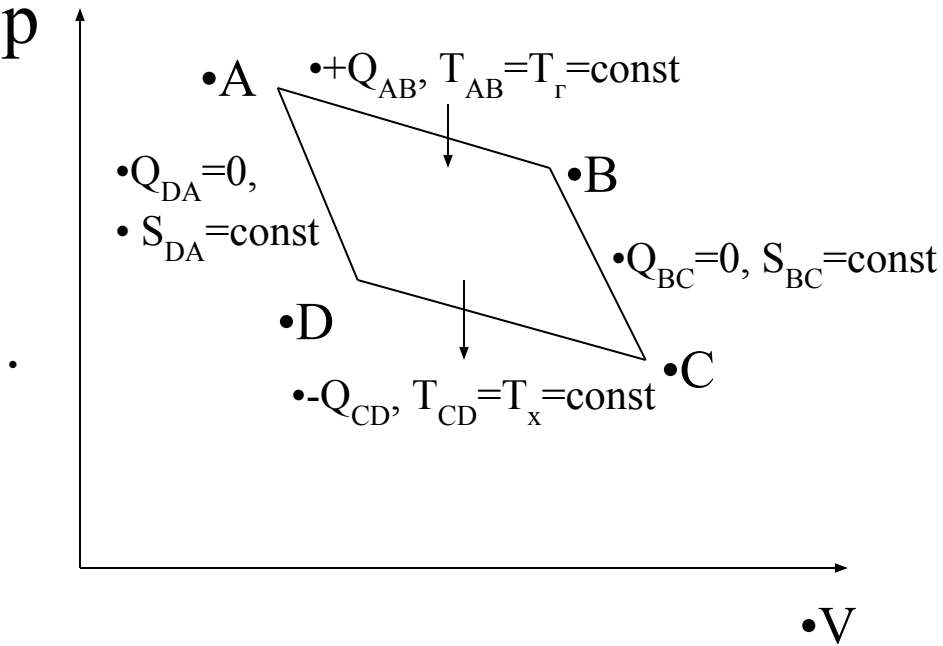


# Цикл Карно



- **Циклом Карно** называется процесс из двух изотерм и двух адиабат (у адиабат как мы уже знаем наклон круче). Цикл изображен на рисунке в координатах p-V (для координат, например, S-T будет квадрат).
- На участке AB (изотерма) рабочее тело получает от нагревателя с температурой  $T_r = T_{AB}$  количество теплоты  $Q_{AB}$ . На участке CD (вторая изотерма) рабочее тело отдает холодильнику с температурой  $T_x = T_{CD}$  количество теплоты  $Q_{CD}$ .

# Цикл Карно

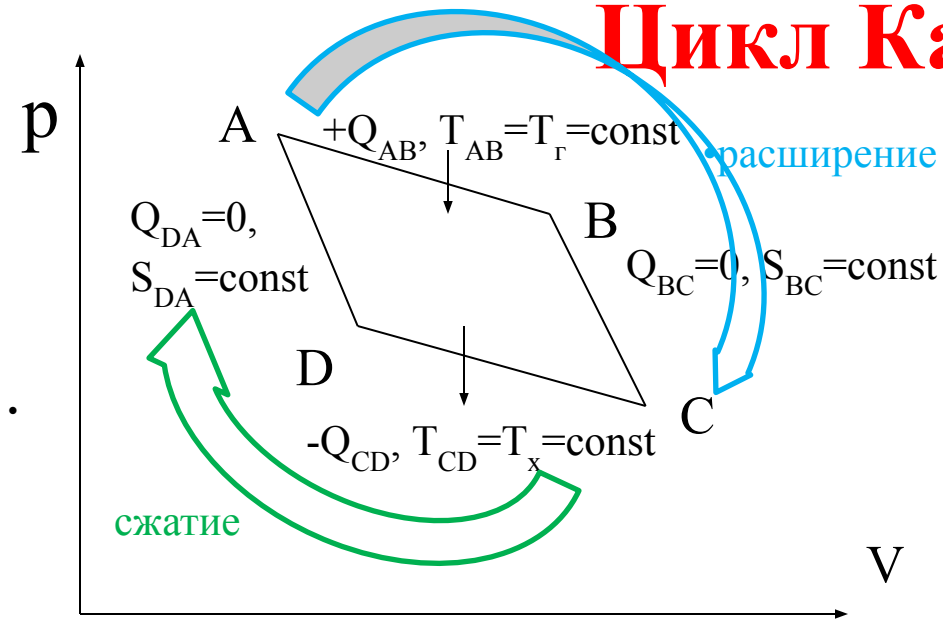
- Изменение **внутренней энергии рабочего тела за цикл равно нулю** потому, что тело возвращается в исходное состояние. Следовательно, вся полученная теплота затрачивается телом на совершение работы:

$$A = Q_{AB} - Q_{CD}$$

- **Коэффициентом полезного действия тепловой** машины называется отношение совершаемой за цикл работы  $A$  к получаемому от нагревателя за цикл количеству теплоты  $Q_{AB}$ :

$$\eta = \frac{A}{Q_{AB}} = \frac{Q_{AB} - Q_{CD}}{Q_{AB}}$$

# Цикл Карно идеального газа



- Почему  $A = Q_{AB} - Q_{CD}$ ? В случае, когда рабочим телом является идеальный газ, работа за один обратимый цикл рассчитывается по известным формулам, рассмотренным нами выше.

• Пусть рабочим телом является 1 моль идеального газа, находящийся в следующих состояниях для четырех характерных точек A, B, C, D цикла Карно. Учтем, что на участках AB и BC газ расширяется (из рис видно, что давление падает), то есть совершает положительную работу, а на участках CD и DA работа отрицательна. На участке BC:  $A_{BC} = -dU = -c_V(T_X - T_Г)$ , а на участке DA:  $A_{DA} = -c_V(T_Г - T_X)$ . Для обратимого процесса  $dU = 0$  и при нахождении общей работы за цикл  $A_{BC}$  и  $A_{CD}$  сокращаются и остается только разность  $Q_{AB} - Q_{CD}$  при изотермических процессах (при  $T_{AB}$  и  $T_{CD}$ ).

# Цикл Карно

• При  $T = \text{const}$   $dU = 0$  и все тепло

идет на совершение работы  $\Rightarrow$ :

$$A = RT_{\Gamma} \ln \frac{V_B}{V_A} - RT_x \ln \frac{V_C}{V_D}$$

• Точки В и С, так же как и А и D на одних адиабатах и из уравнения адиабат  $\Rightarrow$

$$T_B V_B^{\gamma-1} = T_C V_C^{\gamma-1} \Rightarrow T_2 V_B^{\gamma-1} = T_x V_C^{\gamma-1} \Rightarrow \left( \frac{V_C}{V_B} \right)^{\gamma-1} = \frac{T_{\Gamma}}{T_x}$$

$$T_D V_D^{\gamma-1} = T_A V_A^{\gamma-1} \Rightarrow T_x V_D^{\gamma-1} = T_2 V_A^{\gamma-1} \Rightarrow \left( \frac{V_D}{V_A} \right)^{\gamma-1} = \frac{T_{\Gamma}}{T_x}$$

• Следовательно  $\frac{V_C}{V_B} = \frac{V_D}{V_A}$

• Отсюда получим:  $\frac{V_B}{V_A} = \frac{V_C}{V_D}$

$$\ln \frac{V_B}{V_A} = \ln \frac{V_C}{V_D}$$

$$A = R(T_{\Gamma} - T_x) \ln \frac{V_B}{V_A}$$

# КПД цикла Карно

Подставляя значения  $Q_{AB}$  и  $Q_{CD}$  в формулу для КПД:

$$\eta = \frac{T_{\Gamma} - T_{\text{X}}}{T_{\Gamma}}$$

- Берем идеальный газ только потому, что известно его уравнение состояния, и это облегчает вычисление КПД.
- Цикл Карно так выбран специально. Те. если бы мы не взяли две изотермы то  $\frac{V_B}{V_A} \neq \frac{V_C}{V_D}$  и  $\Rightarrow$  логарифмы не сократились бы и работа за цикл была бы меньше. Изотермы две изотермы соединять не могут  $\Rightarrow$  изобары или адиабаты, но изобара идет горизонтально и замкнуть цикл потом не возможно  $\Rightarrow$  берем адиабаты.
- А если рассматривать в координатах (S, T) то цикл просто занимает всю площадь между прямыми энтропии с  $S_1 \neq S_2 = \text{const}$  и больше занять нечего. А площадь равна работе за цикл.
- Цикл полностью обратим . Запустим в обратную сторону и получим тепловой насос

# Теоремы Карно

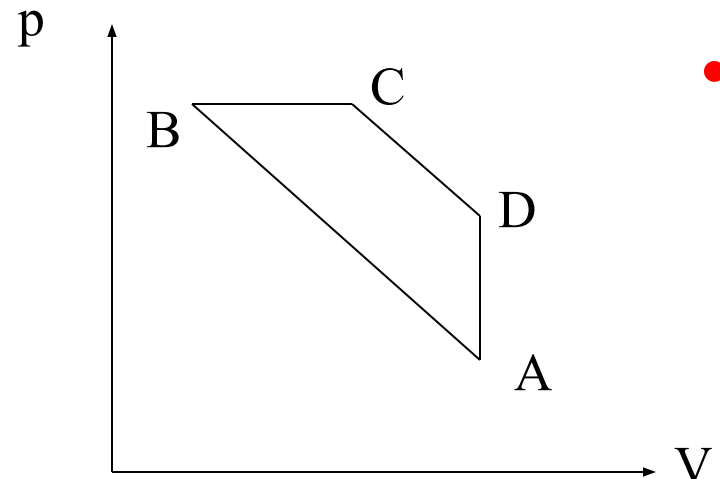
- **Первая теорема Карно:** любая тепловая машина, работающая при данных температурах нагревателя ( $T_g$ ) и холодильника ( $T_x$ ), **не может иметь КПД больше**, чем машина, работающая по обратимому циклу Карно при тех же температурах нагревателя и холодильника. Т.е. теорема утверждает, что он **идеален** и лучше уже не придумаешь и можно использовать как меру эффективности других циклов.
- **Вторая теорема Карно:** КПД цикла Карно **не зависит от рода рабочего тела**, а только от температуры нагревателя и холодильника. Т.е. все подобрано так, что ln сократились все.
- Иногда эти две теоремы объединяют в одну теорему Карно с тем же содержанием.

# Особенности цикла Карно

- Цикл Карно обладает важной особенностью: он полностью обратим. Действительно, на всех стадиях он проведен так, что исключает соприкосновение тел с разными температурами, что **исключает возможность необратимых процессов вследствие не нулевой теплопроводности.**
- Тепловая машина, работающая по циклу Карно, является идеальной тепловой машиной потому, что никакими способами невозможно получить КПД выше значения, полученного нами для КПД цикла Карно. **Абсолютный нуль температуры недостижим (это следует из теоремы Нернста), поэтому КПД любой тепловой машины, в том числе и идеальной, всегда меньше единицы.**
- На практике есть утечки тепла и цикл получается в виде эллипса (все углы скруглены).

# Современные циклы

- **Отто** :  $V = \text{const}$
- **Дизеля** :  $p = \text{const}$ . Воспламенение при впрыскивании в горячий воздух нагретый до высокой температуры за счет сжатия. КПД 31-55% а у карбюраторных 25-30%
- **Тринкеля** - промежуточный



AB – адиабатическое сжатие воздуха (быстрое)

BC – изобарическое расширение (впрыскивание солярки)

CD – адиабатическое расширение (сгорание)

DA – изохорическое понижение давления (выброс отработанного газа)

КПД цикла Дизеля зависит не только от степени сжатия но и от степени предварительного расширения



**Современные разработки в  
области комнатных температур  
существуют?**

**Посмотрим фильм про магнитный  
холодильник!**

# ТЕПЛОВЫЕ НАСОСЫ



Тепловой насос извлекает накопленную энергию из различных источников - грунта, рек, озер, морей, стоков, вентиляционных выбросов и дымовых газов; земных недр и переносит ее в дом. По прогнозу Мирового Энергетического Комитета (МИРЭК), к 2020 году в передовых странах доля отопления и горячего водоснабжения от тепловых насосов составит не менее 75%. Изобрел еще

- Кельвин . Он считал, что в силу ограниченности невозобновляемых ресурсов у его изобретения большое будущее, а затраты на отопление должны составлять всего 3% от существующих. В его "умножителе тепла", или как сейчас называют, тепловом насосе (Heat Pump), в качестве теплоносителя использовался воздух. Сейчас производятся миллионами!

# Тепловые насосы

Современные тепловые насосы работают полностью аналогично холодильникам у Вас в квартире. Только если холодильник откачивает тепло из холодильной камеры наружу (оно рассеивается на задней панели) то тепловой насос перекачивает его с улицы во внутрь дома.

Крайне эффективен так как сам энергию не производит а только перемещает имеющееся тепло (уже запасенное до этого, например, от Солнца) с одного места на другое (с улице в дом).

Хороший потенциал для применения тепловых насосов представляют собой обогреваемый пол. Коэффициент преобразования энергии тем выше, чем меньше разница температур между охлаждаемым и нагреваемым объектом.

**Огромный потенциал! За счет тепла воды мирового океана можно снабжать электроэнергией весь мир более тысячи лет понизив температуру менее чем на 0.1 С. Только одна маленькая заминка -второе начало термодинамики!**

# Второе начало термодинамики

По 1-му началу термодинамики система может совершать работу только за счет своей внутренней энергии или каких либо внешних источников тепла. У второго начала также есть несколько эквивалентных формулировок. Самая простая: **невозможен такой периодический процесс, единственным результатом которого является превращение тепла в работу.** За период в цикле Карно только часть тепла  $Q_{AB}$  превращается в работу  $A$ , а другая часть  $Q_{CD}$  передается холодильнику. Периодический двигатель у которого все тепло идет в работу был бы весьма популярен ....но **даже для идеального** обратимого цикла Карно это **не возможно**.

# Второе начало термодинамики

- 2-е начало не противоречит 1-му началу термодинамики, дополняет его. Вечным двигателем 1-го рода мы назвали двигатель с КПД более 100% (т.е. работа совершается в большем количестве чем полученная извне энергия). Воображаемый двигатель, который всю извлекаемую из окружающей среды (океан, воздух и т.д.) теплоту  $Q$  превращает в  $A$  назовем вечным двигателем 2-го рода. **Вечный двигатель 2-го рода не возможен.** Т.е. превратить **все** подводимое тепло **только в полезную работу невозможно**. Часть тепла потеряется и перейдет к холодильнику (например, во внешнюю среду). При анализе идеального варианта тепловой машины 2-е начало было учтено. Первым сформулировал Клаузиус в 1850 г.- невозможен процесс при котором теплота переходила самопроизвольно от **ХОЛОДНЫХ ТЕЛ К НАГРЕТЫМ ТЕЛА** (в широком смысле единственным следствием которого является переход теплоты от холодильника к нагревателю).

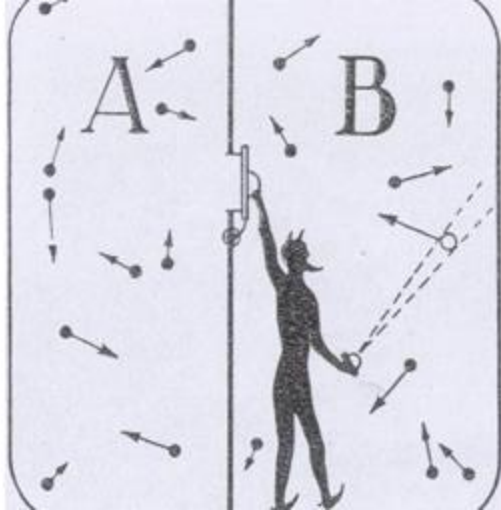


иллюстрация пользователя Волобуев с сайта wikipedia.org

Энтропийного демона Максвелла

Как превратить информацию в энергию. Статья ученых [опубликована](#) в журнале *Nature Physics*, *Nature News*.

В рамках эксперимента ученые поместили бусинку из полистирола продолговатой формы в специальный раствор, который сами организаторы эксперимента называют буферным. Размер бусины составлял около 300 нанометров. Во время эксперимента бусина помещалась в емкость с раствором, на дне которой располагались электроды, на которые подавался переменный ток.

- Электромагнитное поле индуцировало на бусинке, выполненной из диэлектрика, поляризацию таким образом, что в поле ей было более энергетически выгодно вращаться по часовой стрелке, чем против нее. Вместе с тем из-за небольших размеров на вращение бусинки оказывало заметное (и случайное) влияние броуновское движение молекул раствора.
- Состояние бусинки мониторилось при помощи микроскопа и камеры для высокоскоростной съемки. В зависимости от поведения бусинки фаза одного из электродов менялась. В результате бусинка набирала механическую энергию. Подсчеты исследователей показали, что этой энергии было больше, чем работа, совершаемая электромагнитным полем.
- Основой для эксперимента стали теоретические выкладки Лео Сциларда, опубликованные им в работе 1929 года. Ученые подчеркивают, что закон сохранения энергии в данном случае не нарушается, поскольку для работы ЭВМ и камер требуется электрическая энергия. Вместе с тем непосредственно передачи энергии бусинке, потраченной на работу того же ЭВМ, не происходит - в рамках эксперимента происходит превращение информации в энергию и наоборот.
- Физики отмечают, что на создание данного эксперимента их вдохновил знаменитый [демон Максвелла](#). В 1867 году Джеймс Максвелл предложил мысленный эксперимент, якобы опровергающий второе начало термодинамики. В рамках эксперимента имелось две емкости с газом, разделенные дверью и демон, который был способен открывать и закрывать эту самую дверь.
- Предполагалось, что демону известны скорости молекул - перед быстрыми он открывал дверь, а перед медленными, наоборот, закрывал. В результате одна из емкостей нагревалась, а вторая остывала. В это же время Второе начало термодинамики утверждает, что самопроизвольный переход тепла от тела, менее нагретого, к телу, более нагретому, невозможен.
- Ссылки по теме

## Вернемся снова к энтропии

- **Энтропией** называется функция состояния системы, изменение которой  $\Delta S$  **для равновесного** (обратимого) перехода системы из состояния 1 в состояние 2 равно:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dQ}{T} \quad \frac{\delta Q}{T} = c_v \frac{dT}{T} + R \frac{dV}{V}$$

- $\delta Q > \delta Q_{\text{необ}}$  и знак “=” в формуле меняем на “>”
- У функцией состояния при обратимом круговом процессе значение интеграла не зависит от пути, по которому идет процесс  $\oint dS = \oint \frac{\delta Q}{T} = 0$  (например, в цикле Карно), а при необратимом  $< 0$ . Это неравенство Клаузиуса и следствие теоремы Карно. В общем случае  $\delta Q/T \leq dS$ . Т.е. в результате цикла энтропия либо возрастает либо остается постоянной. При обратимом переходе из состояния 1 в 2  $\Delta S$  будет одним и тем же. Оно определяется только  $S_1$  и  $S_2$

# Энтропия

- $S$  не может быть измерена непосредственно можно только пересчитать  $\Delta S$ .
- Выражение для энтропии позволяет определить не абсолютное значение функции  $S$ , соответствующее какому-то состоянию, а лишь ее изменение при переходе от одного состояния к другому. Поэтому можно приписать некоторому состоянию системы значение  $S = 0$  и сравнивать с ним все другие состояния системы.
- $S$  пропорциональна массе вещества . Т.е. величина экстенсивная и часто измеряется на  $\text{м}^3$ , кг и т.д.
- $S$  аддитивная величина т.е.  $S_{\text{сис}} = \sum S_i$
- $S(T, V)$  функция  $T$  и  $V$  но определена с точностью до  $\text{const}$  определяемой теоремой Нернста т.е при  $T \rightarrow 0$   $S \rightarrow 0$



## Второе начало и энтропия

- Частные производные – уравнения состояния

$$\frac{1}{T} = \left(\frac{\partial S}{\partial U}\right)_V, \quad p = \left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_U$$

- **Изолированными** (или замкнутыми) системами называются термодинамические системы, которые не обмениваются с внешней средой ни энергией, ни веществом
- Еще одна формулировка: **Энтропия изолированной системы не может убывать:  $dS \geq 0$**
- То, что  $dS=0$  при  $\delta Q=0 \Rightarrow$  из определения  $S$
- Процесс  $S=\text{const}$  - изоэнтропийный процесс например адиабатическое размагничивание. Т.е. если  $S_1=S_2$  то система адиабатически изолирована
- Энтропия это мера необратимости

# Второе начало и энтропия

- При адиабатических условиях возможны только **обратимые** процессы ( $S=\text{const}$ ) и **не обратимые** при которых  $S$  возрастает **но в природе все необратимо**
- Для **открытых** систем  $S$  может и уменьшаться.
- Не обязательно чтобы увеличивалась  $S$  каждого из тел участвующих в процессе. Увеличивается  $\sum S_i$  в которых процесс вызвал изменения
- $S=S_m+S_l+S_e=\text{const}$  то  $-\Delta S_m=\Delta S_l+\Delta S_e$
- Термодинамическое равновесие – состояние с  $S_{\text{max}}$ .  
Если  $S=S_{\text{max}}$  то никакие дальнейшие процессы не возможны ибо любой процесс ведет к уменьшению  $S$ .
- $S(T)$  может иметь и несколько  $S_{\text{max}}$  несколько состояний равновесия (метастабильных состояний). Наиболее стабильно то где самая большая  $S_{\text{max}}$ . Т.е. самое большое время жизни состояния. А может вообще не быть стабильных состояний.

# Энтропия обратимых и необратимых процессов

- Итак можно показать, что для любого **обратимого** процесса энтропия замкнутой системы не изменяется:

$$dS=0$$

- При **необратимых** же процессах:  $dS>0$
- Пример необратимого процесса: смешиваем массы воды или два газа с разными температурами  $T_1$  и  $T_2$ . Процесс смешения и установления единой температуры может идти сам собой, но обратный процесс разделения смешанных масс ни в коем случае идти не может. При этом необратимом процессе энтропия непрерывно возрастает, но только до установления равновесия.

# Термодинамическая вероятность состояния

- Во всякой системе, предоставленной самой себе, процесс пойдет так, что система будет переходить от менее вероятных состояний к более вероятным. **Состояние равновесия - это всегда наиболее вероятное состояние и энтропия при этом максимальна.** Отсюда следует, что **энтропия и термодинамическая вероятность состояния — связанные** между собой понятия.
- **Термодинамическая вероятность принципиально отличается от той вероятности, которая обычно** нами используется. Например, вероятность выигрыша в лотерею -  $x\%$ , вероятность падения монеты орлом вверх -  $50\%$ , то есть вероятность этих событий всегда меньше или равна единице.
- **Термодинамическая вероятность состояния (или статистическим весом) называется число способов, которым это состояние осуществляется.** Термодинамическая вероятность всегда больше единицы.

# Энтропия и термодинамическая вероятность состояния

Больцман показал, что величина энтропии и вероятностью состояния связаны следующим образом:

$$S = -k \ln w$$

где  $k$  — постоянная Больцмана, а  $w$  — термодинамическая вероятность состояния системы (число микросостояний, реализующих данное микросостояние)

Итак рост энтропии соответствует переходу системы к большему беспорядку. В состоянии равновесия беспорядок максимальный. **С физической точки зрения энтропия является мерой беспорядка системы.**

# О тепловой смерти Вселенной.

2-е начало термодинамики получено из обобщения опытных данных для замкнутой и конечной системы. А если об этом забыть? Если, например, применить 2-е начало к Вселенной, то получаем, что "энтропия Вселенной стремится к максимуму". Значит, **когда этот максимум** будет достигнут, во Вселенной **прекратятся какие бы то ни было тепловые процессы**, потому что все тела принимают одинаковую температуру, и все виды энергии переходят в тепловую.

# О тепловой смерти Вселенной.

Действительно, если найдется хоть одно тело с другой температурой, то будет реализовываться процесс теплопередачи, который обязательно, по второму началу, приведет к росту энтропии системы, а это невозможно, потому что энтропия уже достигла максимума. Такое состояние системы и названо тепловой смертью Вселенной. На самом деле никакой тепловой смерти нет, т.к. нет никаких оснований считать Вселенную ни конечной, ни замкнутой системой.

**2-е начало термодинамики не применимо ко всей Вселенной так как это открытая система!**

# Энтропия биосферы

Открытые (незамкнутые) системы физикой также изучаются, но в рамках термодинамики необратимых процессов (в рамках **неравновесной термодинамики**).

Биосфера является открытой системой, и за счет потока солнечной энергии энтропия биосферы может понижаться. И такое понижение энтропии биосферы действительно происходило на протяжении многих миллионов лет. При этом происходило непрерывное повышение организованности биосферы.

Можно сказать, что для биосферы Солнце является источником потока **"отрицательной энтропии"**.



# Энтропия биосферы

Огромные запасы "отрицательной энтропии" накапливались в биосфере за счет деятельности фотосинтеза, и они хранятся в ископаемом органическом топливе. Это топливо является примером системы, находящейся в состоянии неустойчивого равновесия, т.е. в нем рост энтропии практически не происходит.

Человек выступает как активный катализатор механизма роста энтропии, сжигая это топливо.

Копились запасы отрицательной энтропии миллионы лет, а сжигаются стремительно. В результате энтропия биосферы стала возрастать, что мы и наблюдаем в виде глобального потепления.

# ФАКУЛЬТАТИВНО: Летать или плавать?

**Самолет** тратит 10 кубических сантиметров в секунду или 36 литров в час, за который пролетает 900 километров (необходимо 4 литра на каждые сто километров на 1 пассажира). Современные самолеты чуть более экономные и тратят около 3 литров на сотню километров на одного пассажира.

Ну а что насчет **корабля**? Большая пассажирская лодка или круизный лайнер потребляют около 25 литров на сто километров на одного пассажира. Несмотря на умеренную скорость, **корабль оказывается хуже самолета, если говорить о потреблении топлива на один «пассажирокилометр».**

# ФАКУЛЬТАТИВНО: Летать или плавать?

С чем сталкиваются во время путешествия самолет и корабль? Во-первых, им надо преодолеть сопротивление воздуха и воды, соответственно, которое определяется не только скоростью, но и плотностью среды. Как известно, у воды и воздуха она отличается на три порядка величины. Еще более важную роль играет количество пассажиров и размеры их багажа. На корабле вес пассажиров с багажом обычно составляет несколько десятых процента от общей массы, потому что на корабле, кроме прочего, размещаются магазины и рестораны, бассейны и каюты.