

Энергия как основная физическая величина

Аннотация. Анализируются существующие определения энергии. Показывается, что энергия как скалярная величина является лишь модулем векторной величины, которую можно назвать словом “движение”, и тогда закон сохранения энергии является частным случаем закона сохранения движения. На базе этих представлений обосновывается утверждение, что основной физической величиной должна быть энергия. Импульсом движения является другая векторная величина, модулем которой является действие. Рассматриваются метрологические проблемы, связанные с признанием энергии основной величиной.

1. Краткий исторический обзор определений энергии

Об основополагающем значении энергии (от греч. *energeia* - действие, деятельность) как физической величины говорил еще в начале XX века французский физик 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”.

В естественных системах единиц, появившихся еще в XIX веке [1], в числе единиц основных величин в скрытом виде присутствует единица энергии. Например, в первой естественной системе единиц, основанной только на физических постоянных, предложенной в 1874 г. ирландским физиком Дж. Стони, одной из основных единиц была единица элементарного электрического заряда e . Известно, что в размерности единиц электрического заряда и электрического тока входит в скрытом виде единица энергии.

Популярной оказалась предложенная немецким физиком М. Планком в 1897 г. естественная система единиц. Она базировалась на постоянной Планка h , электродинамической постоянной c , гравитационной постоянной G и постоянной Больцмана k . Постоянные h и k были введены М. Планком впервые. Постоянная Планка h представляет собой элементарный квант физической величины, которую впоследствии американский физик Р. Фейнман назвал “действием”.

Важной особенностью естественной системы единиц М. Планка является то, что единицы ее констант при выражении их через единицы СИ включают в себя единицу энергии “Джоуль (Дж)”. Например, единицей постоянной Планка h является “Джоуль-секунда (Дж·с)”, единицей постоянной Больцмана k является “Джоуль на Кельвин (Дж/К)”, а единицей массы является килограмм, равный “Джоуль-секунда в квадрате на метр в квадрате (Дж·с²/м²)”. Всё это говорит о том, что в системе единиц М. Планка единица энергии является единицей основной величины в разных сочетаниях. В квантовой механике замена единицы массы на единицу энергии уже произошла. Там массу элементарных частиц измеряют в “электрон-Вольтах”, то есть в единицах энергии.

Проанализировав тенденции развития естественных систем единиц, базирующихся на фундаментальных физических константах (ФФК), автор [1] полагает, что количество ФФК, принятых в качестве основных, должно быть равно **пяти**. Кроме c , h , k и m_e (масса электрона), недостающей пятой ФФК, по мнению автора [1], должен быть “некоторый фундаментальный масштаб энергии”.

В 60-х годах XX века А. Вейником [2] было создано новое научное направление – энергодинамика. Ее автор об энергии сказал так: “самой общей и вместе с тем наиболее естественной (и простой) характеристикой движения является энергия”.

В. Эткин [3], детально разработавший теоретический аппарат энергодинамики, обосновывает идею считать энергию основной физической величиной такими словами: “... если в механике энергия рассматривается в качестве одного из интегралов движения,

то в энергодинамике она становится основной величиной, вводимой на основании опыта“. В другой его работе [4] говорится о том, что “... энергия становится количественной мерой всех (упорядоченных и неупорядоченных, внешних и внутренних, полезных и диссипативных) работ, которые может совершить система“.

На рубеже XX и XXI веков стало развиваться новое научное направление – уровневая физика. Ее сторонник и пропагандист В.Пакулин [5, 6] считает: “Энергия – единственная универсальная для всех уровней величина, которая сохраняется при всех взаимопревращениях“.

2. Устоявшиеся определения энергии

Согласно Большой Советской Энциклопедии энергия – это “общая количественная мера движения и взаимодействия всех видов материи. Понятие энергии связывает воедино все явления природы“. Главные слова в этом определении с точки зрения метрологии: “количественная мера движения“.

В метрологическом справочнике [7] определение энергии звучит конкретнее: “Энергия – скалярная физическая величина, являющаяся общей мерой различных форм движения материи“. В этом определении нет слов “количественная мера“.

Несмотря на приведенное выше в самых разных первоисточниках единодушие по поводу того, что энергия является самой главной величиной в физике, в метрологии пока не обсуждают проблему признания энергии основной физической величиной. По нашему мнению, причиной этому служат два обстоятельства. Во-первых, отдельные формы и виды энергии имеют свои определяющие уравнения, а основная физическая величина не может иметь определяющего уравнения. Поэтому она и основная, а все остальные – производные. Во-вторых, каждая основная величина должна иметь свой образцовый измерительный эталон, а для энергии пока создать его практически невозможно.

3. История предложений считать энергию основной величиной

Идея включить энергию в состав основных физических величин была высказана, по-видимому, впервые в учебном пособии И.Когана [8, табл. 1], в котором с целью систематизации физических величин в рамках теории физических аналогий основной величиной было предложено считать обобщенную работу с единицей “Джоуль (Дж)“ и со своим собственным символом размерности E .

Но затем автор [8] пришел к выводу, что работа силы является энергетическим воздействием на систему лишь в механической прямолинейной форме движения, и поэтому в дальнейшем в качестве основной физической величины уже принимал саму энергию, оставив для нее тот же символ размерности E . Понимая невозможность создания измерительного эталона энергии, он предложил в статье [9] считать энергию основной физической величиной в системе физических величин, а не в системе единиц. Принципиальные различия между системами величин и системами единиц подробно разъяснены им в статьях [10, 11].

Основываясь на признании энергии основной величиной, И.Коган [12] создал энергодинамическую систему физических величин и понятий (ЭСВП). В том же ключе выдержана и работа Д.Ермолаева [13], в которой он также считает энергию основной физической величиной.

Автор [11] считает, что реализация идеи систематизации физических величин с опорой только на явления Природы возможна при базировании на **естественные основные величины**, которые не привязаны к существующим системам единиц. А все производные величины, условно принятые основными величинами в разных системах единиц, можно выразить через естественные основные величины. И первой из естественных основных величин должна быть энергия.

Для естественных основных величин не обязательно наличие измерительных эталонов [11]. Это, разумеется, не означает, что такие измерительные эталоны не могут

быть созданы в принципе или не будут созданы впоследствии. В конце данной статьи приведены соображения по этому поводу.

4. Энергия – естественная основная физическая величина

Для изучения и осмысления физических законов природы необходима систематизация физических величин, а не только унификация их единиц. И эта систематизация должна проводиться по определяющим уравнениям, базирующимся на принципе причинности, а не подчиняющимся практической целесообразности. Что же касается размерностей величин – это результат анализа определяющих уравнений и база для проверки правильности экспериментально и теоретически установленных зависимостей. И не больше. Интересно, что на практике анализ размерностей физики и инженеры проводят не столько с помощью размерностей, сколько с помощью единиц, так нагляднее.

Автор данной статьи убежден, что систематизация физических величин больше, чем кому бы то ни было, необходима педагогам и в школе, и в вузе. Правда, экономически это не обосновать, рентабельность применения систематизации физических величин в педагогике не просчитать, поэтому и не обращается на это особое внимание.

Автором [11] предложена система естественных основных величин ELANT, содержащая **пять** величин: энергию с размерностью E , протяженность с размерностью L , время с размерностью T , угол поворота с размерностью A [14] и число структурных элементов с размерностью N [15]. Эта система величин базируется на структурной схеме строения материи, изображенной на рис. 1 [11]. Ее краткое содержание таково.

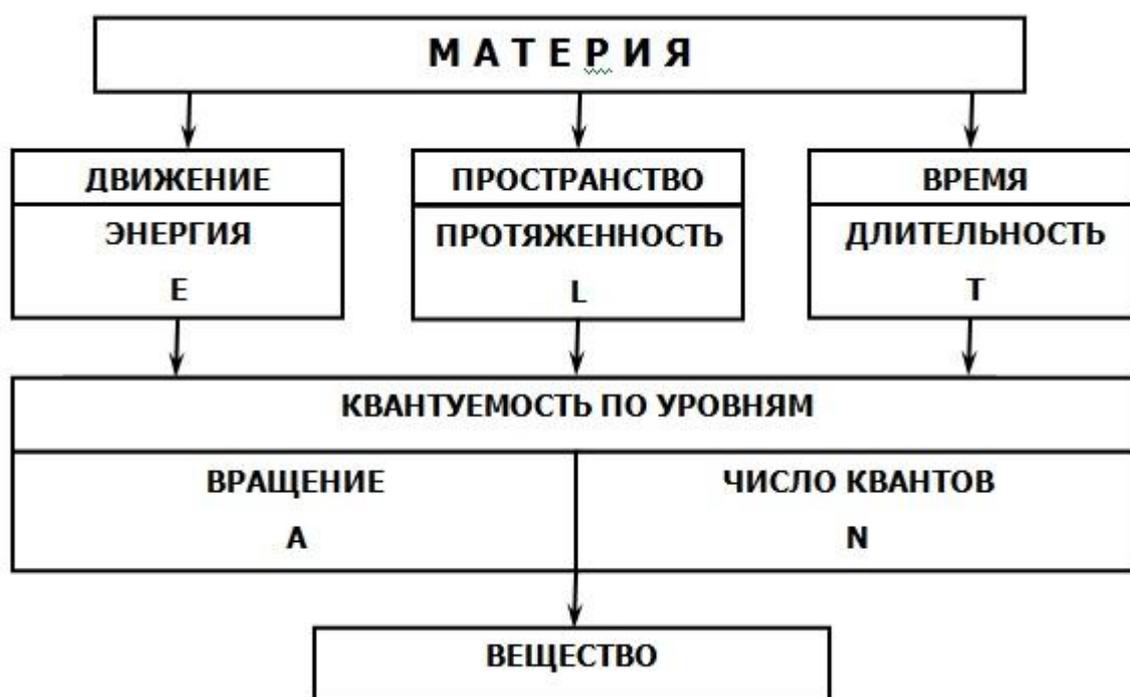


Рис. 1 Структурная схема строения материи

Основным свойством материи является **движение**, количественно характеризуемое **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. Поэтому эти четыре физические величины и являются естественными основными величинами.

В статье [11] приведена иерархия уровневого строения материи. Из нее видно, что переход от более высокого уровня к более низкому уровню характеризуется тем, что материальные объекты более энергичные, меньшие по линейным размерам и с большими угловыми скоростями вращения, объединяются в объекты менее энергичные, большие по линейным размерам и с меньшими угловыми скоростями вращения. Каждый уровень строения материи 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, более крупные, чем квант, состоят из целого числа структурных элементов (квантов) этого уровня (символ размерности N).

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

5. Энергия не имеет своего определяющего уравнения

Энергия, являющаяся характеристикой движения в целом, является основной физической величиной и определяющего уравнения не имеет. А отдельные формы и виды энергии являются производными величинами и имеют свои определяющие уравнения. Наличие определяющих уравнений у отдельных форм и видов энергии не препятствует тому, чтобы считать энергию основной величиной. Точно так же, как наличие определяющих уравнений для длины окружности или для расстояния от Солнца до планет не препятствует тому, чтобы считать основной величиной длину.

Такие виды энергии, как потенциальная и кинетическая, в метрологическом справочнике [7] обозначаются даже собственными символами – P и T .

К такому виду энергии, как энергия покоя E_0 относится знаменитая формула Эйнштейна $E_0 = mc^2$. Энергия покоя является своего рода потенциальной энергией. Из формулы Эйнштейна следует, что массу m можно рассматривать, как производную величину по отношению к энергии покоя, или $m = E_0 / c^2$. Сама же энергия покоя является лишь составляющей полной энергии E движущейся массивной частицы, обладающей массой m . Второй составляющей полной энергии движущейся массивной частицы является ее кинетическая энергия. Что касается другого более известного вида формулы Эйнштейна $E = mc^2$, то он является не более чем историческим недоразумением, о чем весьма обстоятельно написано в работе [16].

Энергия является аддитивной величиной в отличие от массы, аддитивной величиной не являющейся. Это является важным аргументом в пользу необходимости замены массы в качестве основной физической величины энергией.

6. Поток энергии – скалярная или векторная величина?

Во многих первоисточниках энергия определяется, как “количественная мера движения“. Эти слова мешают полноценно охарактеризовать движение тела, потому что нет в подобных определениях энергии признаков, указывающих на направление

движения. Энергия, как скалярная величина, характеризует движение только количественно.

Однако в физике имеются векторные величины, в определяющее уравнение которых входит энергия. Это, например, вектор Пойнтинга и вектор Умова. Поэтому возникает необходимость выяснить, какое отношение имеют эти векторы к общепринятому сейчас пониманию энергии, как скалярной величины.

В популярном учебнике по физике [17, кн. 4], как и в других учебниках, поток энергии волновой формы движения Φ в упругой среде считается скалярной величиной и определяется как производная по времени от приращения энергии dW в виде

$$\Phi = dW/dt . (1)$$

После записи этого уравнения в учебнике сказано, что “для характеристики течения энергии вводится векторная величина, называемая **плотностью потока энергии**“ \mathbf{j} и приводится формула для определения модуля этой величины

$$j = \Phi / V, (2)$$

где V – объём цилиндра, в основании которого лежит сечение потока энергии, а высота определяется фазовой скоростью волны v . Это приводит к формуле

$$j = wv, (3)$$

где $w = W/V$ – объёмная плотность энергии.

Лишь после этого в [17] указывается на то, что фазовая скорость \mathbf{v} является векторной величиной, и поэтому плотность потока энергии \mathbf{j} тоже является векторной величиной, называемой вектором Умова, который определяется уже векторным уравнением

$$\mathbf{j} = w\mathbf{v} . (4)$$

То, что фазовая скорость \mathbf{v} является векторной величиной, очевидно изначально. И формула (2) изначально должна быть записана в виде $\mathbf{j} = \Phi/V$. Так что и поток энергии Φ является вектором также изначально. Поэтому определяющее уравнение для него должно выглядеть не в виде (1), а в виде:

$$\Phi = dW/dt , (5)$$

что подтверждает направленность приращения энергии dW .

В не менее популярном справочнике по физике [18] приращение потока энергии $d\Phi$ считается скалярной величиной на основании уравнения

$$d\Phi = w (\mathbf{v} d\mathbf{S}) = (\mathbf{j} d\mathbf{S}) , (6)$$

где $d\mathbf{S}$ – вектор площадки dS . Однако напомним, что вектор площадки – это не физическая величина, а математическая величина векторного анализа, то есть абстрактная величина, вводимая в качестве вектора условно.

Итак, приращение энергии dW является вектором. Остается выяснить, какой величиной является сама энергия: скалярной или векторной.

7. Энергия – это модуль векторной физической величины

В термине “энергодинамика“ как бы слились два слова: “энергия“ и “движение“. Движение, как физическое явление, является по философскому определению, внедренному в наше сознание, *формой существования материи*. Понятие “движение“ можно рассматривать, как относящееся к любому физическому явлению. С точки зрения физики движение является главным свойством материи в данном месте и в данный момент времени.

Любая характеристика, любое свойство материального мира является физической величиной. И движение, как свойство материи, также является физической величиной, характеризующей материю. При этом движение характеризует материю и количественно, и качественно. Энергия же, согласно принятому в БСЭ определению, характеризует движение только количественно. Зато по определению из [7] энергия является мерой движения, то есть должна характеризовать еще и качественно.

Мы полагаем, что качественной характеристикой движения должно быть направление движения. Из чего следует, что движение, как физическая величина, должно быть векторной величиной. А энергия, как количественная мера движения, является модулем движения.

Поскольку энергия (модуль движения) уже имеет обозначение W , то ничего не остается, как обозначать векторную величину “движение“ символом \mathbf{W} . А символу размерности энергии (движения) меняться незачем, им остается буква E .

Приведенные рассуждения выглядят необычно, хотя найти обоснованные возражения им не так просто. Можно возразить, что у векторной величины и ее модуля названия обычно одинаковы (исключения из этого правила бывают очень редко). Если следовать этому правилу, то главное свойство материи (форму существования материи) надо называть энергией, а не движением. Либо энергию переименовать в движение. И то, и другое тоже необычно. Логичнее всего оставить такую пару величин: движение \mathbf{W} и энергия W . Впрочем, до реального воплощения в жизнь предложений автора данной статьи ждать придется, видимо, еще долго.

8. Трактовка законов сохранения

В соответствии со сказанным закон сохранения энергии следует считать следствием *закона сохранения движения*. Это означает, что при движении должно сохраняться не только количество энергии W , но и направление движения, то есть направление вектора движения \mathbf{W} .

В соответствии с таким толкованием закона сохранения движения любое спонтанное изменение направления движения должно сопровождаться таким же изменением направления движения с другим знаком, но с тем же модулем, чтобы суммарное значение движения, как векторной величины, осталось прежним. В частности, на этом основано, например, одновременное возникновение двух разнонаправленных вихрей с одинаковой по значению энергией вращательного движения.

Именно поэтому закон сохранения импульса и закон сохранения момента импульса, как векторных величин, вытекают из закона сохранения движения, как векторной величины, в качестве его следствий. Как и закон сохранения энергии.

9. Существующее определение действия, как физической величины

Понимание энергии как модуля векторной величины “движение“ по-новому раскрывает физическое содержание действия, как физической величины.

Действие, как скалярную физическую величину, ввел в физику Р.Фейнман. Действие часто обозначается символом H . Определение этой величины приведем по метрологическому справочнику [7]: “Действие – физическая величина, имеющая размерность произведения импульса на перемещение или энергии на время“. Но приведенное определение действия является лишь словесной формулировкой уже

имеющегося определяющего уравнения. Такое определение не раскрывает физическое содержание действия. Из определения в [7] ясно лишь, что действие является скалярной величиной.

10. Действие – это тоже векторная величина

Рассмотрим произведение движения \mathbf{W} , как векторной величины, на элементарный промежуток времени dt , обозначив его приращением векторной величины $d\mathbf{H}$:

$$d\mathbf{H} = \mathbf{W} dt . (6)$$

Сравним уравнение (6) с известным из механики уравнением для определения приращения импульса силы $d\mathbf{S}$:

$$d\mathbf{S} = \mathbf{F} dt . (7)$$

По аналогии с приращением импульса силы $d\mathbf{S}$ можно назвать $d\mathbf{H}$ из уравнения (6) приращением импульса движения \mathbf{W} . Единица действия, как импульса движения, судя по уравнению (6), равна “Джоуль-секунда (Дж·с)“.

Как видим, единицы действия и импульса движения совпадают, и это совпадение не случайно. Одна и та же размерность и одна и та же единица должны принадлежать физическим величинам одной и той же природы.

Если разделить обе части уравнения (6) на величину с единицей длины, то мы как раз и приходим к уравнению (7) для определения приращения импульса силы в механике. Так что у нас есть веское основание полагать, что действие является векторной величиной, а физическое содержание действия заключается в том, что оно является импульсом движения, как векторной величины. А та скалярная величина “действие“ H , которую ввел Р.Фейнман, является модулем векторной величины “действие“ \mathbf{H} .

Таким образом, приращение импульса силы $d\mathbf{S}$ и равное ему приращение импульса $d\mathbf{p} = m d\mathbf{v}$ являются всего лишь частными случаями приращения действия $d\mathbf{H}$.

Еще один очень важный вывод из сказанного: квантом действия \mathbf{H} , как векторной величины, является векторная величина \mathbf{h} , модулем которой является введенная более 100 лет тому назад постоянная Планка h .

Можно также разделить обе части уравнения (6) на величину с единицей углового перемещения, и тогда мы приходим к уравнению для определения приращения импульса вращающего момента $d\mathbf{S}_M$ при вращательном движении:

$$d\mathbf{S}_M = \mathbf{M} dt , (8)$$

где \mathbf{M} – вращающий момент. Поэтому можно считать, что приращение импульса вращающего момента $d\mathbf{S}_M$ и равное ему приращение момента импульса $d\mathbf{L} = R d\mathbf{p}$ (R – радиус кривизны траектории движения тела) также являются частными случаями приращения действия $d\mathbf{H}$.

11. О принципе наименьшего действия

В словарной статье в Большой Советской Энциклопедии, определяющей действие, имеется дополнительный текст: “Если рассмотреть некоторую совокупность возможных движений механической системы между двумя ее положениями, то истинное (фактически происходящее) ее движение будет отличаться от возможных тем, что для него значение движения является наименьшим“. Этот текст поясняет **принцип наименьшего действия**.

Полезно также процитировать предложение из словарной статьи Интернет-энциклопедии Википедия, посвященной этому принципу. “Не все физические системы имеют уравнения движения, которые можно получить из этого принципа, однако все

фундаментальные взаимодействия ему подчиняются, в связи с чем этот принцип является одним из ключевых положений современной физики“.

Уравнение (6) позволяет по-новому взглянуть на физическое содержание принципа наименьшего действия. Оно заключается в том, что движение физической системы стремится не просто к наименьшему значению движения W или к наименьшему значению промежутка времени dt , а к минимальному значению произведения Wdt , то есть к наименьшему возможному изменению действия dH .

12. Об измерительном эталоне энергии

Как указывается в работе [1], развитие естественных систем единиц идет “по направлению к единой системе абсолютных эталонов Природы“. В этой работе содержится важное утверждение о том, что “развитие метрологии можно описать как переход от измерения фундаментальных постоянных к измерению фундаментальными постоянными“. Измерение с помощью фундаментальных постоянных в значительной мере может устранить необходимость создания измерительного эталона энергии.

Впрочем, такие фундаментальные константы, как масса электрона, масса протона, масса нейтрона, измеряются не только в килограммах, но и в электрон-Вольтах, то есть в единицах энергии. И если сбудется предсказание автора [1], а это, по мнению автора данной статьи, лишь вопрос времени, то указанные фундаментальные константы смогут стать измерительными эталонами энергии или войти в уравнения для определения энергии. И тогда энергия станет не только основной величиной в системе физических величин, чему и сейчас ничто не препятствует, но и основной величиной в будущей системе единиц.

Развитие естественных систем единиц ведет, по мнению автора [1], к созданию единой естественной системы единиц, и основным препятствием на пути ее создания являются “непреодолимые финансовые затраты и психологические проблемы, связанные с кардинальным изменением всех уже ставших привычными практических мер“. Судя по стоимости предстоящего в скором времени переопределения таких единиц, как килограмм и Ампер, или по стоимости коллайдера в ЦЕРН, научная общественность готова к огромным финансовым затратам ради поиска истины и ради повышения точности измерений. С преодолением психологических проблем дело обстоит сложнее. Но тоже не безнадежно.

Литература

1. Томилин К.А. Фундаментальные физические постоянные в историческом и методологическом аспектах. – М.: Физматлит. 2006, 368 с.
2. Вейник А.И., Термодинамика. 3-е изд. – Минск, Высшая школа, 1968, 464 с.
3. Эткин В.А., Альтернатива “Великому объединению“. 2005, – http://zhurnal.lib.ru/e/etkin_w_a/oputjahvelikogoobiedinenija.shtml.
4. Эткин В.А., Энергодинамика (синтез теорий переноса и преобразования энергии). – СПб.: Наука, 2008, 409 с.
5. Пакулин В.Н., Структура материи. 2004, – <http://www.valpak.narod.ru>
6. Пакулин В.Н., Структура материи (Вихревая модель микромира). 2010. – Санкт-Петербург, НТФ "Истра".
7. Чертов А.Г., Физические величины. – М.: Высшая школа, 1990, 336 с.
8. Коган И.Ш., Основы техники. Киров, КГПИ, 1993, 231 с.
9. Коган И.Ш., О возможном принципе систематизации физических величин. – “Законодательная и прикладная метрология”, 1998, 5, с.с. 30-43.
10. Коган И.Ш., Системы физических величин и системы их единиц – независимые друг от друга понятия. – 2007, <http://www.sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/8792.html>
11. Коган И.Ш., Природа размерности и классификация физических величин. –

- “Законодательная и прикладная метрология, 2011, **4**, с.с. 40-50.
12. Коган И.Ш., Обобщение и систематизация физических величин и понятий. – Хайфа, Изд. Рассвет, 2006, 207 с., см. также Физические величины (Обобщение и систематизация), 2008, <http://www.physicalsystems.org>
13. Ермолаев Д.С., Обобщенные законы физики применительно к теплофизике. – 2004, <http://www.sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/7442.html>
14. Коган И.Ш., Угол поворота – основная физическая величина. –
“*Законодательная и прикладная метрология*, 2011, **5**.
15. Коган И.Ш., Число структурных элементов как основная физическая величина. –
“*Мир измерений*”, 2011, **8**.
16. Окунь Л.Б., Понятие массы (Масса, энергия, относительность). – М.: ”Успехи физических наук”, 1989, т. 158, вып.3, с.с.511-530
17. Савельев И.В., Курс общей физики (кн. 4). – М.: АСТ: 2005, Астрель
18. Яворский Б.М., Детлаф А.А., Справочник по физике. 3-е изд., М.: Наука, Физматгиз, 1990, 624 с.