**1)** Первое начало термодинамики — один из трёх основных законов [термодинамики](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B5%D1%80%D0%BC%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%BD%D0%B0%D0%BC%D0%B8%D0%BA%D0%B0), представляет собой [закон сохранения энергии](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%97%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D0%BD_%D1%81%D0%BE%D1%85%D1%80%D0%B0%D0%BD%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F_%D1%8D%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%B8%D0%B8) для [термодинамических систем](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B5%D1%80%D0%BC%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%BD%D0%B0%D0%BC%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F_%D1%81%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0).

Первое начало термодинамики было сформулировано в середине [XIX века](http://ru.wikipedia.org/wiki/XIX_%D0%B2%D0%B5%D0%BA) в результате работ немецкого учёного [Ю. Р. Майера](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B0%D0%B9%D0%B5%D1%80%2C_%D0%AE%D0%BB%D0%B8%D1%83%D1%81_%D0%A0%D0%BE%D0%B1%D0%B5%D1%80%D1%82), английского физика [Дж. П. Джоуля](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D0%B6%D0%BE%D1%83%D0%BB%D1%8C%2C_%D0%94%D0%B6%D0%B5%D0%B9%D0%BC%D1%81_%D0%9F%D1%80%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%BE%D1%82%D1%82)и немецкого физика [Г. Гельмгольца](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BC%D0%B3%D0%BE%D0%BB%D1%8C%D1%86%2C_%D0%93%D0%B5%D1%80%D0%BC%D0%B0%D0%BD)[[1]](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%B5%D1%80%D0%B2%D0%BE%D0%B5_%D0%BD%D0%B0%D1%87%D0%B0%D0%BB%D0%BE_%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%BC%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%BD%D0%B0%D0%BC%D0%B8%D0%BA%D0%B8#cite_note-0). Согласно первому началу термодинамики, термодинамическая система может совершать [работу](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%B0%D0%B1%D0%BE%D1%82%D0%B0) только за счёт своей[внутренней энергии](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%BD%D1%83%D1%82%D1%80%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F%D1%8F_%D1%8D%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%B8%D1%8F) или каких-либо внешних источников [энергии](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%B8%D1%8F). Первое начало термодинамики часто формулируют как невозможность существования [вечного двигателя первого рода](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%B5%D1%87%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D0%B4%D0%B2%D0%B8%D0%B3%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C_%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B2%D0%BE%D0%B3%D0%BE_%D1%80%D0%BE%D0%B4%D0%B0), который совершал бы работу, не черпая энергию из какого-либо источника.

ИЗОПРОЦЕССЫ В ГАЗАХ
2.1.  Уравнение состояние идеального газа
Состояния данной массы газа характеризуется тремя макроскопическими параметрами: давлением, объемом, температурой. В данной главе рассмотрим между ними связь, а затем посмотрим, для чего эта связь нужна.

Уравнение  состояния  идеального газа – называется такое уравнение, которое  связывает три  макроскопических  параметра  давление P, объем  V и температуру  T,   для  достаточно разряженного  газа.

Выведем  уравнение  состояния  идеального  газа. Для  этого  подставим в уравнение:
  (1)

выражение  для концентрации  молекул  газа  , концентрацию газа  можно записать так:
         (2)
где   -постоянная  Авогадро,  m – масса  газа, M – его  молярная масса.

После  подстановки  (2) в (1)  будем иметь

        

              (3)
где  k – постоянная Больцмана. Произведение постоянной  Больцмана k и постоянной  Авогадро    называется  универсальной  (молярной)  газовой постоянной  и обозначается  буквой  R.
                                         
         Подставим   универсальную  газовую  постоянную   в  уравнение  (3), получим  уравнение  состояния  для  произвольной  массы  идеального газа:

                                               (4)
         Единственная   величина   в  этом  уравнении (4),  зависящая  от  рода газа, это  его молярная масса.

Уравнение  (4)  называется  уравнение состояния идеального газа  или     уравнение   Менделеева – Клапейрона.

Из уравнения состояния вытекает связь между давлением, объемом и температурой идеального газа, который может находиться в двух любых состояниях.

Если индекс 1 обозначить параметры, относящиеся к первому состоянию, а индекс 2 - параметры, относящиеся ко второму состоянию, то согласно уравнению (4) для газа данной массы:

Правые части этих уравнений одинаковы, следовательно, должны быть равны и их левые части:
                                              (5)
Уравнение состояние в форме (5) называется уравнением Клапейрона и представляет собой одну из форм записи уравнения состояния.

Таким  образом,  для  данной  массы  газа,  как  бы ни менялись его давление, объем и температура, произведение  давления на объем, деленное на абсолютную температуру, есть величина  постоянная.

**2)** Уравнение [адиабаты](http://khd2.narod.ru/info/phisics.htm#ADIABATE) для идеального газа: P · Vγ = const, где P — давление газа, V — его объём, γ = cP / cV — [соотношение его изобарической и изохорической](http://khd2.narod.ru/info/dataterm.htm#GAS_WARMCAPACITY) [теплоёмкостей](http://khd2.narod.ru/info/phisics.htm#WARM_CAPACITY) (всегда больше 1). Отсюда следует изменение температуры при адиабатических процессах: T1 / T2 = (P1 / P2) · (V1 / V2)γ, причём γ зависит от температуры, и в случае сильного изменения объёма и давления (раз в 10 и более) это может быть существенным. Применимо для относительно медленных процессов, когда температуры газа и ограничивающего газ слоя стенок успевают уравниваться, но теплообмен с внешней средой очень мал.

**3)** Молекулы взаимодействуют друг с другом посредством моле-кулярных сил. На далеких расстояниях — это силы притяжения, убывающие с увеличением расстояния, на близких — силы отталкивания, быстро возрастающие при сближении молекул. Расстояние между центрами сблизившихся молекул, на котором силы притяжения переходят в силы отталкивания, принимается за диаметр молекулы. В газах при нормальных условиях средние расстояния между молекулами еще велики по сравнению с их диаметрами. На таких расстояниях молекулярные силы очень слабы и не играют существенной роли. Молекулярные силы проявляются лишь на близких расстояниях порядка диаметров молекул. Под действием этих сил скорости сблизившихся молекул претерпевают значительные изменения как по величине, так и но направлению. Взаимодействия молекул на близких расстояниях называют столкновениями. Между двумя последовательными столкновениями молекула газа движется практически свободно, т. е. прямолинейно и равномерно. При каждом столкновении молекула газа почти мгновенно меняет направление своего движения, а затем движется с новой скоростью опять прямолинейно и равномерно, пока не произойдет следующее столкновение. Если газ в целом находится в покое (например, заключен в закрытом сосуде), то в результате столкновений устанавливается хаотическое движение, в котором все направления движения молекул равновероятны. Оно называется тепловым движением. Чем более разрежен газ, тем длиннее средний путь, проходимый молекулой между двумя последовательными столкно-вениями. Для достаточно разреженного газа, заключенного в сосуд, можно в первом приближении пренебречь размерами молекул и столкновениями их друг с другом. Надо учесть только столкновения молекул со стенками сосуда, в который газ заключен. В этом при-ближении молекулы газа могут рассматриваться как материальные точки, не взаимодействующие между собой и движущиеся прямолинейно и равномерно между каждыми двумя последовательными столк-новениями со стенками сосуда. Такая простейшая модель приводит к законам идеальных газов. Чтобы показать это, надо выяснить моле-кулярный смысл давления, температуры и внутренней энергии газа.

**4)** Одной из основных характеристик термодинамической системы является ее внутренняя энергия U — энергия хаотического (теплового) движения микрочастиц системы (атомов, молекул, ядер, электронов и т. д.) и энергия взаимодействия этих частиц. Из этого определения следует, что к внутренней энергии не относятся кинетическая энергия движения системы как целого и потенциальная энергия системы во внешних полях.

Внутренняя энергия — определенная функция термодинамического состояния системы, т. е. в любом состоянии система обладает вполне определенной внутренней энергией (она не зависит от того, каким образом система пришла в данное состояние). Это значит, что при переходе системы из одного состояния в другое изменение внутренней энергии задается только разностью значений внутренней энергии данных состояний и не зависит от пути и способа перехода.

В механике введилось понятие числа степеней свободы: это число независимых переменных (координат), которые полностью определяют положение системы в пространстве. В некоторых задачах молекулу одноатомного газа (рис. 1, а) рассматривают как материальную точку, которой задают три степени свободы поступательного движения. При этом не учитывается энергия вращательного движения.

В механике молекула двухатомного газа в первом приближении считается совокупностью двух материальных точек, которые жестко связанны недеформируемой связью (рис. 1, б). Данная система кроме трех степеней свободы поступательного движения имеет еще две степени свободы вращательного движения. Вращение вокруг третьей оси, проходящей через оба атома, лишено смысла. Значит, у двухатомного газа пять степеней свободы (i = 5). У трехатомной (рис. 1, в) и многоатомной нелинейной молекулы шесть степеней свободы: три поступательных и три вращательных. Естественно считать, что жесткой связи между атомами не существует. Поэтому необходимо учитывать для реальных молекул также степени свободы колебательного движения.



Рис.1

При любом числе степеней свободы данной молекулы три степени свободы всегда поступательные. Ни одна из поступательных степеней свободы не имеет преимущества перед другими, значит на каждую из них приходится в среднем одинаковая энергия, равная 1/3 значения <ε0> (энергия поступательного движения молекул):



В статистической физике выводится закон Больцмана о равномерном распределении энергии по степеням свободы молекул: для статистической системы, которая находится в состоянии термодинамического равновесия, на каждую поступательную и вращательную степени свободы приходится в среднем кинетическая энергия, равная kT/2, а на каждую колебательную степень свободы — в среднем энергия, равная kT. Колебательная степень обладает вдвое большей энергией, т.к. на нее приходится как кинетическая энергия (как в случае поступательного и вращательного движений), так и потенциальная, причем средние значения потенциальной и кинетической и энергии одинаковы. Значит, средняя энергия молекулы



где i — сумма числа поступательных, числа вращательных в удвоенного числа колеба¬тельных степеней свободы молекулы:i=iпост+iвращ+2iколеб

В классической теории рассматривают молекулы с жесткой связью между атомами; для них i совпадает с числом степеней свободы молекулы.

Так как в идеальном газе взаимная потенциальная энергия взаимодействия молекул равна нулю (молекулы между собой не взаимодействуют), то внутренняя энергия для одного моля газа, будет равна сумме кинетических энергий NA молекул:

 (1)

Внутренняя энергия для произвольной массы m газа.



где М — молярная масса, ν — количество вещества.

**5)** Барометрическая формула — зависимость давления или плотности газа от высоты в поле тяжести.

Для [идеального газа](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%98%D0%B4%D0%B5%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D0%B3%D0%B0%D0%B7), имеющего постоянную температуру  и находящегося в однородном поле тяжести (во всех точках его объёма [ускорение свободного падения](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A3%D1%81%D0%BA%D0%BE%D1%80%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5_%D1%81%D0%B2%D0%BE%D0%B1%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D0%BE_%D0%BF%D0%B0%D0%B4%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F)  одинаково), барометрическая формула имеет следующий вид:

![p=p_0\exp\left[-Mg\frac{h-h_0}{RT}\right],]()

где  — давление газа в слое, расположенном на высоте ,  — давление на нулевом уровне (),  — [молярная масса](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%BE%D0%BB%D1%8F%D1%80%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D0%BC%D0%B0%D1%81%D1%81%D0%B0) газа,  — [газовая постоянная](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D0%B0%D0%B7%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%8F_%D0%BF%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%8F%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F),  — [абсолютная температура](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%B1%D1%81%D0%BE%D0%BB%D1%8E%D1%82%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%82%D1%83%D1%80%D0%B0). Из барометрической формулы следует, что концентрация молекул  (или плотность газа) убывает с высотой по тому же закону:

![n=n_0\exp\left[-mg\frac{h-h_0}{kT}\right],]()

где  — масса молекулы газа,  — [постоянная Больцмана](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%8F%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D0%91%D0%BE%D0%BB%D1%8C%D1%86%D0%BC%D0%B0%D0%BD%D0%B0).

Барометрическая формула может быть получена из закона распределения молекул идеального газа по скоростям и координатам в потенциальном силовом поле (см. [Статистика Максвелла — Больцмана](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0_%D0%9C%D0%B0%D0%BA%D1%81%D0%B2%D0%B5%D0%BB%D0%BB%D0%B0_%E2%80%94_%D0%91%D0%BE%D0%BB%D1%8C%D1%86%D0%BC%D0%B0%D0%BD%D0%B0)). При этом должны выполняться два условия: постоянство температуры газа и однородность силового поля. Аналогичные условия могут выполняться и для мельчайших твёрдых частичек, взвешенных в жидкости или газе. Основываясь на этом, французский физик Ж. [Перрен](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%B5%D1%80%D1%80%D0%B5%D0%BD%2C_%D0%96%D0%B0%D0%BD_%D0%91%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%81%D1%82) в [1908 году](http://ru.wikipedia.org/wiki/1908_%D0%B3%D0%BE%D0%B4) применил барометрическую формулу к распределению по высоте частичек эмульсии, что позволило ему непосредственно определить значение постоянной Больцмана.

Барометрическая формула показывает, что плотность газа уменьшается с высотой по экспоненциальному закону. Величина , определяющая быстроту спада плотности, представляет собой отношение потенциальной энергии частиц к их средней кинетической энергии, пропорциональной . Чем выше температура , тем медленнее убывает плотность с высотой. С другой стороны, возрастание силы тяжести  (при неизменной температуре) приводит к значительно большему уплотнению нижних слоев и увеличению перепада (градиента) плотности. Действующая на частицы сила тяжести  может изменяться за счёт двух величин: ускорения  и массы частиц .

Следовательно, в смеси газов, находящейся в поле тяжести, молекулы различной массы по-разному распределяются по высоте.

Реальное распределение давления и плотности воздуха в земной атмосфере не следует барометрической формуле, так как в пределах атмосферы температура и ускорение свободного падения меняются с высотой и географической широтой. Кроме того, атмосферное давление увеличивается с концентрацией в атмосфере паров воды.

Барометрическая формула лежит в основе [барометрического нивелирования](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B0%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%B5%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B5_%D0%BD%D0%B8%D0%B2%D0%B5%D0%BB%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B5) — метода определения разности высот  между двумя точками по измеряемому в этих точках давлению ( и ). Поскольку атмосферное давление зависит от погоды, интервал времени между измерениями должен быть возможно меньшим, а пункты измерения располагаться не слишком далеко друг от друга. Барометрическая формула записывается в этом случае в виде:  (в м), где  — средняя температура слоя воздуха между точками измерения,  — температурный коэффициент объёмного расширения воздуха. Погрешность при расчётах по этой формуле не превышает 0,1—0,5 % от измеряемой высоты. Более точна формула Лапласа, учитывающая влияние влажности воздуха и изменение ускорения свободного падения.

6) Распределение Ма́ксвелла — [распределение вероятности](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D1%83%D0%BD%D0%BA%D1%86%D0%B8%D1%8F_%D1%80%D0%B0%D1%81%D0%BF%D1%80%D0%B5%D0%B4%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F), встречающееся в [физике](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%B8%D0%B7%D0%B8%D0%BA%D0%B0) и [химии](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A5%D0%B8%D0%BC%D0%B8%D1%8F). Оно лежит в основании [кинетической теории газов](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B8%D0%BD%D0%B5%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F_%D1%82%D0%B5%D0%BE%D1%80%D0%B8%D1%8F_%D0%B3%D0%B0%D0%B7%D0%BE%D0%B2), которая объясняет многие фундаментальные свойства газов, включая [давление](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D0%B0%D0%B2%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5) и [диффузию](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D0%B8%D1%84%D1%84%D1%83%D0%B7%D0%B8%D1%8F). Распределение Максвелла также применимо для электронных процессов переноса и других явлений. Распределение Максвелла применимо к множеству свойств индивидуальных молекул в газе. О нём обычно думают как о распределении энергий молекул в газе, но оно может также применяться к распределению скоростей, импульсов, и модуля импульсов молекул. Также оно может быть выражено как дискретное распределение по множеству дискретных уровней энергии, или как непрерывное распределение по некоторому континууму энергии.

Распределение Максвелла может быть получено при помощи [статистической механики](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F_%D0%BC%D0%B5%D1%85%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%BA%D0%B0) (см. происхождение [статсуммы](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%81%D1%83%D0%BC%D0%BC%D0%B0)). Как распределение энергии, оно соответствует самому вероятному распределению энергии, в столкновительно-доминируемой системе, состоящей из большого количества невзаимодействующих частиц, в которой квантовые эффекты являются незначительными. Так как взаимодействие между молекулами в газе является обычно весьма небольшим, распределение Максвелла даёт довольно хорошее приближение ситуации, существующей в газе.

Во многих других случаях, однако, даже приблизительно не выполнено условие доминирования [упругих соударений](http://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%A3%D0%BF%D1%80%D1%83%D0%B3%D0%BE%D0%B5_%D1%81%D0%BE%D1%83%D0%B4%D0%B0%D1%80%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5&action=edit&redlink=1) над всеми другими процессами. Это верно, например, в физике [ионосферы](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%98%D0%BE%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%84%D0%B5%D1%80%D0%B0) и космической [плазмы](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BB%D0%B0%D0%B7%D0%BC%D0%B0), где процессы рекомбинации и столкновительного возбуждения (то есть излучательные процессы) имеют большое значение, в особенности для электронов. Предположение о применимости распределения Максвелла дало бы в этом случае не только количественно неверные результаты, но даже предотвратило бы правильное понимание физики процессов на качественном уровне. Также, в том случае где квантовая [де Бройлева длина волны](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D0%BB%D0%B8%D0%BD%D0%B0_%D0%B2%D0%BE%D0%BB%D0%BD%D1%8B_%D0%B4%D0%B5_%D0%91%D1%80%D0%BE%D0%B9%D0%BB%D1%8F) частиц газа не является малой по сравнению с расстоянием между частицами, будут наблюдаться отклонения от распределения Максвелла из-за квантовых эффектов.

Распределение энергии Максвелла может быть выражено как дискретное распределение энергии:

,

где  является числом молекул имеющих энергию  при температуре системы ,  является общим числом молекул в системе и  — [постоянная Больцмана](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%8F%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D0%91%D0%BE%D0%BB%D1%8C%D1%86%D0%BC%D0%B0%D0%BD%D0%B0). (Отметьте, что иногда вышеупомянутое уравнение записывается с множителем , обозначающим степень вырождения энергетических уровней. В этом случае сумма будет по всем энергиям, а не всем состояниям системы). Поскольку скорость связана с энергией, уравнение (1) может использоваться для получения связи между температурой и скоростями молекул в газе. Знаменатель в уравнении (1) известен как каноническая [статистическая сумма](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F_%D1%81%D1%83%D0%BC%D0%BC%D0%B0).

7) **СТАТИСТИЧЕСКИЙ ВЕС**. 1) С. в. в [квантовой механике](http://www.femto.com.ua/articles/part_1/1557.html) - кратность вырождения уровня энергии. 2) С. в. в [термодинамике](http://www.femto.com.ua/articles/part_2/4051.html) и[статистической физике](http://www.femto.com.ua/articles/part_2/3864.html) - число способов, к-рыми может быть реализовано данное макроскопич. состояние системы. Термодинамически равновесное макроскопич. состояние системы характеризуется определ. значениями полной энергии, полного числа частиц N и объёма системы. Микроскопич. состояние системы соответствует заданному распределению её частиц по возможным классич. или квантовым состояниям. С. в. Г равен числу микроскопич. состояний, реализующих данное макроскопич. состояние, поэтому . Иногда С. в. наз. термодинамической вероятностью.

В случае непрерывного спектра энергии под С. в. понимают число квантовых состояний в данном интервале значений энергии. При переходе от квантовой к классич. теории (квазиклассич. приближение) устанавливают связь между Г и величиной фазового объёма системы, соответствующего данному интервалу энергии. С. в. наз. величину фазового объёма в единицах, где s - [число степеней свободы](http://www.femto.com.ua/articles/part_2/3882.html) данной системы. Величине h соответствует мин. фазовый объём для системы с одной степенью свободы в квазиклассич. приближении. Аналитически С. в. можно найти лишь для модельных систем, для реальных систем его можно оценить по величине[статистической суммы](http://www.femto.com.ua/articles/part_2/3861.html).

С. в. связан с [энтропией](http://www.femto.com.ua/articles/part_2/4761.html) S системы соотношением Больцмана . При фиксиров. значениях и N С. в. имеет макс. величину для равновесного состояния. При расчёте С. в. существенно, считаются ли одинаковые частицы различимы или нет, поэтому в квантовой и классич. теориях получаются разл. значения С. в. Из условия максимума С. в. впервые были получены квантовые[распределения Ферми - Дирака](http://www.femto.com.ua/articles/part_2/4293.html) и Бозе - Эйнштейна. д. н. Зубарев.

# Закон возрастания энтропии

     Применим неравенство Клаузиуса для описания необратимого кругового термодинамического процесса, изображенного на рис 3.13.

|  |
| --- |
| Рис.3.13 |
| Рис. 3.13.Необратимый круговой термодинамический процесс |

     Пусть процесс  будет необратимым, а процесс  - обратимым. Тогда неравенство Клаузиуса для этого случая примет вид

|  |  |
| --- | --- |
| Формула 3.55. | (3.55) |

     Так как процесс  является обратимым, для него можно воспользоваться соотношением [(3.53)](http://fn.bmstu.ru/phys/bib/physbook/tom2/ch3/formulas/fml3.53.htm), которое дает

|  |  |
| --- | --- |
| Формула 3.56. | (3.56) |

     Подстановка этой формулы в неравенство [(3.55)](http://fn.bmstu.ru/phys/bib/physbook/tom2/ch3/formulas/fml3.55.htm) позволяет получить выражение

|  |  |
| --- | --- |
| Формула 3.57. | (3.57) |

     Сравнение выражений [(3.53)](http://fn.bmstu.ru/phys/bib/physbook/tom2/ch3/formulas/fml3.53.htm) и [(3.57)](http://fn.bmstu.ru/phys/bib/physbook/tom2/ch3/formulas/fml3.57.htm) позволяет записать следующее неравенство

|  |  |
| --- | --- |
| Формула 3.58, | (3.58) |

     в котором знак равенства имеет место в случае, если процесс  является обратимым, а знак больше, если процесс  - необратимый.

     Неравенство [(3.58)](http://fn.bmstu.ru/phys/bib/physbook/tom2/ch3/formulas/fml3.58.htm) может быть также записано и в дифференциальной форме

|  |  |
| --- | --- |
| Формула 3.59. | (3.59) |

     Если рассмотреть адиабатически изолированную термодинамическую систему, для которой , то выражение [(3.59)](http://fn.bmstu.ru/phys/bib/physbook/tom2/ch3/formulas/fml3.59.htm) примет вид

|  |  |
| --- | --- |
| Формула 3.60 | (3.60) |

     или в интегральной форме

|  |  |
| --- | --- |
| Формула 3.61. | (3.61) |

     Полученные неравенства выражают собой [закон возрастания энтропии](http://fn.bmstu.ru/phys/bib/physbook/tom2/keyw/keyw_09.htm#53), который можно сформулировать следующим образом:

     В адиабатически изолированной термодинамической системе энтропия не может убывать: она или сохраняется, если в системе происходят только обратимые процессы, или возрастает, если в системе протекает хотя бы один необратимый процесс.

     Записанное утверждение является ещё одной формулировкой второго начала термодинамики.

     Таким образом, изолированная термодинамическая система стремится к максимальному значению энтропии, при котором наступает состояние термодинамического равновесия.

     Необходимо отметить, что если система не является изолированной, то в ней возможно уменьшение энтропии. Примером такой системы может служить, например, обычный холодильник, внутри которого возможно уменьшение энтропии. Но для таких открытых систем это локальное понижение энтропии всегда компенсируется возрастанием энтропии в окружающей среде, которое превосходит локальное ее уменьшение.

     С законом возрастания энтропии непосредственно связан парадокс, сформулированный в 1852 году Томсоном (лордом Кельвином) и названый им [гипотезой тепловой смерти Вселенной](http://fn.bmstu.ru/phys/bib/physbook/tom2/keyw/keyw_04.htm#37). Подробный анализ этой гипотезы был выполнен Клаузиусом, который считал правомерным распространение на всю Вселенную закона возрастания энтропии. Действительно, если рассмотреть Вселенную как адиабатически изолированную термодинамическую систему, то, учитывая ее бесконечный возраст, на основании закона возрастания энтропии можно сделать вывод о достижении ею максимума энтропии, то есть состояния термодинамического равновесия. Но в реально окружающей нас Вселенной этого не наблюдается.

     Попытка избежать указанного противоречия гипотезы тепловой смерти Вселенной была предпринята Больцманом, который показал, что и в состоянии термодинамического равновесия наблюдаются флуктуации термодинамических параметров. Если считать, что наблюдаемая Вселенная является следствием такой флуктуации, то противоречия парадокса тепловой смерти Вселенной снимаются. Более подробно равновесные флуктуации описаны в пятой главе.

     Задача 3.7. Термодинамическая система, состоящая из двух находящихся в тепловом контакте тел, помещена в адиабатическую оболочку. Теплоемкости тел одинаковы и равны . Температура первого тела в некоторый момент времени равна , а второго - , причем . Найти уравнение, описывающее изменение энтропии системы с течением времени при её стремлении к состоянию термодинамического равновесия. Считать, что передача теплоты от одного тега к другому описывается формулой: , где  - коэффициент теплопередачи.

     Решение: После достижения системой состояния термодинамического равновесия температура тел станет одинаковой (см. задачу 3.6):

 ,

     а её энтропия примет максимальное значение .

     Изменение энтропии системы при её переходе в равновесие можно определить по формуле (см. задачу 3.6):

 .

     Из этой формулы следует:

 .

     В соответствии со свойством аддитивности энтропии и формулой [(3.52)](http://fn.bmstu.ru/phys/bib/physbook/tom2/ch3/formulas/fml3.52.htm) для изменения энтропии системы можно записать:

 .

     Здесь учтено, что теплота отводится от второго тела и подводится к первому.

     Тогда уравнение, описывающее изменение энтропии с течением времени при стремлении системы к состоянию термодинамического равновесия, примет окончательный вид:

 .

     При  правая часть этого уравнения больше нуля, что соответствует росту энтропии с течением времени: . При достижении энтропией системы  равновесного (максимального) значения , правая часть полученного уравнения становится равной нулю, и дальнейшего роста энтропии не происходит.

8) Хими́ческий потенциа́л  — один из [термодинамических](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B5%D1%80%D0%BC%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%BD%D0%B0%D0%BC%D0%B8%D0%BA%D0%B0) параметров системы, а именно [энергия](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%B8%D1%8F) добавления одной частицы в систему без совершения работы. Определение химического потенциала можно записать в виде:



где Е — [энергия](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%B8%D1%8F) системы, S — её [энтропия](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B5%D1%80%D0%BC%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%BD%D0%B0%D0%BC%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F_%D1%8D%D0%BD%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BF%D0%B8%D1%8F), N — количество частиц в системе.

Эта формула определяет, кроме химического потенциала , также [давление](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D0%B0%D0%B2%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5) P и [температуру](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B5%D0%BC%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%82%D1%83%D1%80%D0%B0) T.

Можно доказать, что химический потенциал задаётся формулой

,

где  — [потенциал Гиббса](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D1%82%D0%B5%D0%BD%D1%86%D0%B8%D0%B0%D0%BB_%D0%93%D0%B8%D0%B1%D0%B1%D1%81%D0%B0).

Если энергия системы зависит не от объёма, а от других термодинамических параметров , исходная формула принимает вид



Если в системе имеется несколько разных типов частиц, есть столько же разных химических потенциалов.

9) Из рассмотренного цикла Карно (п. 5.4) видно, что равны между собой отношения теплот к температурам, при которых они были получены или отданы в изотермическом процессе:

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|   | 001. |   |   |

Отношение теплоты Q в изотермическом процессе к температуре, при которой происходила передача теплоты, называется **приведенной теплотой** :

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|   | 003. |   | (6.1.1) |

       Для подсчета приведенной теплоты в произвольном процессе необходимо разбить этот процесс на бесконечно малые участки, где Т можно считать константой. Приведенная теплота на таком участке будет равна 
       Суммируя приведенную теплоту на всех участках процесса, получим:

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|   | 005. |   |   |

       Тогда в обратимом цикле Карно (п. 5.3, 5.4) имеем:

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|   | 006 |   |   |

       Этот результат справедлив для любого обратимого процесса.
       Таким образом, для процесса, происходящего по замкнутому циклу

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|   | 007 |   | (6.1.2) |

       Из равенства нулю интеграла, взятого по замкнутому контуру, следует, что подынтегральное выражение  есть полный дифференциал некоторой функции, которая определяется только состоянием системы и не зависит от пути, каким система пришла в это состояние. Это позволяет ввести новую функцию состояния S:

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|   | 009. |   | (6.1.3) |

       Функция состояния, полный дифференциал которой равен , называется энтропией (от греч. entropia – поворот, превращение) – мера способности теплоты превращаться в другие виды энергии.
       **Энтропия** S – это отношение полученной или отданной теплоты к температуре, при которой происходил этот процесс.

10) Количество теплоты, полученное рабочим телом от нагревателя при изотермическом расширении, равно

.

Аналогично, при изотермическом сжатии рабочее тело отдало холодильнику

.

Отсюда [коэффициент полезного действия](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D1%8D%D1%84%D1%84%D0%B8%D1%86%D0%B8%D0%B5%D0%BD%D1%82_%D0%BF%D0%BE%D0%BB%D0%B5%D0%B7%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D0%BE_%D0%B4%D0%B5%D0%B9%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%B8%D1%8F) тепловой машины Карно равен

.

Из последнего выражения видно, что КПД тепловой машины Карно зависит только от температур нагревателя и холодильника. Кроме того, из него следует, что КПД может составлять 100 % только в том случае, если температура холодильника равна [абсолютному нулю](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%B1%D1%81%D0%BE%D0%BB%D1%8E%D1%82%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D0%BD%D1%83%D0%BB%D1%8C_%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%82%D1%83%D1%80%D1%8B). Это невозможно, но не из-за недостижимости абсолютного нуля (этот вопрос решается только третьим началом термодинамики, учитывать которое здесь нет необходимости), а из-за того, что такой цикл или нельзя замкнуть, или он вырождается в совокупность двух совпадающих адиабат и изотерм.

Поэтому максимальный КПД любой тепловой машины будет меньше или равен КПД тепловой машины Карно, работающей при тех же температурах нагревателя и холодильника. Например, КПД идеального [цикла Стирлинга](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A6%D0%B8%D0%BA%D0%BB_%D0%A1%D1%82%D0%B8%D1%80%D0%BB%D0%B8%D0%BD%D0%B3%D0%B0) равен КПД цикла Карно.

Неравенство [Клаузиуса](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BB%D0%B0%D1%83%D0%B7%D0%B8%D1%83%D1%81%2C_%D0%A0%D1%83%D0%B4%D0%BE%D0%BB%D1%8C%D1%84_%D0%AE%D0%BB%D0%B8%D1%83%D1%81_%D0%AD%D0%BC%D0%BC%D0%B0%D0%BD%D1%83%D1%8D%D0%BB%D1%8C) (1854): Количество теплоты, полученное системой при любом круговом процессе, делённое на абсолютную температуру, при которой оно было получено (приведённоеколичество теплоты), неположительно.



Подведённое количество теплоты, квазистатически полученное системой, не зависит от пути перехода (определяется лишь начальным и конечным состояниями системы) - для[квазистатических процессов](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B2%D0%B0%D0%B7%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D0%BF%D1%80%D0%BE%D1%86%D0%B5%D1%81%D1%81) неравенство Клаузиуса обращается в равенство[[1]](http://ru.wikipedia.org/wiki/%EF%BF%BD%EF%BF%BD%EF%BF%BD%EF%BF%BD%EF%BF%BD%EF%BF%BD%EF%BF%BD%EF%BF%BD%EF%BF%BD%EF%BF%BD%EF%BF%BD_%EF%BF%BD%EF%BF%BD%EF%BF%BD%EF%BF%BD%EF%BF%BD%EF%BF%BD%EF%BF%BD%EF%BF%BD%EF%BF%BD#cite_note-0).



11) Цикл Карно́ — идеальный [термодинамический цикл](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B5%D1%80%D0%BC%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%BD%D0%B0%D0%BC%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D1%86%D0%B8%D0%BA%D0%BB). Тепловая машина Карно, работающая по этому циклу, обладает максимальным [КПД](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D1%8D%D1%84%D1%84%D0%B8%D1%86%D0%B8%D0%B5%D0%BD%D1%82_%D0%BF%D0%BE%D0%BB%D0%B5%D0%B7%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D0%BE_%D0%B4%D0%B5%D0%B9%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%B8%D1%8F) из всех машин, у которых максимальная и минимальная температуры осуществляемого цикла совпадают соответственно с максимальной и минимальной температурами цикла Карно. Состоит из 2 [адиабатических](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%B4%D0%B8%D0%B0%D0%B1%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D0%BF%D1%80%D0%BE%D1%86%D0%B5%D1%81%D1%81) и 2 [изотермических процессов](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%98%D0%B7%D0%BE%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%BC%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D0%BF%D1%80%D0%BE%D1%86%D0%B5%D1%81%D1%81).

Цикл Карно назван в честь французского военного инженера [Сади Карно](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B0%D1%80%D0%BD%D0%BE%2C_%D0%A1%D0%B0%D0%B4%D0%B8), который впервые его исследовал в [1824 году](http://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=1824_%D0%B3%D0%BE%D0%B4_%D0%B2_%D0%BD%D0%B0%D1%83%D0%BA%D0%B5&action=edit&redlink=1).

Одним из важных свойств цикла Карно является его обратимость: он может быть проведён как в прямом, так и в обратном направлении, при этом [энтропия](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BD%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BF%D0%B8%D1%8F)[адиабатически](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%B4%D0%B8%D0%B0%D0%B1%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D0%BF%D1%80%D0%BE%D1%86%D0%B5%D1%81%D1%81) изолированной (без теплообмена с окружающей средой) системы не меняется.

12) **ПЕРЕНОСА ЯВЛЕНИЯ** - неравновесные процессы, в результате к-рых в физ. системе происходит пространственный перенос электрич. [заряда](http://femto.com.ua/articles/part_1/1199.html), вещества, импульса, энергии, энтропии или к--л. др. физ. величины. Общую феноменологич. теорию П. я., применимую к любой системе (газообразной, жидкой или твёрдой), даёт [термодинамика неравновесных процессов](http://www.femto.com.ua/articles/part_2/4052.html). Более детально П. я. изучает[кинетика физическая](http://www.femto.com.ua/articles/part_1/1611.html) .П. я. в газах рассматриваются на основе [кинетической теории газов](http://www.femto.com.ua/articles/part_1/1613.html) с помощью [кинетического уравнения Больцмана](http://www.femto.com.ua/articles/part_1/1619.html) для ф-цни распределения молекул; П. я. в металлах - на основе кинетич. ур-ния для электронов в металле; перенос энергии в непроводящих кристаллах - с помощью кинетич. ур-ния для фононов кристаллич. решётки. Общая теория П. я. развивается в неравно-весной статистич. [механике](http://femto.com.ua/articles/part_1/2257.html) на основе [Лиувилля уравнения](http://www.femto.com.ua/articles/part_1/1970.html) для ф-ции распределения всех частиц, из к-рых состоит система (см. [Грина - Кубо формулы](http://www.femto.com.ua/articles/part_1/0879.html)).
Причина П. я. - возмущения, нарушающие состояние термодинамич. равновесия: действие внеш. элек-трич. поля, наличие пространств. неоднородностей состава, темп-ры или ср. скорости движения частиц системы. Перенос физ. величины происходит в направлении, обратном её градиенту, в результате чего изолированная от внеш. воздействий система приближается к состоянию термодинамич. равновесия. Если внеш. воздействия поддерживаются постоянными, П. я. протекают стационарно.
П. я. характеризуются необратимыми потоками Ji физ. величины, напр. диффузионным потоком вещества, тепловым потоком или тензором потока импульса, связанного с градиентами скоростей. При малых отклонениях системы от термодинамич. равновесия потоки линейно зависят от термодинамич. сил Хk, вызывающих отклонение от термодинамич. равновесия, и описываются феноменологич. ур-ниями



где Lik - феноменологич. коэф. переноса (в [термодинамике](http://femto.com.ua/articles/part_2/4051.html) неравновесных процессов) или [кинетические коэффициенты](http://www.femto.com.ua/articles/part_1/1615.html) (в физ. кинетике), вычисляемые с помощью решения кинетич. ур-ний. Термодинамич. силы Хk вызывают необратимые потоки; напр., градиент темп-ры вызывает поток теплоты ([теплопроводность](http://www.femto.com.ua/articles/part_2/4035.html) ),градиент концентрации вещества - поток компонента смеси ([диффузия](http://www.femto.com.ua/articles/part_1/1086.html) ),градиент массовой скорости - поток импульса (вязкое течение; см. [Вязкость](http://www.femto.com.ua/articles/part_1/0638.html)).
Перенос вещества, вызванный градиентом темп-ры, - [термодиффузию](http://www.femto.com.ua/articles/part_2/4065.html) и обратный ей процесс переноса тепла вследствие градиента концентрации ([Дюфура эффект](http://www.femto.com.ua/articles/part_1/1151.html))называют перекрёстными процессами. Для перекрёстных процессов в отсутствии магн. поля имеет место соотношение [симметрии](http://femto.com.ua/articles/part_2/3633.html) Lik = Lki([Онсагера теорема](http://www.femto.com.ua/articles/part_2/2596.html) ),являющееся следствием микроскопич. обратимости ур-ний, описывающих движение частиц. Если магн. поле отлично от нуля, то при замене ik нужно изменить направление магн. поля на противоположное.
П. я. обычно сопровождаются производством энтропии в единицу времени:



Это выражение является формулировкой [второго начала термодинамики](http://www.femto.com.ua/articles/part_1/0613.html) для П. я. В случае стационарных П. я. вся образующаяся энтропия отводится из системы.
Плотности потоков, кроме диссипативных частей, пропорциональных термодинамич. силам и связанных с производством энтропии, могут содержать недиссипативные части, к-рые соответствуют [конвекц](http://femto.com.ua/articles/part_1/1717.html). переносу физ. величин с гидродинамич. скоростью v(x,t). Локальная плотность энтропии S(x,t)тоже переносится с гпдродинамич. скоростью, так что производство энтропии происходит в элементе жидкости, движущейся с гидродинамич. скоростью. Поэтому S(x,t)удовлетворяет ур-нию баланса:



где - плотность производства энтропии, связанная с производством энтропии:



П. я. происходят не только в гомогенных системах, внутри к-рых отсутствуют поверхности раздела, но и в гетерогенных системах, состоящих из гомогенных подсистем, отделённых друг от друга или естеств. поверхностями раздела (таких, как жидкость и её пар), или полупроницаемыми мембранами. При возникновении в гетерогенной системе разности электрич. потенциалов, перепада давлений компонент, темп-р и т. д. между подсистемами возникают необратимые потоки заряда, компонент вещества, теплоты и т. п. Эти потоки связаны с термодинамич. силами линейными соотношениями, и П. я. в гетерогенных системах также сопровождаются производством энтропии. К подобным П. я. относятся электрокинетнческие **явления - перенос** заряда и вещества вследствие перепада электрич. потенциала и давления (в частности, фильтрация), [термомеханические эффекты](http://www.femto.com.ua/articles/part_2/4072.html) - перенос теплоты и массы в результате перепада темп-ры и давления в [гелии жидком](http://www.femto.com.ua/articles/part_1/0703.html).
К П. я. относятся также [перенос энергии](http://www.femto.com.ua/articles/part_2/2803.html) электронного возбуждения от возбуждённых атомов к невозбуждённым в веществе и [перенос излучения](http://www.femto.com.ua/articles/part_2/2802.html) в среде при наличии процессов испускания, поглощения и рассеяния. Рассеяние и размножение нейтронов является примером П. я., к-рый изучается на основе кинетич. ур-ния для нейтронов с учётом ядерных взаимодействий со средой. Интенсивно развивается теория П. я. на основе неравновесной статистической механики.

13) Математически уравнение диффузии и уравнение теплопроводности не различаются, и применение того или иного названия ограничено только конкретным приложением, причем второе представляется более частным, так как можно говорить, что в этом случае речь идет о диффузии тепловой энергии.

В смысле интерпретации при решении уравнения диффузии речь идет о нахождении зависимости концентрации вещества (или иных объектов) от пространственных координат и времени, причем задан коэффициент (в общем случае также зависящий от пространственных координат и времени), характеризующий проницаемость среды для диффузии. При решении уравнения теплопроводности речь идет о нахождении зависимости температуры среды от пространственных координат и времени, причем задана теплоемкость и теплопроводность среды (также в общем случае неоднородной).

Физически в том и другом случае предполагается отсутствие или пренебрежимость макроскопических потоков вещества. Таковы физические рамки применимости этих уравнений. Также, представляя непрерывный предел указанных задач (то есть не более, чем некоторое приближение), уравнение диффузии и теплопроводности в общем не описывают статистических флуктуаций и процессов, близких по масштабу к длине и времени свободного пробега, также весьма сильно отклоняясь от предполагаемого точного решения задачи в том, что касается корреляций на расстояниях, сравнимых (и больших) с расстояниями, проходимыми звуком (или свободными от сопротивления среды частицами при их характерных скоростях) в данной среде за рассматриваемое время.

Это в подавляющей части случаев сразу же означает и то, что уравнения диффузии и теплопроводности по области применимости далеки от тех областей, где становятся существенными квантовые эффекты или конечность скорости света, то есть в подавляющей части случаев не только по своему выводу, но и принципиально, ограничиваются областью классической ньютоновской физики.

* Ближайшим формальным, а во многом и содержательным, аналогом уравнения диффузии является [уравнение Шрёдингера](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A3%D1%80%D0%B0%D0%B2%D0%BD%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5_%D0%A8%D1%80%D1%91%D0%B4%D0%B8%D0%BD%D0%B3%D0%B5%D1%80%D0%B0), отличающееся от уравнения диффузии множителем мнимая единица перед производной по времени. Многие теоремы о решении уравнения Шрёдингера и даже некоторые виды формальной записи его решений прямо аналогичны соответствующим теоремам об уравнении диффузии и его решениях, однако качественно их решения различаются очень сильно.

14) Средние скорости молекул, газа очень велики - порядка сотен метров в секунду при обычных условиях. Однако процесс выравнивая неоднородности в газе вследствие молекулярного движения протекает весьма медленно. Это объясняется тем, что молекулы при перемещении испытывают соударения с другими молекулами. При каждом соударении скорость молекулы изменяется по величине и направлению. Вследствие этого, скорость, с которой молекула диффундирует из одной части газа в другую, значительно меньше средней скорости молекулярного движения. Для оценки скорости движения молекул вводится понятие средней длины свободного пробега. Таким образом, средняя дли свободного пробега  - это среднее расстояние, которое проходит молекула от столкновения до столкновения.

Для определения  вычислим сначала среднее число соударений  выбранной молекулы с другими молекулами за единицу времени. Будем считать, что молекула после соударения продолжает двигаться по прямой со средней скоростью движения  .



Молекулы, с которыми соударяется выбранная молекула, в первом приближении считаем неподвижными и принимаем их за сферические тела радиуса r. Пусть выбранная молекула движется вправо из положения  в положение  по прямой  (рис.11.3). При своем движении она испытывает соударения с теми неподвижными молекулами, центры которых лежат не дальше чем 2r от траектории  . Иными словами, движущаяся со средней скоростью молекула в течении одной секунды столкнется со всеми молекулами, центры которых находятся в объеме ограниченном цилиндром с радиусом 2r и длиной  , т.е.

.

Если концентрация молекул n , то внутри рассмотренного цилиндра находится число молекул, равное



Это число  и определяет среднее число соударений за единицу времени.

Предположение о том, что все молекулы, кроме одной, неподвижны, является, конечно не верным. В действительности все молекулы движутся, и возможность соударения двух частиц зависит от их относительной скорости. Поэтому вместо среднеарифметической скорости  должны входить средняя относительная скорость молекул  . Если скорости молекул распределены по закону Максвелла, то, как можно показать, средняя относительная скорость двух молекул однородного газа в  раз превышает  . Таким образом, среднее число соударений должно быть увеличено в  раз

|  |  |
| --- | --- |
| image531 | (11.7) |

Средний путь, проходимый молекулой за единицу времени, численно равен  . Поэтому средняя длина свободного пробега равна  или

|  |  |
| --- | --- |
| image536 | (11.8) |

Таким образом, средняя длина свободного пробега  не зависит от температуры газа, т.к. с ростом температуры одновременно возрастают и  , и  . При подсчете числа соударений и средней длины свободного пробега молекул за модель молекулы было принято шарообразное упругое тело. В действительности каждая молекула представляет собой сложную систему элементарных частиц и при рассмотрении упругого соударения молекул имелось в виду, что центры молекул могут сблизиться до некоторого наименьшего расстояния. Затем возникает силы отталкивания которые вызывают взаимодействие, подобное взаимодействию при упругом ударе. Среднее расстояние между центрами молекул, взаимодействующих, как при упругом ударе, называют эффективным диаметром  . Тогда

|  |  |
| --- | --- |
| image545 | (11.9) |

15) КРИСТАЛЛИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ вещества, характеризуется наличием дальнего порядка в расположении частиц (атомов, ионов, молекул). В К. с. существует и ближний порядок, к-рый характеризуется постоянными координац. числами, валентными углами и длинами хим. связей. Инвариантность характеристик ближнего порядка в К. с. приводит к совпадению структурных ячеек при их трансляционном перемещении и образованию трехмерной периодичности структуры (см. [Кристаллохимия](http://www.edudic.ru/hie/2791/) . [Кристаллы](http://www.edudic.ru/hie/2792/) ). Вследствие своей макс. упорядоченности К. с. в-ва характеризуется миним. внутр. энергией и является термодинамически равновесным состоянием при данных параметрах -давлении, т-ре, составе (в случае [твердых растворов](http://www.edudic.ru/hie/4938/) ) и др. Строго говоря, полностью упорядоченное К. с. реально не м. б. осуществлено, приближение к нему имеет место при стремлении т-ры к О К (т. наз. идеальный кристалл). Реальные тела в К. с. всегда содержат нек-рое кол-во [дефектов](http://www.edudic.ru/hie/1174/) , нарушающих как ближний, так и дальний порядок. Особенно много дефектов наблюдается в твердых р-рах, в к-рых отдельные частицы и их группировки статистически занимают разл. положения в пространстве. Вследствие трехмерной периодичности атомного строения основными признаками кристаллов являются однородность и анизотропия св-в и симметрия, к-рая выражается, в частности, в том, что при определенных условиях образования кристаллы приобретают форму многогранников (см. [Монокристаллов выращивание](http://www.edudic.ru/hie/3276/) ). Нек-рые св-ва в-ва на пов-сти кристалла и вблизи от нее существенно отличны от этих св-в внутри кристалла, в частности из-за нарушения симметрии. Состав и, соотв., св-ва меняются по объему кристалла из-за неизбежного изменения состава среды по мере роста кристалла. Т. обр., однородность св-в так же, как и наличие дальнего порядка, относится к характеристикам "идеального" К. с. Большинство тел в К. с. является поликристаллическими и представляет собой сростки большого числа мелких кристаллитов (зерен) - участков размером порядка 10-1-10-3 мм, неправильной формы и различно ориентированных. Зерна отделены друг от друга межкристаллитными слоями, в к-рых нарушен порядок расположения частиц. В межкристаллитных слоях происходит также концснтрирование примесей в процессе кристаллизации. Из-за случайной ориентации зерен поликристаллич. тело в целом (объем, содержащий достаточно много зерен) м. б. изотропным, напр. полученное при осаждении кристаллич. порошков с послед. спеканием. Однако обычно в процессе кристаллизации и особенно пластич. деформации возникает текстура - преимуществ, ориентация кристаллич. зерен в определенном направлении, приводящая к анизотропии св-в. На [диаграмме состояния](http://www.edudic.ru/hie/1179/) однокомпонентной системы вследствие [полиморфизма](http://www.edudic.ru/hie/4125/) К. с. может отвечать неск. полей, расположенных в области сравнительно низких т-р и повыш. давлений. Если имеется лишь одно поле К. с. и в-во химически не разлагается при повышении т-ры, то поле К. с. граничит с полями жидкости и газа по линиям плавления кристаллизации и возгонки - конденсации соотв., причем жидкость и газ (пар) могут находиться в метастабильном (переохлажденном) состоянии в поле К. с., тогда как К. с. не может находиться в поле жидкости или пара, т. е. кристаллич. в-во нельзя перегреть выше т-ры плавления или возгонки. Нек-рые в-ва (мезогены) при нагреве переходят в жидкокристаллич. состояние (см. [Жидкие кристаллы](http://www.edudic.ru/hie/249/) ). Если на диаграмме однокомпонентной системы имеются два и более полей К. с., эти поля граничат по линии полиморфных превращений. Кристаллич. в-во можно перегреть или переохладить ниже т-ры полиморфного превращения. В этом случае рассматриваемое К. с. в-ва может находиться в поле др. кристаллич. модификации и является метастабильным. В то время как жидкость и пар благодаря существованию критич. точки на линии испарения можно непрерывно перевести друг в друга, вопрос о возможности непрерывного взаимного превращ. К. с. и жидкости окончательно не решен. Для нек-рых в-в можно оценить критич. параметры -давление и т-ру, при к-рых Hпл и Vпл равны нулю, т. е. К. с. и жидкость термодинамически неразличимы. Но реально такое превращ. не наблюдалось ни для одного в-ва (см.[Критическое состояние](http://www.edudic.ru/hie/2794/) ). В-во из К. с. можно перевести в неупорядоченное состояние (аморфное или стеклообразное), не отвечающее минимуму своб. энергии, не только изменением параметров состояния (давления, т-ры, состава), но и воздействием ионизирующего излучения или тонким измельчением. Критич. размер частиц, при к-ром уже не имеет смысла говорить о К. с., примерно 1 нм, т.е. того же порядка, что и размер элементарной ячейки. К. с. отличают обычно от др. разновидностей твердого состояния (стеклообразного, аморфного) по рентгенограммам в-ва. Лит.: Шаскольская М. П., Кристаллография, М., 1976; Современная кристаллография, под ред. Б. К. Вайнштeйна. т. I. М., 1979. П. И. Федоров.

16) Жи́дкие криста́ллы (сокращённо ЖК) — это фазовое состояние, в которое переходят некоторые вещества при определенных условиях (температура, давление, концентрация в растворе). Жидкие кристаллы обладают одновременно свойствами как жидкостей (текучесть), так и кристаллов ([анизотропия](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BD%D0%B8%D0%B7%D0%BE%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BF%D0%B8%D1%8F)). По структуре ЖК представляют собой вязкие жидкости, состоящие из [молекул](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%BE%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%83%D0%BB%D0%B0) вытянутой или дискообразной формы, определённым образом упорядоченных во всем объёме этой жидкости. Наиболее характерным свойством ЖК является их способность изменять ориентацию молекул под воздействием [электрических полей](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B5_%D0%BF%D0%BE%D0%BB%D0%B5), что открывает широкие возможности для применения их в промышленности. По типу ЖК обычно разделяют на две большие группы: [нематики](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9D%D0%B5%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B5_%D0%B6%D0%B8%D0%B4%D0%BA%D0%B8%D0%B5_%D0%BA%D1%80%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%BB%D0%BB%D1%8B) и [смектики](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%BC%D0%B5%D0%BA%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B5_%D0%B6%D0%B8%D0%B4%D0%BA%D0%B8%D0%B5_%D0%BA%D1%80%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%BB%D0%BB%D1%8B). В свою очередь [нематики](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9D%D0%B5%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B5_%D0%B6%D0%B8%D0%B4%D0%BA%D0%B8%D0%B5_%D0%BA%D1%80%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%BB%D0%BB%D1%8B) подразделяются на собственно [нематические](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9D%D0%B5%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B5_%D0%B6%D0%B8%D0%B4%D0%BA%D0%B8%D0%B5_%D0%BA%D1%80%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%BB%D0%BB%D1%8B) и [холестерические](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A5%D0%BE%D0%BB%D0%B5%D1%81%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B5_%D0%B6%D0%B8%D0%B4%D0%BA%D0%B8%D0%B5_%D0%BA%D1%80%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%BB%D0%BB%D1%8B) жидкие кристаллы.

Ячейка Керра — устройство, основанное на [эффекте Керра](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D1%84%D1%84%D0%B5%D0%BA%D1%82_%D0%9A%D0%B5%D1%80%D1%80%D0%B0) — явлении возникновения под действием электрического поля в оптически [изотропных](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%98%D0%B7%D0%BE%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BF%D0%BD%D1%8B%D0%B9) средах [двойного лучепреломления](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D0%B2%D0%BE%D0%B9%D0%BD%D0%BE%D0%B5_%D0%BB%D1%83%D1%87%D0%B5%D0%BF%D1%80%D0%B5%D0%BB%D0%BE%D0%BC%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5). Отличается высоким быстродействием ( ÷  секунды). Состоит из среды с Керроевской нелинейностью (например CS2 — [сероуглеродом](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B5%D1%80%D0%BE%D1%83%D0%B3%D0%BB%D0%B5%D1%80%D0%BE%D0%B4)) помещённой между обкладок конденсатора. При прохождении мощного импульса электрического тока через ячейку оптические свойства среды меняются так, что свет меняет направление поляризации при прохождении ячейки.

17) Статистика Фе́рми — Дира́ка в [статистической физике](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F_%D1%84%D0%B8%D0%B7%D0%B8%D0%BA%D0%B0) — квантовая статистика, применяемая к системам тождественных фермионов (как правило, частиц с полуцелым [спином](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%BF%D0%B8%D0%BD), подчиняющихся [принципу запрета Паули](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D1%80%D0%B8%D0%BD%D1%86%D0%B8%D0%BF_%D0%9F%D0%B0%D1%83%D0%BB%D0%B8), то есть, одно и то же [квантовое состояние](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D1%82%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B5_%D1%81%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%8F%D0%BD%D0%B8%D0%B5) не может занимать более одной частицы); определяет[распределение вероятностей](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%B0%D1%81%D0%BF%D1%80%D0%B5%D0%B4%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5_%D0%B2%D0%B5%D1%80%D0%BE%D1%8F%D1%82%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%B9) нахождения [фермионов](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%B5%D1%80%D0%BC%D0%B8%D0%BE%D0%BD) на энергетических уровнях системы, находящейся в термодинамическом равновесии; предложена в[1926 году](http://ru.wikipedia.org/wiki/1926_%D0%B3%D0%BE%D0%B4) итальянским физиком [Энрико Ферми](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%B5%D1%80%D0%BC%D0%B8%2C_%D0%AD%D0%BD%D1%80%D0%B8%D0%BA%D0%BE) и одновременно английским физиком [Полем Дираком](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D0%B8%D1%80%D0%B0%D0%BA%2C_%D0%9F%D0%BE%D0%BB%D1%8C_%D0%90%D0%B4%D1%80%D0%B8%D0%B5%D0%BD_%D0%9C%D0%BE%D1%80%D0%B8%D1%81), который выяснил её квантово-механический смысл; позволяет найти [вероятность](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%B5%D1%80%D0%BE%D1%8F%D1%82%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C), с которой фермион занимает данный энергетический уровень.

Работы по статистике Ферми — Дирака были опубликованы в [1926 году](http://ru.wikipedia.org/wiki/1926_%D0%B3%D0%BE%D0%B4), а в [1927](http://ru.wikipedia.org/wiki/1927) она была применена [Арнольдом Зоммерфельдом](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%97%D0%BE%D0%BC%D0%BC%D0%B5%D1%80%D1%84%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%B4%2C_%D0%90%D1%80%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D1%8C%D0%B4) к [электронам](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD) в [металле](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%B0%D0%BB%D0%BB).

В статистике Ферми — Дирака среднее число частиц в состоянии с энергией  есть



где

 — среднее число частиц в состоянии ,

 — энергия состояния ,

 — [кратность вырождения](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C_%D0%B2%D1%8B%D1%80%D0%BE%D0%B6%D0%B4%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F) состояния  (число состояний с энергией ),

 — [химический потенциал](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A5%D0%B8%D0%BC%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D0%BF%D0%BE%D1%82%D0%B5%D0%BD%D1%86%D0%B8%D0%B0%D0%BB) (который равен [энергии Ферми](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%B8%D1%8F_%D0%A4%D0%B5%D1%80%D0%BC%D0%B8)  при абсолютном нуле температуры),

 — [постоянная Больцмана](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%8F%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D0%91%D0%BE%D0%BB%D1%8C%D1%86%D0%BC%D0%B0%D0%BD%D0%B0),

 — абсолютная [температура](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B5%D0%BC%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%82%D1%83%D1%80%D0%B0).

В (идеальном) ферми-газе в пределе низких температур . В этом случае (полагая уровни энергии невырожденными ), функция распределения частиц называется функцией Ферми:



## 18)                             Закон Стефана—Больцмана

Нагретые тела излучают энергию в виде электромагнитных волн различной длины. Когда мы говорим, что тело «раскалено докрасна», это значит, что его температура достаточно высока, чтобы тепловое излучение происходило в видимой, световой части спектра. На атомарном уровне излучение становится следствием испускания фотонов возбужденными атомами (см. Излучение черного тела). Закон, описывающий зависимость энергии теплового излучения от температуры, был получен на основе анализа экспериментальных данных австрийским физиком Йозефом Стефаном и теоретически обоснован также австрийцем Людвигом Больцманом (см. Постоянная Больцмана).

Чтобы понять, как действует этот закон, представьте себе атом, излучающий свет в недрах Солнца. Свет тут же поглощается другим атомом, излучается им повторно — и таким образом передается по цепочке от атома к атому, благодаря чему вся система находится в состоянии энергетического равновесия. В равновесном состоянии свет строго определенной частоты поглощается одним атомом в одном месте одновременно с испусканием света той же частоты другим атомом в другом месте. В результате интенсивность света каждой длины волны спектра остается неизменной.

Температура внутри Солнца падает по мере удаления от его центра. Поэтому, по мере движения по направлению к поверхности, спектр светового излучения оказывается соответствующим более высоким температурам, чем температура окружающий среды. В результате, при повторном излучении, согласно закону Стефана—Больцмана, оно будет происходить на более низких энергиях и частотах, но при этом, в силу закона сохранения энергии, будет излучаться большее число фотонов. Таким образом, к моменту достижения им поверхности спектральное распределение будет соответствовать температуре поверхности Солнца (около 5 800 К), а не температуре в центре Солнца (около 15 000 000 К).

Энергия, поступившая к поверхности Солнца (или к поверхности любого горячего объекта), покидает его в виде излучения. Закон Стефана—Больцмана как раз и говорит нам, какова излученная энергия. Этот закон записывается так:

    E = σT 4

где Т — температура (в кельвинах), а σ — постоянная Больцмана. Из формулы видно, что при повышении температуры светимость тела не просто возрастает — она возрастает в значительно большей степени. Увеличьте температуру вдвое, и светимость возрастет в 16 раз!

## Закон Вина

Мы уже видели, что маленькая дырка в полости моделирует абсолютно чёрное тело, а полость заполнена равновесным излучением, тогда излучение, выходящее из этой дырки и есть излучение чёрного тела.1)

Я уже говорил, что получить для произвольного тела теоретически монохроматическую излучательную способность, то есть спектральную плотность вот этого стола, например, невозможно, реальные тела устроены очень сложно, чтобы теория там могла работать, а получить теоретически функцию , конечно, теория должна.2)

|  |
| --- |
|  |
|  | ref-2_1189514479-5395 |

Мы её получим дальше, а сейчас я просто приведу её вид.

Температура T2 больше T1, с ростом температуры эта функция растёт (на всех длинах волн излучение увеличивается), но максимум съезжает в область коротких волн.3) Длина волны λmax очень просто зависит от температуры: закон Вина

.

19) Вы́нужденное излуче́ние, индуци́рованное излучение — генерация нового [фотона](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%BE%D1%82%D0%BE%D0%BD) при переходе квантовой системы ([атома](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D1%82%D0%BE%D0%BC), [молекулы](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%BE%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%83%D0%BB%D0%B0), [ядра](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%BD%D0%BE%D0%B5_%D1%8F%D0%B4%D1%80%D0%BE) и т. д.) из возбуждённого в стабильное состояние (меньший [энергетический уровень](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%B5%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D1%83%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B5%D0%BD%D1%8C)) под воздействием индуцирующего фотона, энергия которого была равна разности энергий уровней. Созданный фотон имеет ту же энергию, импульс, фазу и поляризацию, что и индуцирующий фотон (который при этом не поглощается). Оба фотона являются [когерентными](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D0%B3%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BD%D1%82%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C).

### [Спонтанное излучение](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%BF%D0%BE%D0%BD%D1%82%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D0%BE%D0%B5_%D0%B8%D0%B7%D0%BB%D1%83%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5)

Если атом находится в возбуждённом состоянии, он может самопроизвольно перейти в основное состояние с вероятностью, пропорциональной количеству возбуждённых атомов N2. Разница в энергии между этими состояниями ΔE при этом излучится атомом в виде фотона частоты ν21, которую можно найти из выражения, приведённого выше.

При этом процессе фотоны излучаются неупорядоченно (стохастически), т. е. [фазы](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%B0%D0%B7%D0%B0_%D0%BA%D0%BE%D0%BB%D0%B5%D0%B1%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B9) волн таких фотонов не совпадают. Другими словами, спонтанное излучение [некогерентно](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D0%B3%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BD%D1%82%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C). В случае отсутствия других механизмов, количество возбуждённых атомов в момент времени t можно найти как

,

где N2(0) — количество возбуждённых атомов в момент времени t=0, τ21 — предполагаемое время перехода между двумя состояниями.

### [[править](http://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%98%D0%BD%D0%B2%D0%B5%D1%80%D1%81%D0%B8%D1%8F_%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D1%85_%D0%BD%D0%B0%D1%81%D0%B5%D0%BB%D1%91%D0%BD%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%B9&action=edit&section=5)][Вынужденное излучение](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D1%8B%D0%BD%D1%83%D0%B6%D0%B4%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D0%BE%D0%B5_%D0%B8%D0%B7%D0%BB%D1%83%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5)

Если атом уже находится в возбуждённом состоянии, переход к основному состоянию может произойти принудительно, если рядом пройдёт фотон частоты ν21, соответствующей энергии ΔE. При этом атом излучит второй фотон частоты ν21. Так как первый фотон при этом не поглотился, на выходе мы будем иметь уже два фотона одинаковой частоты. Такой процесс называетсявынужденным излучением. Количество принудительно излучивших атомов пропорционально числу атомов в возбуждённом состоянии N2, а также интенсивности внешнего излучения.

Ключевым моментом процесса вынужденного излучения является то, что второй фотон имеет ту же частоту и фазу, что и первый. Другими словами, оба фотона [когерентны](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D0%B3%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BD%D1%82%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C). Это свойство делает возможным процесс оптического усиления, а, следовательно, и создание [лазеров](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9B%D0%B0%D0%B7%D0%B5%D1%80).

В процессе работы лазера имеют место все три описанных выше механизма взаимодействия света с веществом. В начальный момент атомы переходят в возбуждённое состояние с помощью процесса накачки, который описан ниже. Некоторые из этих атомов спонтанно излучат некогерентные фотоны частоты ν. Эти фотоны возвращаются в рабочее тело лазера с помощью оптического резонатора, элемента конструкции лазера. Часть этих фотонов поглотится атомами, находящимися в основном состоянии, и они будут потеряны для процесса работы лазера. Другая же часть вызовет вынужденное излучение возбуждённых атомов, создавая когерентные фотоны. В результате мы получим оптическое усиление.

Если количество фотонов, участвующих в усилении за единицу времени больше числа фотонов, поглощённых атомами, общее количество фотонов начнёт увеличиваться, и можно будет сказать, что коэффициент усиления рабочего тела стал больше единицы.

Если использовать приведённые выше соотношения для процессов абсорбции и вынужденного излучения, интенсивность каждого процесса пропорциональна количеству атомов в основном и возбуждённом состоянии N1 и N2. В случае, если количество атомов в основном состоянии намного больше, чем в возбуждённом (N1 > N2), процесс абсорбции будет доминировать и все фотоны поглотятся. В случае равенства этих величин (N1 = N2), количество фактов поглощения будет соответствовать количеству фактов вынужденного излучения, а рабочее тело будет оптически прозрачным. Если же количество возбуждённых атомов будет преобладать (N1 < N2), процесс излучения будет доминировать. Другими словами, для работы лазера необходима инверсия населенностей.

20) Инверсия электронных населённостей — одно из фундаментальных понятий [физики](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%B8%D0%B7%D0%B8%D0%BA%D0%B0) и [статистической механики](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F_%D0%BC%D0%B5%D1%85%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%BA%D0%B0), используемое для описания принципов функционирования [лазеров](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9B%D0%B0%D0%B7%D0%B5%D1%80).

Чтобы понять концепцию инверсии населённостей, необходимо сначала пояснить некоторые моменты [термодинамики](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B5%D1%80%D0%BC%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%BD%D0%B0%D0%BC%D0%B8%D0%BA%D0%B0) и законы взаимодействия света с веществом. Для примера представим, что рабочее тело лазера состоит из нескольких [атомов](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D1%82%D0%BE%D0%BC), каждый из которых может находиться в одном из двух энергетических состояний:

1. Основное состояние, с энергией E1, или
2. Возбуждённое состояние, с энергией E2, причём E2>E1.

Количество атомов, находящихся в основном состоянии, примем равным N1, а количество возбуждённых атомов — N2.

Таким образом, общее число атомов будет

N = N1 + N2.

Разница между энергетическими уровнями ΔE = E2-E1 определяет характерную частоту ν21 света, который взаимодействует с атомами. Найти её можно из следующего выражения:

,

где h — [постоянная Планка](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%8F%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D0%9F%D0%BB%D0%B0%D0%BD%D0%BA%D0%B0).

Если группа атомов находится в термодинамическом равновесии, то число атомов, находящихся в каждом состоянии, можно найти с помощью [распределения Больцмана](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%B0%D1%81%D0%BF%D1%80%D0%B5%D0%B4%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5_%D0%91%D0%BE%D0%BB%D1%8C%D1%86%D0%BC%D0%B0%D0%BD%D0%B0):

,

где T — температура группы атомов, k — [постоянная Больцмана](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%8F%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D0%91%D0%BE%D0%BB%D1%8C%D1%86%D0%BC%D0%B0%D0%BD%D0%B0).

Таким образом, мы можем рассчитать населённость каждого энергетического уровня для комнатной температуры (T≈300K) для энергии ΔE, соответствующей видимому свету (ν≈5·1014 Гц).

Так как E2 — E1 >> kT, следовательно показатель степени в вышеприведённом выражении представляет собой большое отрицательное число, т. е. N2/N1 крайне мало, а число возбуждённых атомов практически равно нулю.

Таким образом, в случае термодинамического равновесия, состояние с низкой энергией намного популярней возбуждённого состояния, и это является нормальным состоянием системы. Если удастся каким-либо способом обратить ситуацию, т. е. сделать N2/N1 >  1, то тогда можно будет сказать, что система перешла в состояние с инверсией электронных населённостей.

Анализ этих утверждений показывает, что в случае термодинамического равновесия, согласно распределению Больцмана, для любых положительных значений ΔE и температуры, N1 всегда будет значительно превышать N2. Отсюда следует, что для получения инверсии населённостей система не может находиться в термодинамическом равновесии.

21) Как указано выше, для работы лазера необходима инверсия населённостей, однако получить её для группы атомов, находящихся в термодинамическом равновесии, невозможно. Фактически,прямой переход атомов в возбуждённое состояние будет всегда компенсироваться процессами спонтанного и вынужденного излучений. Лучшее, что может быть достигнуто в такой ситуации — оптическая прозрачность в случае N1 = N2 = N/2, но не усиление.

Чтобы достигнуть неравновесного состояния, необходимо использовать косвенные способы перевода атомов в возбуждённое состояние. Чтобы понять, как это работает, мы будем использовать более реалистичную модель, известную как трёхуровневый лазер. Возьмем ещё раз группу из N атомов, но теперь каждый из них может находиться в трёх различных энергетических состояниях, на уровнях 1, 2 и 3 с энергиями E1,E2 и E3, в количестве N1, N2 и N3, соответственно. При этом диаграмма энергетических уровней будет выглядеть следующим образом:

22) В адиабатическом и одноэлектронном приближениях состояние электронов кристалла описывается с помощью уравнения Шредингера:

 (1)

.

Однако решение уравнения (1) представляет собой сложную задачу, потому что волновая функция электрона с координатой r () зависит от волновых функций всех остальных электронов через rl, поэтому в квантовой теории твердых тел используются новые приближения. В частности всю совокупность электронов кристалла делят на три группы, в зависимости от степени их ионизации в объеме кристалла: свободные электроны, слабосвязанные электроны, сильно связанные электроны.

Свободные электроны – это электроны проводимости металла они “чувствуют” поле кристаллической решетки. Этот случай реализуется тогда, когда кинетическая энергия электрона больше абсолютной величины потенциальной энергии кристалла. Естественно на свободный электрон не действует сила электрического поля кристалла. В этом случае электрическое поле всех ядер скомпенсировано электрическим полем всех электронов кроме рассматриваемого: , следовательно, для свободного электрона .

Для свободных электронов кристалла существует потенциальный барьер лишь на его границе, обозначим через U0 высоту потенциального барьера, для свободного электрона с нулевой энергией. Таким образом, в реальном кристалле свободный электрон движется в потенциальном ящике с “гладким” дном.

Рассмотрим 2 случая: 1) движение электрона в кристалле не ограниченных размеров и 2) в реальном кристалле.

1) Свободный электрон, движущийся в кристалле не ограниченных размеров не “чувствуют” не только периодического поля кристаллической решетки, но и не “чувствуют” границы. Как известно потенциальная энергия определяется с точностью до постоянной величины, поэтому потенциальную энергию электронов в кристалле можно принять равной , тогда полная энергия электрона равна:

.

Свяжем с направлением движения свободного электрона ось x и введем обозначения: , следовательно , видно что kx имеет размерность обратной длине, т.е. она лежит в обратном пространстве.

23)

|  |
| --- |
| [clip_image368](http://www.mylect.ru/images/stories/clip_image368_2.gif) |

Для определенности рассмотрим кристалл в виде линейной цепочки периодически расположенных атомов (одномерный кристалл). Пусть a – период кристалла.

Обратная решетка такого кристалла будет также линейной (одномерной) с периодом равным .

|  |
| --- |
|  |
|  | clip_image371 |

Первая зона Бриллюэна занимает интервал от  до , вторая зона Бриллюэна занимает интервал от ![clip_image373[1]]() до  и от  до ![clip_image370[1]](), третья зона Бриллюэна занимает интервал от ![clip_image377[1]]() до  и от до .

Рассмотрим с квантово-механической точки зрения трансляционное (направленное) движение связанного электрона такого одномерного кристалла под действием внешнего электрического поля , действующего вдоль цепочки атомов. Движение электрона под действием поля будем рассматривать не как движение микрочастицы, а как распространение электромагнитной волны вдоль цепочки атомов, в положительном направлении оси x, такую ситуацию можно создать в трех мерном кристалле, если приложить поле вдоль цепочки одинаковых атомов кристалла.

Связанный электрон кристалла, как коллективизированная частица локализован в достаточно большой области пространства: ∆x ~ L, тогда в соответствии с соотношением неопределенности ∆x∆p ~ ħ, неопределенность значения импульса связанного электрона и его энергии очень мала, потому что ∆x велико; следовательно в этом случае состояние связанных электронов можно описывать путем суперпозиции стоячих волн с близкими значениями волновых векторов; т.е. состояние связанного электрона мы можем описывать с помощью волнового пакета, движущегося со скоростью . С этой скоростью и перемещается электрон под действием электрического поля. Свободный электрон кристалла под действием электрического поля движется так, что его энергия в зависимости от волнового вектора ![clip_image160[19]]() изменяется по параболическому закону: .

24) Сверхпроводи́мость — свойство некоторых [материалов](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B0%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%B8%D0%B0%D0%BB) обладать строго нулевым [электрическим сопротивлением](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A3%D0%B4%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%BE%D0%B5_%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B5_%D1%81%D0%BE%D0%BF%D1%80%D0%BE%D1%82%D0%B8%D0%B2%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5) при достижении ими [температуры](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B5%D0%BC%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%82%D1%83%D1%80%D0%B0) ниже определённого значения (критическая температура). Известны несколько десятков чистых элементов, [сплавов](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%BF%D0%BB%D0%B0%D0%B2) и [керамик](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B5%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%B8%D0%BA%D0%B0), переходящих в сверхпроводящее состояние. Сверхпроводимость — [квантовое явление](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D1%82%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%8F_%D0%BC%D0%B5%D1%85%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%BA%D0%B0). Оно характеризуется также [эффектом Мейснера](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D1%84%D1%84%D0%B5%D0%BA%D1%82_%D0%9C%D0%B5%D0%B9%D1%81%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B0), заключающемся в полном вытеснении [магнитного поля](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B0%D0%B3%D0%BD%D0%B8%D1%82%D0%BD%D0%BE%D0%B5_%D0%BF%D0%BE%D0%BB%D0%B5) из объема сверхпроводника. Существование этого эффекта показывает, что сверхпроводимость не может быть описана просто как идеальная проводимость в классическом понимании.

Открытие в 1986—1993 гг. ряда высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) далеко отодвинуло температурную границу сверхпроводимости и позволило практически использовать сверхпроводящие материалы не только при температуре [жидкого гелия](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%96%D0%B8%D0%B4%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D0%B3%D0%B5%D0%BB%D0%B8%D0%B9) (4.2 К), но и при температуре кипения [жидкого азота](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%96%D0%B8%D0%B4%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D0%B0%D0%B7%D0%BE%D1%82) (77 К), гораздо более дешевой криогенной жидкости.

25) Полупроводники́ — [материалы](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B0%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%B8%D0%B0%D0%BB), которые по своей [удельной проводимости](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F_%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%BC%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C) занимают промежуточное место между [проводниками](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D0%B8%D0%BA) и [диэлектриками](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D0%B8%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%B8%D0%BA) и отличаются от[проводников](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D0%B8%D0%BA) сильной зависимостью [удельной проводимости](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F_%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%BC%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C) от концентрации примесей, температуры и воздействия различных видов [излучения](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%98%D0%B7%D0%BB%D1%83%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5). Основным свойством этих материалов является увеличение электрической проводимости с ростом температуры[[1]](http://ru.wikipedia.org/wiki/%EF%BF%BD%EF%BF%BD%EF%BF%BD%EF%BF%BD%EF%BF%BD%EF%BF%BD%EF%BF%BD%EF%BF%BD%EF%BF%BD%EF%BF%BD%EF%BF%BD%EF%BF%BD%EF%BF%BD%EF%BF%BD#cite_note-0).

Полупроводниками являются вещества, [ширина запрещённой зоны](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A8%D0%B8%D1%80%D0%B8%D0%BD%D0%B0_%D0%B7%D0%B0%D0%BF%D1%80%D0%B5%D1%89%D1%91%D0%BD%D0%BD%D0%BE%D0%B9_%D0%B7%D0%BE%D0%BD%D1%8B) которых составляет порядка нескольких [электрон-вольт](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD-%D0%B2%D0%BE%D0%BB%D1%8C%D1%82) (эВ). Например, [алмаз](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D0%BC%D0%B0%D0%B7) можно отнести кширокозонным полупроводникам, а [арсенид индия](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D1%80%D1%81%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B4_%D0%B8%D0%BD%D0%B4%D0%B8%D1%8F) — к узкозонным. К числу полупроводников относятся многие химические элементы (германий, кремний, селен, теллур, мышьяк и другие), огромное количество сплавов и химических соединений (арсенид галлия и др.). Почти все неорганические вещества окружающего нас мира — полупроводники. Самым распространённым в природе полупроводником является [кремний](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D1%80%D0%B5%D0%BC%D0%BD%D0%B8%D0%B9), составляющий почти 30 % земной коры.

В зависимости от того, отдаёт ли [примесной](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D1%80%D0%B8%D0%BC%D0%B5%D1%81%D1%8C_%28%D1%85%D0%B8%D0%BC%D0%B8%D1%8F%29) [атом](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D1%82%D0%BE%D0%BC) [электрон](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD) или захватывает его, примесные атомы называют [донорными](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D0%BE%D0%BD%D0%BE%D1%80_%28%D1%84%D0%B8%D0%B7%D0%B8%D0%BA%D0%B0_%D0%BF%D0%BE%D0%BB%D1%83%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D0%B8%D0%BA%D0%BE%D0%B2%29) или [акцепторными](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BA%D1%86%D0%B5%D0%BF%D1%82%D0%BE%D1%80_%28%D1%84%D0%B8%D0%B7%D0%B8%D0%BA%D0%B0_%D0%BF%D0%BE%D0%BB%D1%83%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D0%B8%D0%BA%D0%BE%D0%B2%29). Характер примеси может меняться в зависимости от того, какой атом кристаллической решётки она замещает, в какую кристаллографическую плоскость встраивается.

Проводимость полупроводников сильно зависит от температуры. Вблизи температуры [абсолютного нуля](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%B1%D1%81%D0%BE%D0%BB%D1%8E%D1%82%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D1%8C) полупроводники имеют свойства [диэлектриков](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D0%B8%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%B8%D0%BA).

#### Собственная проводимость

Полупроводники, в которых свободные электроны и «дырки» появляются в процессе [ионизации](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%98%D0%BE%D0%BD%D0%B8%D0%B7%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F) атомов, из которых построен весь кристалл, называют полупроводниками с собственной проводимостью. В полупроводниках с собственной [проводимостью](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F_%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%BC%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C) концентрация свободных электронов равняется концентрации «дырок».

Проводимость связана с подвижностью частиц следующим соотношением:



где  - удельное сопротивление,  — [подвижность](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D0%B4%D0%B2%D0%B8%D0%B6%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C) электронов,  — подвижность дырок,  — их концентрация, q — [элементарный электрический заряд](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%82%D0%B0%D1%80%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D0%B7%D0%B0%D1%80%D1%8F%D0%B4) (1,602·10−19 Кл).

Для собственного полупроводника концентрации носителей совпадают и формула принимает вид:



26) Примесная проводимость полупроводников — [электрическая проводимость](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F_%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%BC%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C), обусловленная наличием в [полупроводнике](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D0%BB%D1%83%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D0%B8%D0%BA) [донорных](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D0%BE%D0%BD%D0%BE%D1%80_%28%D1%84%D0%B8%D0%B7%D0%B8%D0%BA%D0%B0_%D0%BF%D0%BE%D0%BB%D1%83%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D0%B8%D0%BA%D0%BE%D0%B2%29) или [акцепторных](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BA%D1%86%D0%B5%D0%BF%D1%82%D0%BE%D1%80_%28%D1%84%D0%B8%D0%B7%D0%B8%D0%BA%D0%B0_%D0%BF%D0%BE%D0%BB%D1%83%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D0%B8%D0%BA%D0%BE%D0%B2%29) примесей.

Примесная проводимость, как правило, намного превышает [собственную](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%BE%D0%B1%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D0%BF%D0%BE%D0%BB%D1%83%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D0%B8%D0%BA), и поэтому электрические свойства полупроводников определяются типом и количеством введенных в него [легирующих](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9B%D0%B5%D0%B3%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B5)примесей.

27) Способ определения усталостной прочности металла заключающийся в том, что образец из исследуемого металла нагружает его до разрушения и по числу циклов нагружения до разрушения судят об усталостной прочности металла, отличающийся тем, что с целью определения накопления усталостных повреждений в металле также в процессе его нагружения; измеряют величину работы выхода электрона с его поверхности например, методом контактной разности потенциалов, по которой судят о накоплении усталостных повреждений в металле.

**В случае автоэлектронной эмиссии** внешнее электрическое поле превращают потенциальный порог на границе тела в барьер конечной ширины и уменьшает его высоту относительно высоты первоначального порога, вследствие чего становиться возможным квантовомеханическое туннелирование электронов сквозь барьер. При этом эмиссия происходит без затраты энергии электрическим полем.

28) Термоэлектри́ческие явле́ния — совокупность физических явлений, обусловленных взаимосвязью между тепловыми и электрическими процессами в [металлах](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%B0%D0%BB%D0%BB%D1%8B) и [полупроводниках](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D0%BB%D1%83%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D0%B8%D0%BA%D0%B8).

К термоэлектрическим явлениям относятся:

* [Эффект Зеебека](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D1%84%D1%84%D0%B5%D0%BA%D1%82_%D0%97%D0%B5%D0%B5%D0%B1%D0%B5%D0%BA%D0%B0)
* [Эффект Пельтье](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D1%84%D1%84%D0%B5%D0%BA%D1%82_%D0%9F%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D1%82%D1%8C%D0%B5)
* [Эффект Томсона](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D1%84%D1%84%D0%B5%D0%BA%D1%82_%D0%A2%D0%BE%D0%BC%D1%81%D0%BE%D0%BD%D0%B0)

В некоторой степени все эти эффекты одинаковы, поскольку причина всех термоэлектрических явлений — нарушение теплового равновесия в потоке[носителей](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9D%D0%BE%D1%81%D0%B8%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C_%D0%B7%D0%B0%D1%80%D1%8F%D0%B4%D0%B0) (то есть отличие средней энергии [электронов](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD) в потоке от [энергии Ферми](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%B8%D1%8F_%D0%A4%D0%B5%D1%80%D0%BC%D0%B8)).

Абсолютные значения всех термоэлектрических коэффициентов растут с уменьшением [концентрации](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D0%BD%D1%86%D0%B5%D0%BD%D1%82%D1%80%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F_%D1%87%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%B8%D1%86) носителей; поэтому в полупроводниках они в десятки и сотни раз больше, чем в [металлах](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%B0%D0%BB%D0%BB%D1%8B) и [сплавах](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%BF%D0%BB%D0%B0%D0%B2).