

## 46. Фундаментальные взаимодействия, законы классической механики, термодинамики, электродинамики.

### Основные положения квантовой механики

#### 1. Фундаментальные взаимодействия

Современное понимание Вселенной неразрывно связано с фундаментальными представлениями о строении материи об основных формах взаимодействий между ее составными частями. В природе известны четыре типа взаимодействий — *гравитационное, электромагнитное, слабое и сильное*.

Гравитационное взаимодействие является универсальным взаимодействием, поскольку оно существует между любыми формами материи — *частицами и полями* и не требует существования каких-либо специфических свойств (например, электрического или цветового заряда). Это взаимодействие доминирует при взаимодействиях космического (космологического) характера. На квантовом уровне «квант гравитации» — гравитон — пока не обнаружен. Характерная величина энергии, при которой могут на квантовом уровне проявиться гравитационные силы, имеет порядок  $\sim 10^{19}$  Гэв (масса протона приблизительно равна 1 Гэв).

Второе по распространенности в природе — электрослабое взаимодействие. Понятие электрослабое взаимодействие возникло в конце 70-х годов (в 1979 году была присуждена Нобелевская премия), когда электромагнитное и слабое взаимодействия были объединены в одно — электрослабое. Хорошо известно, что *электромагнитное взаимодействие* осуществляется не только между электрически заряженными частицами, но и нейтральными частицами, но и обладающими электрическими и магнитными моментами. Заметим, что электростатические силы по форме законов, описывающих взаимодействие между зарядами (вспомним закон Кулона), аналогичны фундаментальному закону, управляющему силами тяготения — фундаментальному закону тяготения Ньютона

$$\mathbf{F}_G = G \frac{m_1 m_2}{r^3} \mathbf{r},$$

где  $G$  — гравитационная постоянная (одна из трех фундаментальных постоянных, к которым относятся скорость света  $c$  и постоянная Планка  $\hbar$ ).

В электродинамике взаимодействие передается нейтральными и безмассовыми частицами — фотонами. Согласно современным представлениям электрослабое взаимодействие передается четырьмя частицами, три из которых имеют довольно большую массу (две заряженные частицы и одна нейтральная) и четвертой является безмассовый фотон, движущийся со скоростью света. Необходимость введения тяжелых частиц связано с тем, что «слабые силы» действуют только на очень коротких расстояниях ( $\sim 10^{-13}$  см), в то время как безмассовый фотон обуславливает электромагнитное взаимодействие. Напомним, что *слабое взаимодействие* происходит с участием нейтрино и осуществляется между лептонами (легкими частицами — электронами, мюонами, нейтрино) и кварками, составляющими адронами (тяжелыми частицами — протонами, нейтронами, мезонами).

*Сильное взаимодействие* осуществляется в ядрах атомов между кварками с помощью промежуточных частиц — глюонов, обладающих цветовым зарядом (красный, зеленый, голубой). Характерный масштаб сильного взаимодействия  $\sim 10^{-15}$  см. В отличие от остальных сил, ядерное взаимодействие между кварками растет с увеличением расстояния между ними, поэтому в обычных условиях свободных кварков не существует.

*Основные взаимосвязи между силами в природе описываются с помощью физических законов и принципов.*

К ним, прежде всего, относятся:

- *Принцип общей относительности* (все законы физики должны быть одинаковы в любых системах отсчета).

- Принцип *постоянства скорости света* в вакууме в любых системах отсчета.
- Принцип *эквивалентности* (никакими экспериментами невозможно отличить движение с ускорением от нахождения в однородном поле тяжести).

Заметим, что все эти принципы введены в физическую теорию Альбертом Эйнштейном.

К этому списку следует добавить фундаментальные соотношения квантовой механики (начало которой положено в начале 20-го века), описывающие микромир. К наиболее важным относятся:

- принцип *неопределенности Гейзенберга*, запрещающий одновременное точное измерение положения частицы в пространстве и ее импульса (количества движения).
- принцип *Паули*, запрещающий иметь в одном и том же месте пространства более двух частиц с полупелым спином (т.н. фермионов — электронов, нейтронов, нейтрино) с одним и тем же импульсом.

Кроме того, для любой замкнутой системы должны выполняться *первое и второе начало термодинамики* (закон сохранения энергии и закон неубывания энтропии). Следует заметить, что по своей сути законы физики являются феноменологическими, т. е. представляют собой обобщение опытных данных.

Современное состояние теоретической физики можно представить в виде трехмерного куба (см. Рис. 1).

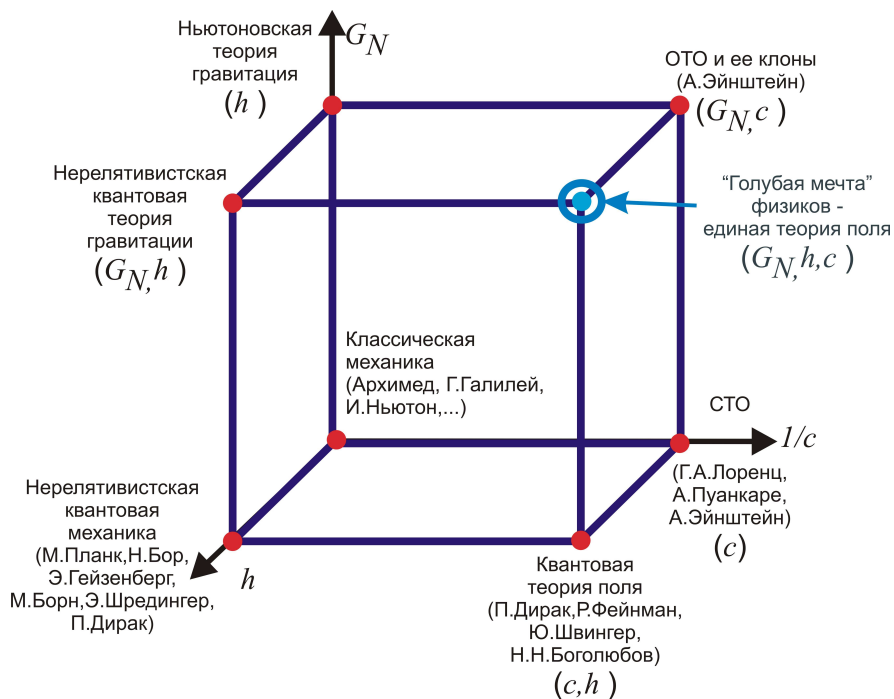


Рис. 1. Куб физических теорий (предложен А.Л.Зельмановым в 1964 году. Является развитием «плоской модели» М.П.Бронштейна).

## 2. Механические законы

В классической механике известны три основных закона Ньютона:

Первый: — всякое тело продолжает удерживаться в своем состоянии покоя или прямолинейного равномерного движения, пока и поскольку оно не понуждается приложенными изменить это состояние.

Второй: — изменение количества движения пропорционально приложенной движущей силе и происходит по направлению той прямой, по которой эта сила действует.

Математическая форма записи:

$$\frac{d(m\mathbf{v})}{dt} = \mathbf{F}, \quad \frac{d\mathbf{X}}{dt} = \mathbf{v}.$$

Третий: — Действию всегда есть равное и противоположное противодействие, иначе, взаимодействия двух тел равны направлены в противоположные стороны.

1. *Энергией* называется единая мера различных форм движения. Энергия — скалярная величина. Для количественной характеристики качественно различных форм движения, рассматриваемых в физике, водятся соответствующие им виды энергии: механическая, внутренняя, электромагнитная, химическая, ядерная и др. Энергия характеризует работу, которую может совершить тело (система тел).

2. *Закон сохранения и превращения энергии:* при любых процессах, происходящих в изолированной системе, ее полная энергия не изменяется. Этот закон вытекает из однородности времени и является одним из важнейших законов природы. Он свидетельствует о том, что движение материи несотворимо и неуничтожимо: оно может лишь переходить из одних форм в другие. Заметим, что энергия имеет множество различных форм: энергия тяготения, кинетическая энергия, электромагнитная энергия, тепловая энергия, ядерная энергия, энергия массы и т.д. Поэтому, если мы наблюдаем несохранение какого-либо вида энергии, то это означает, что мы не учли какой-либо ее вид.

3. Если *система незамкнутая*, то изменение ее энергии благодаря внешним воздействиям численно равно и противоположно по знаку алгебраической сумме изменений энергии всех внешних тел и полей, взаимодействующих с системой. Иными словами, это изменение энергии равно по модулю работе внешних сил или работе над внешней системой, совершаемой исследуемой системой.

4. Возможны *два качественно различных способа* передачи движения и соответствующей ему энергии от одного макроскопического тела к другому — *путем совершения работы* и *путем теплообмена*.

Под процессом совершения работы понимается такой процесс взаимодействия какого-либо тела с другими телами, в результате которого изменяется механическое движение этого тела или его положение по отношению к остальным телам. Таковы, например, процессы соударения движущихся тел и их торможения вследствие явления трения, а также любые процессы перемещения тел под влиянием сил взаимодействия между ними. Под процессом теплообмена понимается любой процесс обмена энергией между телами, осуществляющийся путем непосредственного взаимодействия либо между молекулами и атомами этих тел, либо между молекулами и атомами одного тела и частицами (фотонами) электромагнитного излучения, испускаемого другими телами (процесс лучистого теплообмена). Изменения энергии тела в процессах совершения работы и теплообмена называются соответственно работой и теплотой или количеством тепла, сообщенного телу.

5. *Закон сохранения импульса и момента количества движения.*

Согласно второму закону Ньютона, сила равна скорости изменения импульса со временем. Поэтому при  $\mathbf{F} = 0$  для двух тел мы получаем

$$\frac{d\mathbf{p}_1}{dt} + \frac{d\mathbf{p}_2}{dt} = 0,$$

откуда

$$\frac{d(\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2)}{dt} = 0,$$

или

$$\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2 = \text{const.}$$

Иными словами, полный импульс в замкнутой системе сохраняется.

Рассмотрим в качестве примера хорошо известное упругое столкновение, при котором на тепло, деформацию и вибрацию тел не тратится никакой энергии.

Тот факт, что скорости *до* и *после* соударения равны, — следствие не закона сохранения импульса, закона *сохранения энергии*, но то, что скорости разлета после симметричного соударения равны *друг другу*, в этом уже повинен закон *сохранения импульса*.

## Законы симметрии

### Механика

Согласно теореме Нётер, каждому преобразованию симметрии, характеризуемым одним непрерывным параметром (однопараметрическая группа преобразований), соответствует *сохраняющаяся величина*, для системы, обладающей этой симметрией.

Из симметрии физических законов относительно сдвига замкнутой системы в пространстве, поворота ее как целого и изменения начала отсчета времени (сдвига во времени) следуют соответственно *законы сохранения импульса, момента количества движения и энергии*.

### Электродинамика

Уравнения Максвелла симметричны относительно более общих преобразований, чем преобразования Галилея — преобразований Лоренца, которые совместно с преобразованиями сдвига и ортогональных поворотов образуют группу Пуанкаре. Тем самым принцип относительности Эйнштейна, как обобщение принципа относительности Галилея, является следствием инвариантности законов электродинамики — уравнений Максвелла — относительно преобразований группы Пуанкаре.

Напомним, что при введении векторного (магнитного) потенциала  $\mathbf{A}$  мы показали, что он определяется неоднозначно, с точностью до градиента произвольной (класса  $C^1$ ) функции:

$$A_\mu(X) \Rightarrow A_\mu(X) + \frac{\partial\varphi(X)}{\partial x^\mu}.$$

Это дает нам возможность наложить так называемое условие калибровки (Лоренца, Кулона, ...). Оказывается накладывая условие калибровочной инвариантности на полевые уравнения, полученные Дираком, мы автоматически получаем уравнения Максвелла. Следствием же симметрии относительно калибровочных преобразований является закон сохранения заряда.

Итак, под калибровочной симметрией понимается класс внутренних симметрий уравнений теории поля (т.е. симметрий, связанных со свойствами элементарных частиц, а не со свойствами пространства-времени), характеризуемых параметрами, зависящими от точки пространства-времени  $X = \{x^\mu\} = \{x^0, x^1, x^2, x^3\}$ .

## Молекулярная физика и термодинамика

1. *Молекулярной физикой* называется наука, изучающая физические свойства и агрегатные состояния тел в зависимости от их молекулярного строения, сил взаимодействия между частицами, образующими тела, и характера теплового движения этих частиц. Для теоретического исследования указанных вопросов используются два взаимно дополняющих друг друга метода *статистический* и *термодинамический*.

2. *Статистический метод* состоит в изучении свойств макроскопических систем на основе анализа, с помощью методов математической теории вероятностей, закономерностей теплового движения огромного числа микрочастиц, образующих эти системы.

3. *Термодинамический метод* состоит в изучении свойств системы взаимодействующих тел путем анализа условий и количественных соотношений происходящих в системе превращений энергии. Эти вопросы изучаются в разделе теоретической физики, называемом термодинамикой (феноменологической термодинамикой). Термодинамический метод, в отличие от статистического, не связан с какими-либо конкретными представлениями о внутреннем строении тел и характере движения образующих их частиц. Термодинамика оперирует с макроскопическими характеристиками изучаемых ею объектов, основываясь на нескольких экспериментально установленных положениях законах (началах) термодинамики, которые обладают весьма большой общностью. Поэтому термодинамический метод используется для теоретического анализа общих закономерностей самых разнообразных явлений.

4. *Термодинамической системой* называется совокупность макроскопических объектов (тел и полей), обменивающихся энергией в форме работы и в форме тепла как друг с другом, так и с внешней средой, т. е. с внешними по отношению к системе телами и полями. Термодинамическая система называется замкнутой или изолированной, если отсутствует всякий обмен энергией между нею и внешней средой. Система называется изолированной в тепловом отношении или адиабатически изолированной, если отсутствует теплообмен между нею и окружающей средой. Термодинамическая система, обменивающаяся энергией с внешней средой только путем теплообмена, называется изолированной в механическом отношении.

5. *Гомогенной* называется термодинамическая система, внутри которой нет поверхностей раздела, отделяющих друг от друга макроскопические части системы, различающиеся по своим свойствам и составу. Термодинамическая система, не удовлетворяющая этому условию, называется гетерогенной. Гомогенными системами являются, например, смеси газов, жидкие и твердые растворы, а также всякое химически однородное тело, находящееся целиком в каком-либо одном агрегатном состоянии. Примерами гетерогенных систем являются тающий лед, влажный пар, многие сплавы и горные породы. Система называется физически однородной, если ее состав и физические свойства одинаковы для всех макроскопических частей этой системы, равных по объему. Примером такой системы может служить газ, на который не действует внешнее силовое поле. Фазой называется совокупность всех гомогенных частей термодинамической системы, которые в отсутствие внешнего силового воздействия являются физически однородными. Например, влажный пар состоит из двух фаз — кипящей жидкости и сухого насыщенного пара. Компонентами (независимыми компонентами) термодинамической системы называются различные вещества, наименьшее число которых достаточно для образования всех фаз системы. Раствором называется гомогенная система (твердая, жидкая или газообразная), состоящая из двух или большего числа химически чистых веществ. Один из компонентов раствора (обычно тот, который содержится в наибольшем количестве) называется растворителем, а остальные компоненты — растворенными веществами.

6. *Состояние термодинамической системы* определяется совокупностью значений ее термодинамических параметров (параметров состояния) — всех физических величин, характеризующих макроскопические свойства системы (ее плотность, энергию, вязкость, поляризацию, намагниченность и т. д.). Два состояния системы считаются разными, если для них численные значения хотя бы одного из термодинамических параметров неодинаковы. Состояние системы называется стационарным, если оно не изменяется во времени. Стационарное состояние системы называется равновесным, если его неизменность во времени не обусловлена протеканием какого-либо внешнего по отношению к системе процесса. Термодинамические параметры системы взаимосвязаны. Поэтому равновесное состояние системы можно однозначно определить, указав значения ограниченного числа этих параметров. Основными параметрами состояния являются давление, температура и удельный (или молярный) объем. В термодинамике различают внешние и внутренние параметры состояния системы. Внешними параметрами состояния называются параметры, зависящие только от обобщенных координат внешних тел, с которыми взаимодействует система. Примером внешнего параметра для газа является его объем, зависящий от положения внешних тел — стенок сосуда. Для газа, находящегося в гравитационном или каком-либо другом внешнем силовом поле, внешним параметром является также напряженность этого поля.

Внутренними параметрами состояния называются параметры, зависящие как от обобщенных координат внешних тел, так и от усредненных значений координат и скоростей частиц, образующих систему. Внутренними параметрами являются, например, плотность и энергия системы.

7. *Давлением* называется физическая величина, равная пределу отношения численного значения  $F_n$  нормальной силы, действующей на участок поверхности тела площадью  $S$ , при  $S$ , стремящейся к нулю. В простом случае давление определяется как отношение нормальной силы к площади поверхности, на которую она действует:  $p = F_n/S$ . Удельным объемом  $v$  называется величина, обратная плотности  $\rho$ :  $v = 1/\rho$ . Для однородного тела удельный объем равен отношению его объема к массе, т.е. численно равен объему элемента этого тела, масса которого равна единице.

7. *Температурой* называется физическая величина, характеризующая меру внутренней энергии (степень нагретости тела). В состоянии термодинамического равновесия системы температуры всех тел, образующих систему, одинаковы.

8. *Внутренние параметры термодинамической системы*, находящейся в равновесном состоянии, зависят только от ее внешних параметров и от температуры:

$$y_k = f(x_1, x_2, \dots, x_n, T) \quad (1)$$

где  $y_k$  — внутренний параметр, а  $x_1, x_2, \dots, x_n$  — внешние параметры. Например, равновесное состояние физически однородной термодинамической системы в соответствии с правилом фаз Гиббса полностью определяется двумя параметрами. Поэтому равновесное давление в этой системе является функцией ее объема и температуры (масса системы предполагается фиксированной):

$$p = f_1(V, ) \quad (2)$$

9. Если в уравнении (1)  $y_k$  представляет собой обобщенную силу, сопряженную какому-либо из внешних параметров  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , то уравнение (1) называется термическим уравнением состояния системы (уравнением состояния системы). Например, уравнение (2) является термическим уравнением состояния физически однородной системы. Уравнение (1), записанное для внутренней энергии  $U$  системы:  $U = f_2(x_1, x_2, \dots, x_n, T)$  называется калорическим уравнением состояния системы. В термодинамике уравнения состояния исследуемой системы предполагаются известными из опыта. Теоретический вывод этих уравнений может быть осуществлен методами статистической физики.

10. *Термодинамическим процессом* называется всякое изменение состояния термодинамической системы. Равновесным (квазистатистическим) процессом называется термодинамический процесс, при котором система проходит непрерывный ряд равновесных состояний. Круговым процессом или циклом называется термодинамический процесс, в результате совершения которого система возвращается в исходное состояние. Изопроцессами называются термодинамические процессы, протекающие при неизменном значении какого-либо параметра состояния. Изохорным (изохорическим) процессом называется термодинамический процесс, протекающий при постоянном объеме системы. Изобарным (изобарическим) процессом называется термодинамический процесс, протекающий при постоянном давлении. Изотермическим (изотермным) процессом называется термодинамический процесс, протекающий при постоянной температуре. Адиабатным (адиабатическим) процессом называется термодинамический процесс, осуществляемый системой без теплообмена с внешними телами.

11. *Функцией состояния* называется такая физическая характеристика системы, изменение которой при переходе системы из одного состояния в другое не зависит от вида соответствующего этому переходу термодинамического процесса, а целиком определяется значениями параметров начального и конечного состояний. Важнейшими функциями состояний являются внутренняя энергия  $U$ , энтальпия  $H$ , энтропия  $S$ .

12. *Равновесные состояния* физически однородной системы и совершаемые ею равновесные процессы можно изображать графически соответственно точками и кривыми на плоскости с прямоугольными декартовыми координатами, вдоль осей которых откладываются параметры состояния системы или

однозначно связанные с ними функции состояния. Такое графическое изображение называется термодинамической диаграммой. Наиболее распространенными являются диаграммы  $V - P$ ,  $S - P$ ,  $S - H$  и др. (первый символ указывает величину, откладываемую по оси абсцисс, второй — по оси ординат).

## Термодинамические законы

### Первый закон термодинамики

Из закона сохранения и превращения энергии следует, что изменение  $W$  энергии системы равно сумме работы  $A'$ , совершенной над ней внешними телами, и сообщенного ей тепла  $Q$ :  $W = Q + A'$  или  $Q = W + A$ , где  $A$  — работа, совершаемая системой над внешними телами. При этом предполагается, что  $Q$ ,  $W$ , и  $A'$  измерены в единицах одной системы. В термодинамике обычно рассматриваются макроскопически неподвижные системы, для которых изменение полной энергии равно изменению внутренней энергии, так что  $Q = U + A$ . Тепло, сообщенное системе, расходуется на увеличение ее внутренней энергии и на совершение системой работы против внешних сил (первый закон термодинамики). Если система представляет собой периодически действующую машину, в которой газ, пар или другое рабочее тело в результате совершения кругового процесса возвращается в исходное состояние, то  $U = 0$  и  $A = Q$ . Следовательно, нельзя построить периодически действующий двигатель, который совершал бы работу, большую подводимой к нему извне энергии (вечный двигатель первого рода невозможен).

### Второй закон термодинамики

1. Первый закон термодинамики, выражающий всеобщий закон сохранения и превращения энергии, не позволяет определить направление протекания термодинамических процессов. Например, основываясь на этом законе, можно было бы пытаться построить вечный двигатель второго рода, т. е. двигатель, рабочее тело которого, совершая круговой процесс, получало бы энергию в форме тепла от одного внешнего тела и целиком передавало бы ее в форме работы другому внешнему телу.

2. Обобщение результатов многочисленных экспериментов привело к выводу о невозможности построения вечного двигателя второго рода. Этот вывод называется вторым законом термодинамики и имеет ряд формулировок, различных по форме, но эквивалентных по существу, в частности: а) невозможен процесс, единственным результатом которого является превращение тепла, полученного от нагревателя, в эквивалентную ему работу; б) невозможен процесс, единственным результатом которого является передача энергии в форме тепла от холодного тела к горячему.

3. Второй закон термодинамики указывает на существенное различие двух форм передачи энергии — теплоты и работы. Он утверждает, что процесс преобразования упорядоченного движения тела как целого в неупорядоченное движение частиц самого тела и внешней среды является необратимым. Упорядоченное движение может переходить в неупорядоченное без каких-либо дополнительных (компенсирующих) процессов, например при трении. В то же время обратный переход неупорядоченного движения в упорядоченное, или, как часто неточно говорят, «переход тепла в работу», не может являться единственным результатом термодинамического процесса, т. е. всегда должен сопровождаться каким-либо компенсирующим процессом. Например, при равновесном, изотермическом расширении идеальный газ совершает работу, которая полностью эквивалентна теплу, переданному газу нагревателем. Однако плотность газа при этом уменьшается, т. е. «превращение тепла в работу» не является единственным результатом рассматриваемого процесса. Тепловой двигатель, работающий по прямому циклу Карно, совершает работу, эквивалентную лишь части полученного от нагревателя тепла, так как остальная часть последнего отдается холодильнику, состояние которого вследствие этого изменяется. В холодильной машине тепло передается от холодного тела к горячему. Однако для осуществления этого процесса необходим компенсирующий процесс совершения работы внешними телами.

### Третий закон термодинамики

1. Первый и второй законы термодинамики не позволяют определить значение  $S_0$  энтропии системы при абсолютном нуле температуры ( $T = 0^\circ\text{K}$ ). В связи с этим оказывается невозможным теоретический расчет абсолютных значений энтропии, изохорно-изотермного и изобарно-изотермного потенциалов системы, а также константы равновесия.

2. На основании обобщения экспериментальных исследований свойств различных веществ при сверхнизких температурах был установлен закон, устранивший указанную трудность и получивший название принципа Нернста или третьего закона термодинамики. В формулировке Нернста он гласит: в любом изотермическом процессе, проведенном при абсолютном нуле температуры, изменение энтропии системы равно нулю, т. е.  $S(T = 0) = 0$ ,  $S = S_0 = \text{const}$ , независимо от изменения любых других параметров состояния (например, объема, давления, напряженности внешнего силового поля и т. д.). Иными словами, при абсолютном нуле температуры изотермический процесс является также и изоэнтропийным.

3. Из третьего закона термодинамики следует, что для всех тел при  $T = 0^\circ\text{K}$  обращаются в нуль теплоемкости  $p$  и  $v$  и термодинамический коэффициент расширяемости  $\alpha$ . Из него также вытекает вывод о невозможности осуществления такого процесса, в результате которого тело охладилось бы до температуры  $T = 0^\circ\text{K}$  (принцип недостижимости абсолютного нуля температуры).

4. Принцип Нернста был развит Планком, предположившим, что  $S_0 = 0$ , т. е. при абсолютном нуле температуры энтропия системы равна нулю. Физическое истолкование принципа Нернста в формулировке Планка дается в статистической физике. Условие  $S_0 = 0$  при  $T = 0^\circ\text{K}$  является следствием квантового характера процессов, происходящих в любой системе при низких температурах, и выполняется только для систем находящихся при  $T = 0^\circ\text{K}$  в состоянии устойчивого, а не метастабильного равновесия. На основании гипотезы Планка можно определить абсолютные значения энтропии системы в произвольном равновесном состоянии.