в обобщенную систему физических величин [8] (см. вторую половину Таблицы 1) оказалось возможным при использовании уравнения (2.4), в котором присутствует именно разность температур ΔT , а не термодинамическая температура T . В современной метрологии различие между температурой и разностью температур пока не учитывается.

3.2. О существующей единице термодинамической температуры.

Решение сделать единицу термодинамической температуры кельвин в СИ условной основной единицей обусловлено историческими причинами, описанными в статье [2], и, прежде всего, наличием измерительной аппаратуры и отлаженных методик измерения.

Единица кельвин была принята в резолюции 3 на 13-ом заседании ГКМВ [19] 1967-1968 г. одновременно и как единица термодинамической температуры, и как единица разности температур. С тех пор менялся только перечень реперных точек на температурной шкале.

Однако в резолюции № 1 24-го заседания ГКМВ [20] в 2011 г. о единице кельвин сказано так: *"кельвин по-прежнему будет оставаться единицей термодинамической температуры, но ее величина будет установлена посредством фиксированного численного значения постоянной Больцмана, равной точно $1,380658 \times 10^{-23}$, на основании выражения единицы СИ $\text{м}^2 \text{кг с}^{-2} \text{К}^{-1}$, которая равна Дж К^{-1} ".* В этой резолюции говорится о кельвине уже только как о единице термодинамической температуры. То есть, доводы, приведенные в статьях [2, 17, 18], и прежнее понимание единицы кельвин [19] не были приняты во внимание.

За пределами дискуссии по определению единицы кельвин остаются еще несколько важных как для физиков, так и для метрологов вопросов, ясных лишь на первый взгляд. Приведенный ниже анализ ответов на эти вопросы приводит к важным выводам.

3.3. Каково определение термина "термодинамическая температура"?

У этой физической величины, как ни странно, нет общепринятого определения. Точнее, определений много, но все они разные. Видимо, не случайно во Введении

Информационного портала ведущего российского метрологического института ВНИИМ им. Менделеева [21] присутствует такая фраза: "Температура – это искусственно введенный в уравнение состояния параметр".

Общим в различных определениях является констатация того факта, что температура – это физическая величина, характеризующая среднюю кинетическую энергию частиц системы W_k , находящейся в состоянии термодинамического равновесия.

В первоисточнике [21] приведено также пояснение, по какой причине для термодинамической температуры используют единицу кельвин, а не единицу джоуль: "Поскольку понятие температуры тесно связано с усредненной кинетической энергией частиц, было бы естественным и в качестве единицы ее измерения использовать джоуль. Однако, энергия теплового движения частиц очень мала по сравнению с джоулем, поэтому использование этой величины оказывается неудобным. Тепловое движение измеряется в других единицах, которые получаются из джоулей посредством переводного коэффициента k ".

Известно также [22], что Л.Больцман измерял температуру в единицах энергии, а это соответствует значению постоянной Больцмана $k = 1$. Сама же постоянная Больцмана введена не им самим, а М.Планком в 1900 г., и М.Планком же рассчитано значение постоянной Больцмана $k = 1,346 \cdot 10^{-16}$ эрг/град.

Из сказанного следует, что применение кельвина в качестве условно введенной в СИ основной единицы обусловлено привычкой измерять температуру в единицах общепринятой температурной шкалы с помощью привычных измерительных приборов. Как следствие, введение в СИ отдельной размерности для температуры Θ привело к труднопонимаемым размерностям, например, к размерности $L^2MT^{-2}\Theta^{-1}$ для теплоёмкости.

3.4. Какой должна быть единица теплового заряда в СИ?

Рассмотрим формулу для расчета кинетической энергии поступательного движения молекулы идеального газа. В кинетической теории газов существует уравнение

$$W_k = 3kT/2 \quad , \quad (3.1)$$

где k – постоянная Больцмана, которая соответствует энергии движения, приходящейся на одну степень свободы молекулы. Если принять такую трактовку за основу, то из уравнения (3.1) следует, что термодинамическая температура T должна быть безразмерностной величиной. Действительно, в соответствии с уравнением (3.1) термодинамическая температура T является отношением кинетической энергии W_k к энергии движения одной степени свободы молекулы k .

Согласно классификации безразмерностных величин, приведенной в работе [23, п. 2.1], термодинамическая температура является критерием подобия [23, п. 2.3]. И тогда выражение $(3k/2) = W_k / T$ является внесистемной единицей для термодинамической температуры [23, п. 2.2]. Отсюда следует вывод, что в середине XX века основной величиной в СИ сделали критерий подобия (термодинамическую температуру), и его единицу назвали кельвин.

А.Вейник [3] высказал идею о том, что тепловой заряд, как координата состояния тепловой формы движения, является квантуемой величиной. Он назвал элементарный тепловой заряд **термоном** (впоследствии в [7] вермионом) и обозначил символом τ , подсчитал его значение, разделив энергию моля газа на число Авогадро. Значение термона оказалось точно в 3 раза большим значения постоянной Больцмана. Из чего следует, что постоянную Больцмана k можно считать одной третью термона τ , а термон можно трактовать, как кинетическую энергию трех степеней свободы молекулы. И тогда уравнение (3.1) можно записать в виде

$$W_k = \tau T/2 \quad . \quad (3.2)$$

Поскольку единицей термона, как и постоянной Больцмана, является Дж K^{-1} , то термодинамическую температуру T следует понимать, как количество термонов в однородной системе. А кинетическую энергию всех упорядоченно движущихся молекул следует трактовать, как половину произведения кинетической энергии одного термона на количество термонов в системе. И тогда **полный тепловой заряд** системы можно считать произведением элементарного теплового заряда τ на количество тепловых зарядов в системе.

К похожему выводу независимо от А.Вейника пришел Д.Ермолаев в работе [9]. В ней единичный тепловой заряд определён как кинетическая энергия теплового движения одной степени свободы или, выражаясь словами автора [9], одной "тепловой частицы".

3.5. Размерность и единица разности температур при обновлении СИ.

Количество элементарных тепловых зарядов в полном тепловом заряде, как и вообще количество элементарных зарядов любой природы в полном заряде, можно измерять в штуках или в квантах [23, п. 3.2]. В статье [24] для количества объектов предложено обобщенное название единицы ent (от слова entity в англоязычном термине "number of entities", что в буквальном переводе на русский язык означает "количество сущностей", а в приближенном переводе – "количество объектов"). Так что в переводе на русский язык единица ent является сокращением слова "объект". Соответственно, при обновлении СИ размерностью температурного напора (разности температур) должна быть размерность количества объектов с символом N [13, 23].

Тем самым подтверждается отсутствие необходимости введения в систему величин ISQ специальной величины "термодинамическая температура" со своей отдельной размерностью. Просто кельвин является еще одной единицей основной величины "количество объектов", но с другим численным значением, чем единица ent.

Основной величиной при обновлении СИ в трактовке работ [13, 23] должна стать энергия с размерностью E. Если использовать предлагаемые нами символы размерностей энергии E и количества объектов N, то правило размерностей в уравнениях (3.1) и (3.2) в обновленной СИ будет соблюдаться при размерности термона τ (а также постоянной Больцмана k), равной EN^{-1} , чему соответствует единица Дж ent $^{-1}$ (Дж квант $^{-1}$ или Дж шт $^{-1}$). В существующей СИ правило размерностей в уравнениях (3.1) и (3.2) соблюдается при условии, что единицей k и τ будет Дж K^{-1} . То есть единицы постоянной Больцмана и термона совпадают.

Кельвин, равный по значению градусу Цельсия, – это квант разности температур, равный одной сотой доле разности температур между точкой таяния льда и точкой кипения воды. Если бы, например, было бы решено считать кельвин одной пятидесятой долей этого интервала температур, то значение кельвина было бы в два раза больше.

Правда, уже после того, как к точке таяния льда было официально привязано значение 273,15 K, выяснилось, что разность температур точек таяния льда и кипения воды немного меньше 100 K. То есть говорить о сотой доле разности температур между температурой таяния льда и температурой кипения воды, строго говоря, уже нельзя. Подобная ситуация лишней раз подтверждает опасность административной привязки определений единиц к физическим константам, о чем убедительно сказано в статье [25]. История с привязкой значения кельвина к температуре таяния льда как раз и свидетельствует о такой опасности.

Приведенная трактовка термодинамической температуры и разности температур приводит, как об этом свидетельствует Таблица 1, к необходимости существенных изменений единиц величин в тепловой форме движения. Можно, конечно, оставить всё, как есть, но это будет равносильно затягиванию болезни, которой уже давно страдает теория теплопередачи.

3.6. Температура согласно существующей температурной шкале.

Сегодня для измерения температуры существует Международная температурная шкала МТШ-90, которая, собственно, является не шкалой, а стандартом для калибровки измерительного оборудования. Эта шкала имеет 6 интервалов температуры от 0,65 К до ∞ , причем эти интервалы настолько отличаются друг от друга, что их удобно сравнивать лишь с помощью логарифмической шкалы.

Молекулярно-кинетическая теория газов, для обслуживания которой введено понятие "термодинамическая температура", изучает макровещество в сравнительно небольшом диапазоне температур, а сверхнизкие и сверхвысокие температуры оцениваются с помощью других разделов физики. Эти разделы физики изучают уже не только вещество, но и электромагнитное поле, и другие структурные уровни материи. И поэтому для других уровней прилагательное "термодинамическая" к термину "температура" уже не релевантно.

Перейдем к вопросу о содержании понятия "температура" на других уровнях структуры материи.

4. Тепловой заряд и уровневая физика.

4.1. Температура на разных уровнях структуры материи.

Прежде, чем говорить об уровнях структуры материи, следует хотя бы бегло ознакомить читателя с понятием "уровневая физика".

Уровневая физика – сравнительно новое научное направление, интенсивно развивающееся с конца XX века. Хотя еще в середине XX века А.Вейник [3] призывал различать "уровни общей картины мироздания: субмакромир, макромир, микромир, субмикромир и т.д.". Он писал: "Каждая элементарная форма движения одновременно присуща всем уровням мироздания. При этом переход с одного уровня на другой (от одних количественных характеристик системы к другим) сопровождается не только количественными, но и качественными изменениями движения".

В настоящее время уровневая физика постепенно превращается в стройную систему взглядов. Уровневая физика рассматривает общие черты явлений на разных уровнях структуры материи с точки зрения единой обобщенной картины. Уровневый подход идет на смену линейному подходу, при котором данные об окружающем нас мире собираются и анализируются без рассмотрения общих черт, их объединяющих.

Философское содержание уровневой физики раскрыто достаточно полно в работе [26]. А взгляд физика на уровневое строение структуры материи приводится в работе [27]. Особое внимание в работе [27] уделяется вихревому строению материальных объектов на любом уровне структуры материи. Вихревая природа материальных объектов учтена и при анализе набора естественных основных величин в работе [13]. Схема иерархии уровней структуры материи, приведенная в работе [27], потребовала бы пояснений, содержание которых выходит за пределы статьи по метрологии. Поэтому на рис. 1 приведена упрощенная схема, удобная тем, что на ней имеется температурная ось.

Схема дает качественное представление о физическом содержании уровней и подуровней структуры материи, количественные соотношения соблюдаются на ней лишь ориентировочно в соответствии с состоянием физики космоса на сегодняшний день. На схеме E_{fix} – энергия связи компонентов в системе, определяемая по уравнению

$$E_{fix} = \sum_i (E_{fix} - E) , \quad (4.1)$$

где E_{fix} – полная энергия i -го компонента в несвязанном состоянии и E – полная энергия связанной системы.

Уровневая физика считает, что физическое содержание компонентов на разных уровнях структуры различно. С точки зрения метрологии каждый компонент на любом уровне представляет собой оригинальный материальный объект, и количество компонентов измеряется в единицах количества объектов. Поэтому размерность энергии связи E_{fix} равна EN^{-1} .



Рис. 1 Иерархическая схема уровневого строения материи

Согласно схеме уровень "вещество", в рамках которого применяется современная термодинамика, занимает весьма малую долю того, что считают материей. В реальных

цифра температурная шкала МТШ-90 рассматривает температуру до 1234,93 К. Но именно вещество заполняет нашу Землю и окружающую ее среду, именно с него человечество начало изучать материю, именно веществу посвящена большая часть имеющейся научно-технической литературы. Что касается современной термодинамики с ее термодинамической температурой, то она изучает лишь небольшой подуровень "макроевещество", именно на этом уровне тепловой заряд измеряется в термонах.

На других уровнях и подуровнях в качестве компонентов существуют энергоносители и элементарные заряды, присущие только рассматриваемому уровню, они имеют своё собственное строение и свою энергию связи. Температуру на других уровнях уже нельзя назвать термодинамической, ибо состояние других уровней должны изучать другие разделы физики. Единицу кельвин можно сохранить лишь условно, чтобы была возможность численного сравнения. Но числовые значения элементарного теплового заряда от уровня к уровню и от подуровня к подуровню изменяются на порядки. Чтобы лучше представить себе это, можно сравнить такие энергоносители, как космические тела на нижнем подуровне и нейтрино на верхнем подуровне.

Количество энергии элементарного теплового заряда на каждом уровне является фундаментальной физической константой для этого уровня. Чем выше уровень на схеме, тем меньше размеры его элементарного теплового заряда, тем больше количество энергоносителей, содержащих тепловые заряды, и тем больше энергия движения каждого элементарного теплового заряда. Следовательно, чем выше уровень, тем выше температура T , так как она является мерой количества тепловых зарядов.

Показания на обеих осях схемы условны, но по характеру близки к логарифмическим. Это означает, что температурная ось на этой схеме не имеет ни начала, ни конца, и что говорить о температуре, равной 0, и, тем более, об отрицательной температуре не имеет смысла. А вот разность температур может быть как положительной, так и отрицательной. Можно говорить лишь о пределах возможностей науки измерять сверхнизкие и сверхвысокие значения температуры.

Приведем примеры трактовки температуры на уровне "Излучение".

4.2. Закон смещения Вина подтверждает единицу постоянной Больцмана.

Закон смещения Вина описывает тепловое излучение, которое является частным случаем электромагнитного излучения в определенном диапазоне длин волн. Энергоносителями являются сами волны, а единичным тепловым зарядом на этом уровне является энергия одной волны. В данном случае количество единичных зарядов тоже измеряется в ent (квантах, штуках), только единице ent соответствует одна волна.

Закон смещения Вина относится к зависимостям испускательной способности абсолютно черного тела от изменения длины волны теплового излучения λ . Он устанавливает связь между температурой абсолютно черного тела T , называемой также **радиационной температурой**, и длиной волны теплового излучения λ_m , соответствующей экстремуму (максимуму) этой зависимости.

Закон Вина обычно записывают в таком виде:

$$T\lambda_m = b, \quad (4.2)$$

где b – постоянная Вина, равная 0,002899 м К. Однако единица постоянной Вина b нуждается в уточнении.

Как было показано в работе [23, раздел 5.5], размерность длины волны равна LN^{-1} , а единицей является м ent⁻¹ (на уровне "Излучение" – м волна⁻¹, так как энергоносителями являются волны). Следовательно, единица b равна м К ent⁻¹ (м К волна⁻¹), то есть это длина волны, соответствующей λ_m , при радиационной температуре T в кельвинах.

Постоянную Вина можно расшифровать в виде функции от фундаментальных физических констант

$$b = hc/x_b k , \quad (4.3)$$

где h – постоянная Планка; c – скорость света в вакууме, k – постоянная Больцмана, x_b – безразмерная физическая константа в виде числового множителя, равного 4,965. Анализ уравнения (4.3) показывает, что при единице постоянной Планка h Дж с ent^{-1} (в данном случае Дж с волна⁻¹ [23, раздел 5]) постоянная Больцмана k в уравнении (4.3) имеет единицу Дж К⁻¹, как и было показано в разделе 3.5.

4.3. Новая трактовка закона теплового излучения Планка.

В законе излучения Планка, определяющего испускательную способность абсолютно черного тела (АЧТ), присутствует безразмерный множитель

$$1/[\exp(h\nu/kT) - 1] , \quad (4.4)$$

определяющий физическое содержание этого закона (ν – частота излучения). В этом множителе выделим критерий подобия

$$x_{pl} = h\nu/kT . \quad (4.5)$$

Если понимать знаменатель (kT) этого критерия как энергию, переносимую волнами излучения АЧТ в низкочастотном диапазоне, то он должен выглядеть иначе, а именно в виде ($n_w kT$), где n_w – это число волн теплового излучения АЧТ. Точно так же числитель ($h\nu$) этого критерия следует понимать, как энергию, переносимую фотонами, излучаемыми АЧТ в высокочастотном диапазоне. И поэтому в числителе критерия x_{pl} должно находиться выражение ($n_{ph} h\nu$), в котором n_{ph} – это количество фотонов, излучаемых АЧТ. И критерий подобия x_{pl} должен быть записан не так, как в (4.5), а в виде выражения

$$x_{pl} = (n_{ph} h\nu)/(n_w kT) . \quad (4.6)$$

В такой записи x_{pl} приобретает следующее физическое содержание: это отношение энергии количества фотонов n_{ph} , испускаемых АЧТ к энергии какого-то числа электромагнитных волн n_w , испускаемых в тепловом диапазоне тем же АЧТ. И тогда для единицы критерия подобия [x_{pl}] справедливо следующее равенство:

$$[x_{pl}] = (\text{Дж фотон}) (\text{Дж волна})^{-1} = \text{фотон волна}^{-1} .$$

Так как единицы, называемые "волна" и "фотон", – это частные случаи единицы ent (квант, штука), то становится ясно, что критерий подобия x_{pl} включает в себя в качестве множителя другой критерий подобия (n_{ph}/n_w), который и определяет физическое содержание закона излучения Планка. Этот вывод важен потому, что при отсутствии в современной записи закона излучения Планка критерия подобия (n_{ph}/n_w) как бы по умолчанию предполагается, что критерий подобия (n_{ph}/n_w) равен 1, хотя он может быть равен 1 лишь в частном случае.

При применении критерия (n_{ph}/n_w) становится осязаемым смысл невозможности "ультрафиолетовой катастрофы", вытекающей из формулы Рэля-Джинса. Ведь суммарная энергия излучения АЧТ состоит из двух слагаемых: энергии теплового излучения в виде энергии электромагнитных волн в тепловом диапазоне и энергии излучаемых АЧТ фотонов, являющихся частицами, а не волнами. Несмотря на то, что скорость распространения электромагнитных волн в вакууме и скорость фотонов в вакууме одинаковы, фотон и волна – это два различных энергоносителя с различными

физическими свойствами. В частности, диссипативное поглощение энергии электромагнитных волн и диссипативное поглощение энергии фотонов в любой среде существенно отличаются друг от друга.

В низкочастотном диапазоне излучение АЧТ состоит преимущественно из электромагнитных волн. Чем выше частота, тем больший процент при излучении составляют фотоны, а энергия теплового излучения падает в процентном выражении до тех пор, пока не становится неощутимой. Суммарная же энергия излучения, включающая энергию излучаемых фотонов, растет постоянно, как с ростом частоты, так и с ростом температуры излучающего АЧТ.

Заметим, что кривые на графиках зависимости энергетической светимости от длины волны, имеющие максимум при λ_m (по закону Вина), относятся только к энергии теплового излучения, то есть только к одному из слагаемых суммарной энергии излучения АЧТ.

При условии $x_{pl} \ll 1$, то есть на нижнем пределе частотного диапазона инфракрасного излучения, формула Планка переходит в формулу Рэлея-Джинса, определяющую равновесную плотность теплового излучения, исходя из статистического представления о равномерном распределении энергии по степеням свободы. Отсюда следует вывод о том, что представление энергии излучения фотонов с помощью выражения (kT) релевантно лишь на уровне вещества.

Важно еще одно следствие. Трактовка критерия подобия x_{pl} в виде (4.6) отрицает существование корпускулярно-волнового дуализма.

В итоге приведено еще одно доказательство важности и необходимости введения в набор основных величин количества объектов с размерностью N и единицей ent (квант, штука, волна, фотон и т.п.) [13, 23].

5. Выводы.

1. Показано, что теория теплового заряда, раскрывающая суть изменений единиц тепловых величин, разработана более полувека назад, но, к сожалению, не замечается (а, возможно, и игнорируется) современной физикой и современной метрологией.

2. Разъясняется различие между понятиями "количество теплоты" и "тепловая энергия", последнее дается в трактовке С.Карно.

3. Раскрыто физическое содержание электротепловой аналогии, позволяющей применить обобщенные уравнения переходного процесса к тепловой форме движения.

4. Приводится модификация закона Фурье, позволяющая применить методы обобщения и систематизации физических величин для тепловой формы движения.

5. Составлена таблица единиц тепловых величин, соответствующая закону Фурье в модифицированной записи, эти единицы отличаются от современных единиц тепловых величин.

6. Утверждается, что единица кельвин должна быть единицей прежде всего разности температур (температурного напора).

7. Доказано, что единица кельвин является внесистемной единицей критерия подобия, каким является термодинамическая температура.

8. Раскрыто физическое содержание элементарного теплового заряда и его единицы.

9. Пояснено, что единица кельвин является частным случаем единицы количества объектов с административно назначенным числовым значением.

10. Приводится трактовка температуры с точки зрения уронево́й физики.

12. В качестве примера использования количества объектов в квантовой оптике приводится обновление записи закона теплового излучения Планка.

Литература

- [1] Einstein A., Infeld L., 1963. The Evolution of Physics. (Эйнштейн А., Инфельд Л. Эволюция физики. – М.: Наука, 1965.)
- [2] Emerson W. H., 2012. Some Illogicalities of the SI. *MetrologyBytes.net*, 6 p.
- [3] Вейник А.И., 1968, Термодинамика. 3-е изд. – Минск, Высшая школа, 464 с.
- [4] Львов И.Г., 2004, Что такое тепловой заряд? – <http://www.sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/7339.html>
- [5] Veinik A.I., 1964. Thermodynamics. A generalized approach. Jerusalem, Israel Program for Scientific Translations. [available from the Office of Technical Services, U.S. Dept. of Commerce, Washington]. 259 p.
- [6] Veinik A.I., 1968. Thermodynamics for the foundry man. Edited by H. K. Barton. London: Maclaren, 353 p.
- [7] Вейник А.И., 1991. Термодинамика реальных процессов. Минск, Наука і тэхніка.
- [8] Коган И.Ш., 1998. О возможном принципе систематизации физических величин. – *Законодательная и прикладная метрология*, **5**, с.с. 30-43.
- [9] Ермолаев Д.С., 2008. Тепловой заряд и обобщение теплофизики. – М: «Компания Спутник+», Актуальные проблемы современной науки. №4(43), с.89.
- [10] Яворский Б.М., Детлаф А.А., 1990, Справочник по физике. 3-е изд. М.: Наука, Физматгиз, 624 с.
- [11] Коган И.Ш., 2009. Систематизация и классификация определений и дополнений к понятию "энергия". *Автоматизация и ИТ в энергетике*, **2-3**, с.с. 56-63, а также <http://www.physicalsystems.org/index03.1.09.html>
- [12] Сивухин Д.В., 2005. Общий курс физики. т.2. Термодинамика и молекулярная физика. 5-ое изд. М.: Физматлит. 544 с.
- [13] Коган И.Ш., 2015. Альтернативный путь к Новой СИ. (Часть 2. О необходимости изменения набора основных величин). – *Законодательная и прикладная метрология*, **2**.
- [14] Физический энциклопедический словарь, под ред. А.М.Прохорова.
- [15] Коган И.Ш., 2011. Число структурных элементов как основная физическая величина. – *Мир измерений*. **8**, с.с. 46-50, а также <http://www.physicalsystems.org/index08.04.engl.html>
- [16] 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
- [17] Emerson W. H., 2005. On the concept of dimension. *Metrologia*, **42**, L21–22
- [18] Emerson W. H., 2008. On quantity calculus and units of measurement. *Metrologia*, **45**, p.p.134-138
- [19] BIPM 1998 *Le Syst`eme International d'Unit'es* 7th edn (S`evres: Bureau International des Poids et Mesures)
- [20] 24th meeting of the General Conference on Weights and Measures (2011). About future revision of the International System of Units, the SI.
- [21] Информационный портал по измерению температуры, 2007-2011. Введение. Понятие температуры и температурной шкалы. <http://temperatures.ru/mtsh/mtsh.php>
- [22] Томилин К.А., 2006. Фундаментальные физические постоянные в историческом и методологическом аспектах. – М.: Физматлит. 368 с.
- [23] Коган И.Ш., 2015. Альтернативный путь к Новой СИ. (Часть 1. О единицах с размерностью one). – *Законодательная и прикладная метрология*, **1**.
- [24] Leonard B., 2014. Comments on 'Units for Dimensionless Counting Quantities, Enumeration, and Chemical Concentration' CCU/13-09.3., *MetrologyBytes.net*, Documents, Other Papers, Lectures and Official Documents. 5.
- [25] Price G., 2011. A sceptic's review of the New SI. *Accred Qual Assur.*, **16** (3), p.p. 121-132
- [26] Бондаренко О.Я., 2005. Уровневая физика. Что это? Бишкек, 96 с.

[27] Пакулин В.Н., 2011. Структура материи. Вихревая модель микромира. С-Пб, НПО «Стратегия будущего», 65 р. а также <http://valpak.narod.ru/>