

# Основные принципы ЭКОЛОГИИ

# Основы теории систем

Одним из основных объектов изучения экологии являются экологические системы. Поэтому необходимо дать общее определение системы:

Основоположником общей теории систем является канадский математик и биолог австрийского происхождения *Людвиг фон Берталанфи*. В 1951 г. он дал первое очень широкое определение системы:

*Система – это любое множество элементов любой материальной природы, которые находятся в определенных отношениях друг к другу.*

Затем понятие системы стало связываться не с бесцельным или хаотическим взаимодействием некоего набора случайных элементов, а с реализацией через эти взаимодействия определенной функции.

*Система – это совокупность взаимодействующих между собой относительно элементарных структур или процессов, объединенных в единое целое выполнением некоторой общей задачи, несводимой к функциям её компонентов.*

Система образована определенными *элементами*, имеющими различные свойства. Каждый элемент в системе рассматривается как единое целое, его внутренние свойства для функционирования системы значения не имеют.

Любая система не может состоять из абсолютно одинаковых элементов. Разнообразие элементов составляющих систему, является одним из важнейших условий ее существования (*принцип необходимого разнообразия*). Нижний предел разнообразия системы равен двум, верхний – стремится к бесконечности.

Элементы находятся между собой в определенных отношениях, или взаимодействиях, называемых *связями*.

*Совокупность элементов и связей образует структуру системы.*

Свойства системы не являются простой суммой свойств отдельных элементов, а имеют качественное отличие. Груда камней системой не является, поскольку ее свойства существенно не отличаются от суммы свойств отдельных составляющих ее камней. Так, общая масса груды камней равна сумме масс всех камней.

Комплект деталей для часов до их сборки также не является системой, однако собранные из деталей часы приобретают качественно иное свойство – показывать время, которым не обладает в отдельности ни одна из деталей.

Поэтому свойства системы не являются суммарными, или *аддитивными* (от англ. *to add* – прибавлять) по отношению к сумме свойств ее элементов.

Возникновение в системе в результате взаимодействия элементов принципиально новых свойств называется *эмерджентностью* (от англ. *to emerge* – появляться).

По строению системы делятся на *простые* и *сложные*. Сложность определяется не столько числом элементов в системе, сколько разветвленностью ее структуры и разнообразием внутренних связей.

Простые системы поддаются поэлементному описанию во всех деталях, а сложные можно описать лишь приблизительно.

Поэтому простыми системами являются и оконный шпингалет, состоящий из двух деталей, и современный электронный прибор, для которого имеется схема.

Примерами сложных систем являются современные суперЭВМ, в программном обеспечении которых заложена способность к самообучению и решению простейших логических задач, например, шахматные компьютеры

Системы делятся также на *детерминированные* и *вероятностные*. К детерминированным относятся преимущественно простые системы, в которых элементы однозначно взаимодействуют определенным образом.

Поведение детерминированной системы можно однозначно прогнозировать. Например, если включить лампу, то загорится свет, но не зазвучит музыка.

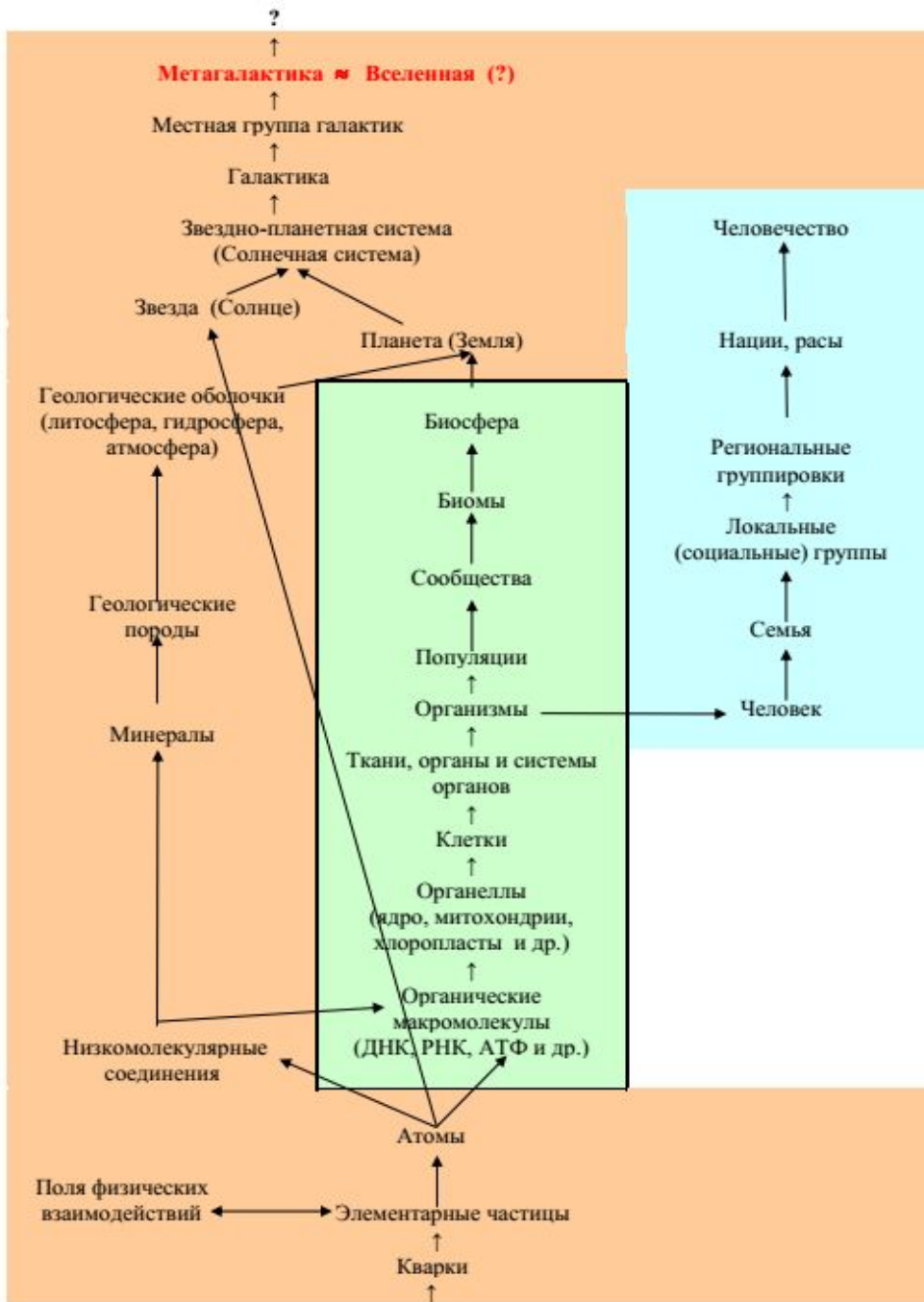
К вероятностным относятся системы, элементы которых связаны таким большим количеством взаимодействий, что их поведение бывает прогнозировать очень трудно.

Отнесение системы к детерминированным или вероятностным не всегда определяется сложностью их устройства. Например, телевизор является просто и детерминированной системой, а рулетка в казино, устроенная гораздо проще телевизора, – вероятностной системой.

## Иерархия систем

Системы обладают свойством *иерархии*. Практически каждую систему можно рассматривать как элемент другой системы более высокого ранга, а каждый элемент — как систему более низкого ранга.





Упрощенная схема иерархии неживых, биологических (выделены) и общественных систем.

*Биологические системы уровней от организма и выше называются экологическими системами.*

Экологические системы занимают особое положение место в иерархии систем.

Через свой низший уровень они связаны с социальными системами (организмы – человек) и с биологическими системами более низкого ранга (организмы – системы органов), а через высший (биосфера) уровень – с геофизической системой планеты Земля.

Каждый уровень иерархии систем изучает соответствующая наука. Экологические уровни иерархии биологических систем (*организмы – популяции – сообщества – биомы – биосфера*) изучают *аутэкология, популяционная экология* и *синэкология*.

Некоторые ученые выделяют в особый раздел экологии – *цитоэкологию*, или науку, изучающую отдельные аспекты систем клеточного уровня. К ним относятся, прежде всего, клетки многоклеточных организмов, отличающиеся достаточной автономностью.

В их числе – форменные элементы крови (эритроциты, лейкоциты и др.), клетки иммунной системы (лимфоциты и др.), злокачественных опухолей, половые клетки.

При их изучении наряду со специфическими цитологическими параметрами используется целый ряд экологических показателей - численность, размерная и функциональная структура, скорость деления клеток, длительность их жизни и др.

## Саморегуляция и самоорганизация систем

Системам свойственна *саморегуляция* – целенаправленное изменение состояния системы благодаря определенным регуляторным механизмам.

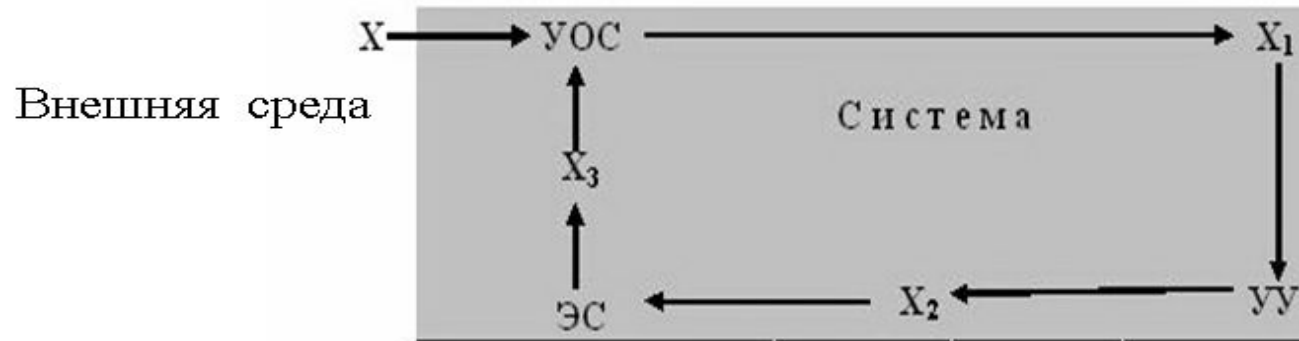
Все биологические системы способны устанавливать и поддерживать на определенном, относительно постоянном уровне те или иные физиологические и биологические параметры своей жизнедеятельности (*гомеостаз*).

Основное значение в саморегуляции имеют *управляющие устройства (регуляторные механизмы)* – определенные биологические структуры, определяющие функционирование целой системы или отдельных ее элементов.

У одноклеточных организмов и клеток многоклеточных организмов им является ядро (у эукариот) или кольцевая молекула ДНК (у прокариот). У животных основными регуляторными механизмами являются нервная и гуморальные системы.

Саморегуляция обеспечивает целостность системы, делает ее чем-то большим, чем сумма отдельных ее элементов (*упомянутый выше принцип эмерджентности*).

Важнейшей предпосылкой саморегуляции является *обратная связь*, или *петля управления*, означающая *влияние выходного сигнала системы на ее рабочие параметры*. Обратную связь можно схематично представить в виде:



$X$  – входной сигнал (влияние среды), поступающий на устройство обратной связи (УОС),

$X_1$  – выходной сигнал, преобразованный на УОС и передаваемый на управляющее устройство (УУ),

$X_2$  – сигнал, преобразованный на УУ и передаваемый элементам системы (ЭС), заставляющий их функционировать определенным образом,

$X_3$  – сигнал, передаваемый от элементов системы на УОС, вносящий коррективы в его действие.

Обратные связи бывают *положительными* и *отрицательными*.

**Отрицательная обратная связь** уменьшает влияние входного воздействия на величину выходного сигнала. Она способствует восстановлению и поддержанию исходного состояния системы.

Ее примером в технических системах являются терморегуляторы в кондиционерах или термостатах, которые поддерживают в них постоянную температуру.

Примером отрицательной обратной связи на уровне организма является поддержание относительно постоянной температуры тела гомойотермных организмов при изменении температуры среды.

Примером регуляции экологических систем является поддержание определенной численности популяции мышей в ограниченном объеме пространства.

При повышении ее плотности выше определенного предела (критический уровень) особи перестают размножаться, даже при наличии достаточного количества пищи. Это обусловлено тем, что большая скученность вызывает у мышей состояние стресса.

В этих условиях кора надпочечников у самок выделяет особый гормон, который препятствует овуляции яйцеклеток. Тем не менее, численность популяции будет продолжать увеличиваться, поскольку ранее оплодотворенные самки будут производить детенышей.

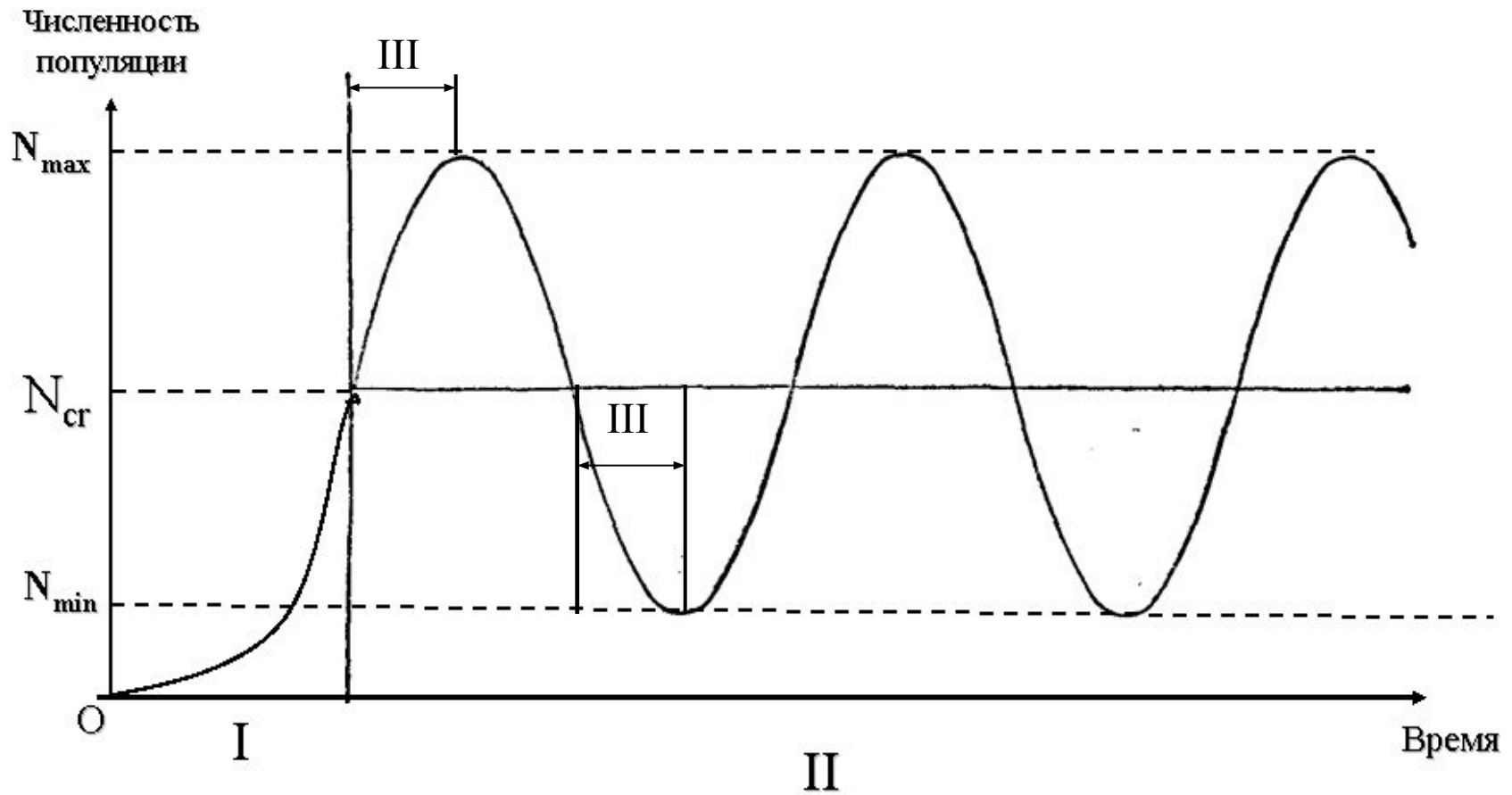
Лишь когда все детеныши будут отрождены, численность популяции начнет снижаться вследствие естественной смертности среди особей старших возрастов.

Когда плотность популяции снизится до критического уровня, у самок вновь начнут образовываться яйцеклетки. Однако и тогда численность популяции будет продолжать уменьшаться, поскольку для созревания яйцеклеток, их оплодотворения и развития эмбрионов необходим определенный период времени.

Лишь, когда самки начнут вновь отрождать потомство, плотность популяций начнет возрастать, пока вновь не достигнет критического уровня. Затем описанный цикл изменения плотности популяции повторится.

Поэтому численность популяции будет претерпевать закономерные циклические колебания относительно некоторого критического уровня.

## Схема регуляции численности лабораторной популяции мышей



I – фаза экспоненциального роста численности популяции;

II – фаза регуляции роста численности популяции;

III – лаг-фаза, или фаза запаздывания;

$N_{cr}$  – критическая численность популяции, выше которой у самок перестают образовываться яйцеклетки;

$N_{\min}$  и  $N_{\max}$  – минимальная и максимальная численность популяции.



Таким образом, в экологических системах устройства обратной связи и управления не являются структурированными, подобно клеточному ядру и нервной системе, а образованы совокупностью связей между отдельными особями и окружающей средой, основанными на обмене различными информационными сигналами.

Такой тип регуляции системы называется *стохастическим*. Для него характерна *лаг-фаза*, или *фаза запаздывания*, т.е. временной интервал между началом действия входного сигнала и проявлением соответствующих изменений в системе.

В нашем примере лаг-фаза равна сумме промежутков времени, необходимых для овуляции яйцеклеток и развития эмбрионов.



В природных популяциях механизмы регуляции численности могут быть самыми разными. Поэтому динамика численности популяции за длительные промежутки времени часто выглядит незакономерной.

Динамика численности популяции одного из видов насекомых

*Положительная обратная связь* усиливает влияние входного воздействия на величину выходного сигнала. Она уводит систему все дальше от исходного состояния.

Примером положительной обратной связи является онтогенез организма. Устройство обратной связи в этом случае последовательно включает в функционирование последовательных групп генов, обеспечивающих синтез тех или иных веществ, необходимых на данном этапе онтогенеза.

Затем эти вещества отключают одни группы генов и включают другие.

Положительная обратная связь нередко действуя по принципу *«порочного круга»*.

Ее примером является динамика численности населения Земли в историческом аспекте.

Для обеспечения продовольствием растущего населения человек расширял посевные площади, совершенствовал орудия труда, агротехнику и пр. Это позволяло получить более высокие урожаи, что давало возможным прокормить больше населения.

С другой стороны, развитие производительных сил общества стимулировало развитие других сфер, в том числе медицины и здравоохранения, что снизило смертность от инфекционных заболеваний, природных катастроф и других факторов.

Это давало новый толчок росту населения, что вынуждало вновь расширять посевные площади и т.д.

Таким образом, *в регуляции численности человеческих популяций отрицательные обратные связи, характерные для стадии охотничье-собирательской культуры, впоследствии все более заменялись положительными обратными связями.*

Все биологические и экологические системы являются сложными и вероятностными. Таким системам, особенно биологическим, присуща *саморегуляция*, или развитие особого взаимодействия между их элементами, направленное на оптимизацию системы.

Одним из важнейших признаков саморегуляции является *самоорганизация*, или увеличение степени обособленности системы от окружающей среды. При этом состояние системы превращается из хаотического все более организованное и упорядоченное.

Примерами самоорганизации биологических систем является процесс эволюции жизни на Земле, возникновение человеческого общества из групп первобытных людей, формирование специфической структуры популяций в новых биотопах и др.

Наука, изучающая общие закономерности управления и регуляции систем, называется *кибернетикой*.

Ее основателем является американский математик *Норберт Винер*, создавший в 1945 г. первую ЭВМ.

Наука, изучающая закономерности самоорганизации сложных систем в направлении от хаоса к упорядоченности, называется *синергетикой*.

Этот термин предложил в 1960 гг. германский ученый *Г. Хакен*.

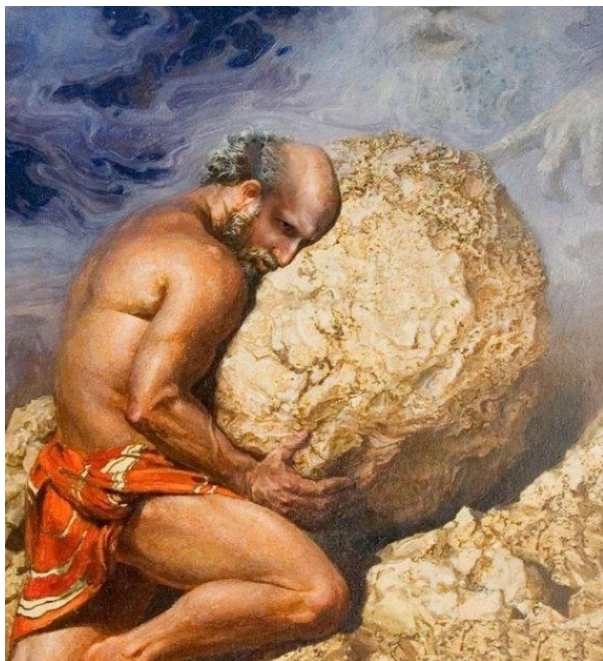
## Основы термодинамики систем

Функционирование любой системы происходит за счет обмена *энергией* между ней и окружающей средой и превращений энергии внутри системы.

Понятие энергии в физике достаточно сложно. В самом общем виде:

*Энергия – это способность системы производить какую-либо работу.*

В свою очередь, работа в простейшем случае равна произведению силы, приложенной к телу, на величину его перемещения в пространстве.



«Сизифов труд»



Атлант, поддерживающий небесный свод, никакой работы не совершает



В начале XIX столетия английский ученый *Джеймс Джоуль* доказал, что теплота является одним из видов энергии.

Он установил также, что другие виды энергии (механическую, электрическую) можно полностью превратить в тепловую энергию.

Поэтому величину механической работы можно оценить по количеству выделенной тепловой энергии.

Отсюда наука о закономерностях превращения энергии в системах получила название *термодинамика*.

Большинство систем имеет более или менее четкие границы, отделяющие их от внешней среды.

Через них происходит обмен вещества и энергии между системой и средой.

Система, которая не обменивается со средой ни веществом, ни энергией, называется *изолированной*.

Ее приближенным примером является закрытый термос с горячим чаем (приближенным потому, что чай в термосе постепенно остывает).



Система, которая обменивается с окружающей средой только энергией, называется *замкнутой*. Ее примером подобной является планета Земля. Она получает огромное количество солнечной энергии, часть которой отражает в космическое пространство.

Однако количество метеоритного вещества, поступающего на Землю из Космоса и атмосферных газов, рассеивающихся в Космосе, ничтожно мало по сравнению с массой планеты.

Среди биологических систем примерами являются вирусы в кристаллическом состоянии, споры бактерий в состоянии анабиоза и т.п.

Система, которая обменивается со средой веществом и энергией, называется *открытой*.

Все биологические системы от органелл и до Биосферы, в том числе – экологические системы, являются открытыми.

*Первый закон термодинамики* утверждает, что

*Изменение энергии замкнутой системы равно разности между количеством теплоты, переданной системе из внешней среды, и работы, совершенной системой.*

$$\Delta E = Q - W,$$

где  $\Delta E$  – изменение энергии системы,  $Q$  – переданная системе теплота,  $W$  – работа, совершенная системой.

Первый закон термодинамики часто формулируется в ином виде:

*Энергия может переходить из одной формы в другую, но не исчезает и не создается вновь.*

По существу это *закон сохранения энергии*. Однако он ничего не говорит о том, какая часть энергии, переданной системе, может быть превращена в работу.

В 1824 г. французский физик *Сади Карно* ввел понятие *коэффициента полезного действия* (КПД), равного отношению работы, выполненной тепловой машиной ( $W$ ), к количеству энергии, переданной ей ( $Q$ ), т.е.

$$\text{КПД} = \frac{W}{Q}$$

Карно теоретически доказал, что КПД тепловой машины не может превышать следующую величину:

$$\text{КПД} = \frac{T_{\text{нагр}} - T_{\text{хол}}}{T_{\text{нагр}}} \cdot 100 \%,$$

где

$T_{\text{нагр}}$  – абсолютная температура нагревателя, т.е. пара в тепловой машине,

$T_{\text{хол}}$  – абсолютная температура холодильника, т.е. окружающей среды

Однако долгое время оставалось непонятным, почему КПД любой тепловой машины всегда остается ниже 100%.

Лишь в середине XIX столетия немецкий ученый *Рудольф Клаузиус* сформулировал *второй закон термодинамики*, который накладывает ограничения на эффективность превращения энергии в работу.

Он имеет много формулировок, самой известной из которых является:

*Теплота не может самопроизвольно переходить от тела с низкой температурой к телу с высокой температурой.*

Р.Клаузиус ввел понятие *энтропии* (от древнегреч. *ἐντροπία* – развитие, поворот, превращение).

Действительно, энтропия показывает направление, в котором развиваются все природные процессы.

Для понимания сущности второго закона термодинамики и энтропии необходимо вначале рассмотреть принципиальное различие между обратимыми и необратимыми процессами.

Примером *обратимых процессов* является движение тела по кругу, работ поршней в автомобильном двигателе и т.п. Энергия системы при обратимых процессах не изменяется. В принципе они могут длиться бесконечно. Пример – движение планет вокруг Солнца.

В *необратимых процессах*, называемых также самопроизвольными, происходит снижение запасов энергии в системе. Их примерами является падение тел с высоты, остывание горячих тел и т.д.

Тело будет самопроизвольно падать, пока не достигнет какой-либо поверхности. Горячее тело будет самопроизвольно остывать, пока его температура не сравняется с температурой окружающей среды.

Однако никакое тело не может самопроизвольно подняться вверх или нагреться. Для этого ему нужно каким-либо образом придать дополнительную энергию извне.

Изменение теплоты, производимой в ходе обратимого и необратимого процессов ( $Q_{\text{обр}}$ ), протекающего при постоянной температуре, к абсолютной температуре ( $T$ ) является постоянной величиной:

$$\Delta S = \frac{Q_{\text{обр}}}{T} = \text{const}$$

Она не зависит от того, каким образом протекал процесс, лишь бы начальное и конечное состояния системы были одинаковыми.

Величина  $\Delta S$  и является энтропией.

*Энтропия* – это мера неупорядоченности системы, или количество энергии, недоступной для использования и превращения в другие виды энергии.

Чем выше упорядоченность системы, тем ниже ее энтропия и наоборот.

Она же может быть и мерой упорядоченности системы: чем выше энтропия системы, тем ниже ее упорядоченность и наоборот.

Согласно первому закону термодинамики энергия может переходить из одной формы в другую.

Второй закон указывает, что не все формы энергии эквивалентны, поскольку они обладают разным количеством энтропии.

Относительное количество энтропии в разных видах энергии:

- Гравитационная энергия – 0
- Энергия вращательного движения – 0
- Ядерная энергия –  $10^{-6}$
- Внутреннее тепло звезд –  $10^{-3}$
- Электромагнитная энергия –  $10^{-2}$
- Энергия химических связей – 1
- Рассеянное тепло Земли – 10-100
- Космическое тепловое («*реликтовое*») излучение – 10 000

Отсюда любой вид энергии состоит из двух частей – свободной энергии, или *энтальпии*, которая может самопроизвольно превратиться в другой вид энергии, и *энтропии*, которая в другие формы энергии превратиться не может.



Самопроизвольно могут идти лишь процессы перехода энергии в направлении от форм энергии с более низкой энтропией к формам с более высокой.

Гравитационная энергия является энергией наивысшего качества. Она способна самопроизвольно превращаться в любой другой вид энергии.

Наоборот, тепловая энергия представляет низшую, наиболее «деградированную» форму энергии. Ни в какую иную энергии она самопроизвольно превратиться не может. Например, холодное тело не может самопроизвольно нагреться, для этого в нем нужно пополнить запасы энергии, например, нагреть его.



**Рис. 2.** Направления переходов разных форм энергии в природных системах

Из второго закона термодинамики следует, что в замкнутых системах при любых процессах трансформации энергии из одной формы в другую, определенная ее часть рассеивается в виде тепла.

Поэтому величина КПД работы, производимой машиной, всегда оказывается меньше энергии, затраченной на ее выполнение.

Это не связано с недостатками конструкции машин, а является универсальным законом природы.

Если в каких-либо технических устройствах используется переход энергии от низкоэнтропийных форм к высокоэнтропийным, то их КПД может достигать 95 – 99%.

Например, КПД турбины гидроэлектростанции достигает 90%, а электрической батарейки – даже 95%.

Наоборот, если в технических устройствах используется переход от высокоэнтропийных форм к низкоэнтропийным, их КПД значительно ниже.

Так, КПД различных тепловых двигателей, превращающих тепловую энергию в механическую (т.е. гравитационную) или электромагнитную энергию, не превышает 60 – 65% (высокотемпературный ракетный двигатель). Обычно они составляет 30 – 35% (двигатели внутреннего сгорания, турбины тепловых электростанций, огнестрельное оружие и т. п.).

Современные атомные электростанции по существу представляют собой тепловые электростанции, в которых пар получают посредством нагрева воды тепловой энергией, выделяющейся при радиоактивном распаде изотопов урана. *Поэтому их КПД не превышает КПД тепловых электростанций.*

## Второй закон термодинамики и загрязнение окружающей среды

Согласно второму закону термодинамики, при обратимых процессах суммарная энтропия системы и окружающей среды остается неизменной. При необратимых процессах суммарная энтропия системы и окружающей среды возрастает. В состоянии равновесия системы со средой энтропия системы максимальна.

Увеличение энтропии в необратимых процессах выше, чем в обратимых. Поэтому восстановление исходного состояния системы требует большей затраты энергии, чем ее было первоначально расходувано в необратимом процессе.

Сущность этого положения и всего понятия энтропии хорошо передает поговорка *«ломать – не строить»*.

Эти положения имеют важное значение для разработки природоохранительных мероприятий.

Загрязнение окружающей среды является самопроизвольным необратимым процессом, сопровождающимся ростом ее энтропии.

Мероприятия по очистке среды приводят к снижению ее энтропии, однако они требуют затрат большего количества энергии, чем образовалось в процессе загрязнения среды.

Энергию, необходимую для проведения мероприятий по очистке среды в одном месте, необходимо где-то получить, что приведет к росту энтропии среды в месте ее получения, т.е., к его загрязнению.

*Поэтому, очищая природную среду в одном районе, мы неизбежно загрязняем ее, причем в большей степени – в другом.*

Любое превращение энергии в природных или технических системах сопровождается ростом энтропии, т.е. выделением тепловой энергии в окружающую среду.

*Отсюда тепловое загрязнение среды принципиально неустранимо, поскольку оно является прямым следствием второго закона термодинамики.*