



Овчинкин Владимир Александрович

Кандидат технических наук,
доцент кафедры общей физики МФТИ,
учитель физики физико-математического
лицея №5, г. Долгопрудный.

Второе начало термодинамики

Знаете ли вы, что немногие знают, как много
надо знать, чтобы знать, как мало мы знаем?

*Любимый афоризм моего старого друга
и однокурсника, пожелавшего остаться
неизвестным*

Основные законы (постулаты) термодинамики называют ещё *началами*. В них явно не используются представления о молекулярно-кинетическом строении вещества (в этом феноменологичность термодинамики). Начала являются аксиомами, вытекающими из колоссальной практики человеческой жизни. Термодинамика, развивая эти начала, приводит к важнейшим результатам в отношении свойств физических систем.

Статья посвящена так называемому второму началу термодинамики – закону об *энтропии*. Однако здесь ни слова не будет сказано о ней (хотя это слово заслуживает особого к себе внимания). Мы поговорим о проявлениях этого закона, вроде бы вполне очевидных. Например, о невозможности самопроизвольного перехода теплоты от холодного тела к горячему и о вечных двигателях, хотя о них всё уже было сказано ещё в XIX веке.

В статье будет также рассказано, как работает самая грандиозная тепловая машина – теплоэлектростанция (ТЭС), прекрасно иллюстрирующая второе начало.

Введение

Бурное развитие термодинамики, т. е. науки, изучающей тепловую форму движения материи, приходится на XIX век. Уже в конце XVII века появились первые паровые машины. Тут и паровоз, построенный гениальными русскими умельцами

братьями Черепановыми (XVIII в.), и первые тепловые двигатели, предназначенные для подъёма воды из шахт, сконструированные английскими инженерами Т. Севери (1698 г.) и Т. Ньюкоменом (1712 г.), и машины Уатта (1774 г.). Необходимо было, во-

первых, осмыслить – почему они работают. А поняв, совершенствовать их конструкции, повышая их эффективность. Впервые работа тепловых машин была теоретически рассмотрена в 1824 г. Сади Карно.

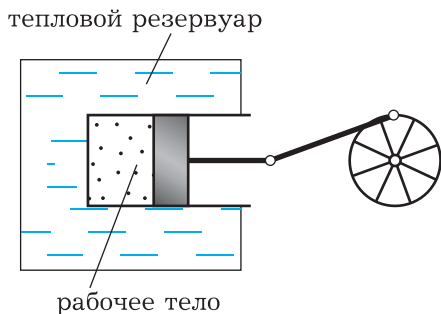


Рис. 1

На рис. 1 изображена схема тепловой машины, преобразующей внутреннюю энергию теплового источника (резервуара тепла) в макроскопическую работу. Важно заметить, что тепловая машина должна работать по замкнутому круговому процессу, который периодически повторяется. В цилиндре под поршнем находится газ или какое-либо другое вещество, называемое рабочим телом. В дальнейшем будем полагать, что это идеальный газ.

Рассмотрим круговой процесс $1a2b1$, изображённый на (p, V) -диаграмме (рис. 2).

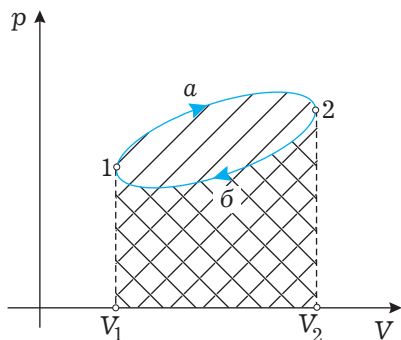


Рис. 2

Если цилиндр с поршнем привести в тепловой контакт с нагревателем, то в результате нагрева газа произойдёт некий процесс $1a2$ его расширения с совершением им работы A_{1a2} . Величина этой работы, как известно, равна заштрихованной площади под графиком этого процесса на (p, V) -диаграмме. Для возвращения в исходное состояние 1 требуется сжимать газ внешними силами, отводя от него тепло. График этого процесса $2b1$ изображён также на рис. 2. Внешняя работа по сжатию A_{2b1} численно равна дважды заштрихованной под ним площади. Площадь внутри этого кругового процесса $1a2b1$ равна полезной (положительной) работе A цикла. Заметим, что $A > 0$, а график этого цикла обходится по часовой стрелке. По первому началу термодинамики количество теплоты Q_{1a2} , полученное от нагревателя, равно

$$Q_{1a2} = U_2 - U_1 + A_{1a2}.$$

Здесь U – внутренняя энергия газа (рабочего тела). Аналогично, количество теплоты Q_{1b2} , отданное газом другому резервуару тепла в процессе сжатия, равно

$$Q_{1b2} = U_1 - U_2 + A_{2b1}.$$

В более общем виде этот результат можно сформулировать так: алгебраическая сумма теплот по всем частям кругового процесса равна алгебраической сумме работ по этим же процессам, причём сумма работ равна полезной работе цикла, если он обходится на (p, V) -диаграмме цикла по часовой стрелке:

$$\sum Q_i = \sum A_i = A, \quad A > 0.$$

Уместно напомнить, что для тепловой машины ($A > 0$) её КПД определяется формулой



$$\eta = \frac{\sum Q_i}{Q^+} = \frac{A}{Q^+},$$

где $Q^+ = \sum Q_j$ (все $Q_j > 0$),

т. е. Q^+ – это суммарное количество теплот по тем процессам, в которых газ получал тепло от внешних источников.

Для цикла, изображённого на рис. 2:

$$\eta = \frac{A}{Q_{1a2}}.$$

Заметим, что для создания тепловой машины необходимо как минимум два тепловых резервуара: горячий и холодный. Теплота, отдан-

ная холодному резервуару для возврата в исходное состояние 1, называется *компенсацией*. Без компенсации тепловая машина просто невозможна. Собственно, это и утверждает одна из формулировок второго начала термодинамики, рассмотренного впервые в 1851 г. Вильямом Томсоном (получившим позднее за великие научные заслуги почётный титул лорда Кельвина): «Невозможен круговой процесс, единственным результатом которого было бы производство работы за счёт охлаждения теплового резервуара». Проверим напрямую справедливость этого утверждения.

Возможна ли тепловая машина с одним тепловым резервуаром?

Как только что было сказано, нет.

Тем не менее, попытаемся исследовать такую возможность. Пусть у нас есть термодинамическая система, изображенная на рис. 1. Тепловой резервуар и будет единственным источником тепла для нашей тепловой машины. Теплоёмкость этого резервуара бесконечна, т. е. его температура постоянна и равна T_0 . Такое устройство называется *термостатом*. Если поршень в цилиндре перемещать медленно, поддерживая рабочее вещество (идеальный газ) в тепловом равновесии с термостатом, то, как показано на рис. 3, никакого кругового процесса не получится. Изотермическая работа A_{12} будет по модулю равна работе A_{21} (сжатие газа), т. е. $A_{12} + A_{21} = 0$. Тот же результат получится, если поршень перемещать очень быстро, не допуская теплообмена между рабочим веществом и термостатом. Такой процесс называется адиабатическим.

Итак, при быстром ходе поршня процесс можно считать адиабатическим, а при очень медленном – изотермическим.

Это возможно, поскольку процессы установления давления под поршнем, а значит, равновесия газа происходят намного быстрее хода поршня, да и стенки цилиндра можно сделать слабо проводящими тепло. Таким образом, адиабата 3 – 4 на рис. 4 описывается уравнением

Пуассона $pV^\gamma = \text{const}$, где $\gamma = \frac{C_p}{C_V}$ –

показатель адиабаты, а C_p и C_V – молярные теплоёмкости газа при постоянном давлении p и постоянном объёме V . При этом, как хорошо известно, для идеального газа $C_p - C_V = R$ (соотношение Майера).

Поскольку $\gamma = \frac{C_p}{C_V} > 1$ (для двух-

атомного газа $\gamma = 1,4$), то ход графика адиабаты на рис. 4 заметно круче изотермы (рис. 3).

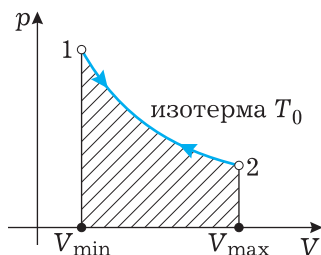


Рис. 3

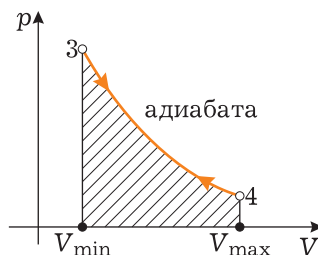


Рис. 4

Ни изотерма, ни адиабата

Если допустить, что скорость поршня в некотором процессе меньше скорости поршня в адиабатическом процессе, то это означает, что в этом процессе есть теплообмен между рабочим телом и термостатом. Допустим, что тепловое равновесие при этом не наступает, тогда этот процесс ни адиабатический, ни изотермический. Вот именно это мы и рассмотрим далее.

Согласно I началу термодинамики, при небольшом перемещении поршня изменение внутренней энергии 1 моля идеального газа

$$\Delta U = Q - p\Delta V; \Delta U = C_V \Delta T. \quad (1)$$

Здесь $C_V = \frac{3}{2}R$ (для одноатомного

газа) или $\frac{5}{2}R$ (для двухатомного газа). Добавим к этому соотношение

$$p\Delta V + V\Delta p = R\Delta T, \quad (2)$$

вытекающее из уравнения состоя-

ния идеального газа $pV = RT$. По существу, уравнение (2) – это уравнение состояния идеального газа в приращениях: ΔV , Δp , ΔT – это небольшие изменения объёма, давления и температуры при небольшом перемещении поршня. Решая систему уравнений (1) и (2), найдём, как меняется давление в зависимости от количества теплоты Q и ΔV :

$$\Delta p = \frac{R}{VC_V} Q - \frac{\gamma p}{V} \Delta V. \quad (3)$$

Легко понять, что второй член в (3) является изменением давления в адиабатическом процессе (при $Q=0$), если объём газа изменился незначительно.

Итак, с помощью соотношения (3) мы сможем понять, как будет идти процесс расширения газа (или сжатия его) в двух случаях: 1) $T < T_0$ и 2) $T > T_0$.

Температура рабочего тела меньше, чем термостата

Рассмотрим сначала случай 1 ($T < T_0$) при расширении газа, когда $\Delta V > 0$, но при этом и $Q > 0$, поскольку газ поглощает тепло.

На рис. 5 изображён процесс адиабатического расширения 1 – 2 при небольшом изменении объёма ΔV . Штрихами обозначены несколько адиабат, а сплошной линией изотерма T_0 . В соответ-

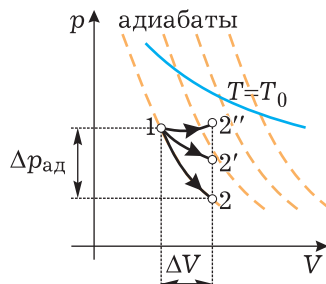


Рис. 5

ствии с формулой (3) процесс 1–2' (или 1–2'') пойдёт выше адиабаты, т. е. $\Delta p < \Delta p_{\text{ад}}$. Заметим также, что (p, V) -диаграмма вычерчивается обычно так, что на пересечении осей p и V как p , так и V не равны нулю. При этом выделяется интересный нас участок плоскости (p, V) в нужном нам масштабе.

Процесс сжатия ($\Delta V < 0$) при температуре газа $T < T_0$ отображён на рис. 6, где также 1–2 – кусок адиабаты, а 1–2' – реальный процесс, соответ-

ствующий случаю $\Delta V < 0$, $Q > 0$. Видно, что процесс 1–2' идёт круче адиабаты.

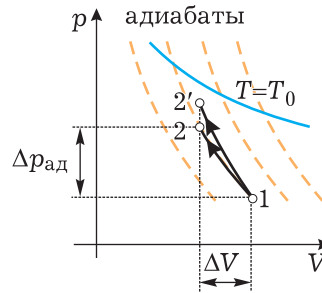


Рис. 6

Температура рабочего тела больше, чем термостата

На рис. 7 и 8 рассмотрены также соответственно случаи расширения газа и его сжатия, но уже при температурах газа $T > T_0$, т. е. здесь газ отдаёт тепло термостату и $Q < 0$.

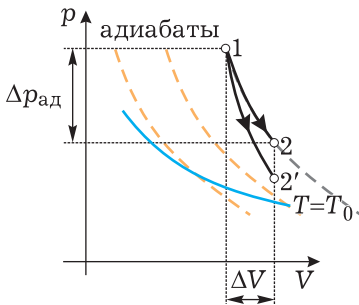


Рис. 7

На рис. 7 процесс расширения газа 1–2' идёт круче адиабаты 1–2, а на рис. 8 процесс сжатия газа идёт,

наоборот, более полого по сравнению с адиабатой 1–2. На всех четырёх диаграммах видно, что процессы с теплообменом идут более коротким путём к изотерме, чем даже адиабата.

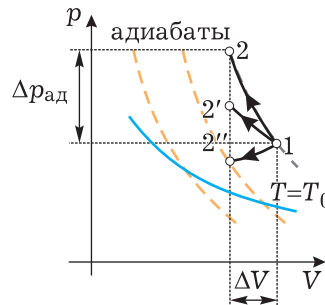


Рис. 8

Ну а теперь можно изобразить круговой процесс, протекающий с единственным тепловым резервуаром.

И это тепловая машина?

На (p, V) -диаграмме (рис. 9) изображены изотерма T_0 и штрихами «семейство» адиабат $pV^\gamma = \text{const}$. Точкой 1 обозначено начальное состояние газа при $V = V_{\text{min}}$.

Далее начинаем процесс расширения газа вплоть до предельного объёма $V = V_{\text{max}}$ (состояние 2). Этот процесс расширения соответствует

рис. 5. На рисунке этот процесс идёт с теплообменом типа 1–2'. Достигнув максимального объёма, начинаем сжатие газа. Процесс 2–3 идёт круче адиабаты (в соответствии с рис. 6, где этот процесс идёт с теплообменом 1–2'). В точке 3 температура газа становится равной T_0 , но мы не прекращаем сжатия. Процесс 3–4 соответствует рис. 8, где соот-

ветствующий процесс с теплообменом обозначен как 1–2'. Достигнув минимального объёма, начнём расширять газ в процессах 4–5 и 5–6. И здесь есть соответствие рисунку 7 (процесс 1–2') и рисунку 5.

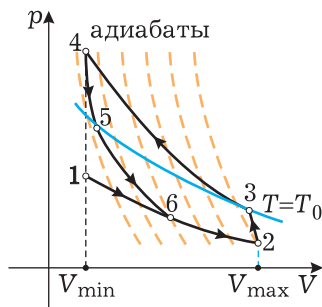


Рис. 9

В итоге мы имеем круговой процесс, направленный против часовой стрелки. Совершенно ясно, что этот процесс сугубо необратим. Если вы попытаетесь из любой точки пойти вспять, то возврата к тем же состояниям не произойдёт, процесс пойдёт другим путём. По существу мы получили круговой процесс, но не тепловой машины, а всего лишь утилизатора

наших усилий, превращённых этим утилизатором в безликую внутреннюю энергию теплового резервуара.

Таким образом, надежды на построение тепловой машины в рамках одного теплового резервуара (термостата) рухнули. Если бы это было возможно, то такая тепловая машина называлась бы *вечным двигателем второго рода*. И этот двигатель работал бы без тепловой компенсации. Именно так и звучит одна из формулировок второго начала термодинамики: «*Вечный двигатель второго рода невозможен*».

Здесь мы увидели однонаправленность необратимых процессов. Всякий необратимый процесс невозможно повернуть вспять, проведя его по тем же состояниям, как это можно было бы сделать с такими равновесными и обратимыми процессами, как изотерма, изобара, изохора, адиабата Пуассона и множеством других процессов.

В этом смысле тот факт, что тепло всегда переходит от горячего тела к холодному и никогда наоборот, тоже можно считать одной из формулировок второго начала термодинамики.

Что такое компенсация?

Из сказанного выше понятно, что тепловая машина, т. е. устройство по превращению внутренней энергии тепловых источников в макроскопическую работу, немыслима без отдачи части энергии горячих источников холодным телам. Как велика дань этому великому принципу?

В качестве примера рассмотрим замкнутый цикл производства электроэнергии на тепловой электростанции (ТЭС).

На рис. 10 показана очень упрощённая схема ТЭС. В паровом котле сжигается топливо. Обычно это газ, бесцветно-голубоватый факел которого «подсвечивается» мазутом или угольной пылью. Добавки мазута или угольной пыли делают факел

ярким, бело-жёлтым. Температура пламени при этом превышает 2000 °С. Все стенки топки (а это огромное помещение высотой до 30 м) заэкранированы трубами, в которых кипит и быстро поднимается вверх вода. Передача энергии от факела происходит в основном за счёт излучения: кипящая пароводяная смесь с огромной скоростью поднимается по экраным трубам в раздвигательный барабан котла, где пар отделяется от воды, а вода без пара опускается по опускным трубам (проложенным снаружи топки) в коллекторы, откуда попадает в экранные трубы, обеспечивая естественную циркуляцию. Кроме того, в барабан котла поступает подогретая

в водяном экономайзере вода-конденсат (после турбины) и дополнительное необходимое количество

воды после химводоочистки. Вода в экономайзере подогревается дымовыми газами.

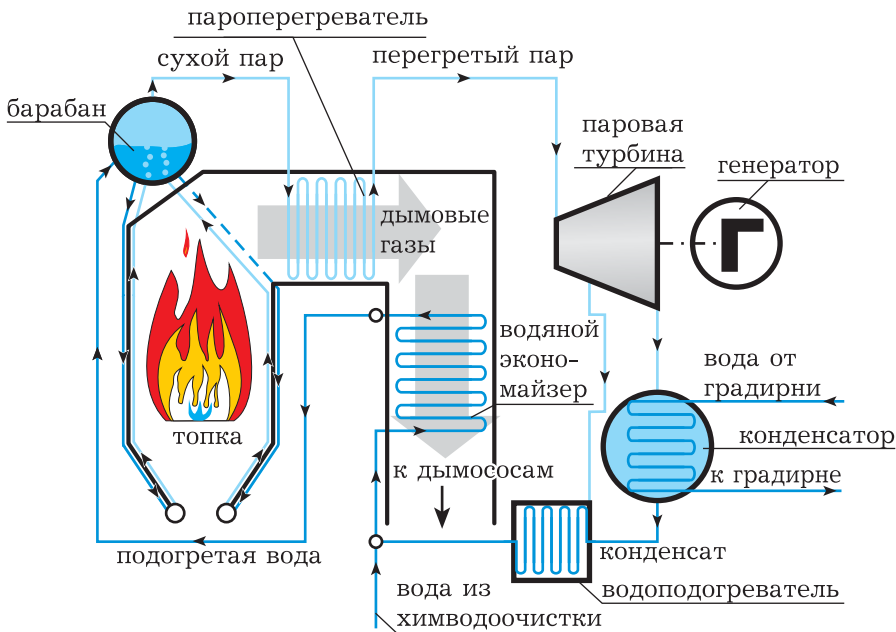


Рис. 10

Сухой насыщенный пар из барабана котла затем подогревается горячими дымовыми газами в пароперегревателе, который находится в верхней части котла сразу за топкой. По главному паропроводу иногда под давлением свыше 150 атм и температуре, превышающей 500°C , перегретый пар направляется к паровой турбине. Здесь пар проходит сначала через систему неподвижных сопел, организующих его поток, и далее расширяется на лопатках турбины, заставляя её вращаться со скоростью 3000 об/мин, т. е. с частотой 50 Гц. И не просто вращаться, а совершать колоссальную механическую работу по вращению ротора генератора. В электрическом генераторе эта механическая работа тут же превращается в энергию электрического тока, одновременно с этим вращением потребляемого в

электрических сетях (заводы, транспорт, жилые дома, ...). Малейшее изменение нагрузки со стороны потребителей электричества тут же сказывается на частоте вращения турбины. Увеличение частоты свидетельствует о снижении нагрузки. Тут же снижается и количество производимого котлом пара.

На последних ступенях турбины давление пара падает до давлений, меньших среднеатмосферного. Отработанный пар поступает в устройство, называемое конденсатором. Здесь происходит конденсация пара. Для того чтобы его превратить в воду, пар требуется охладить. Вот тут-то и отбирается тепло, называемое компенсацией.

На большинстве ТЭС применяется специальное устройство – градирня. Многие обращали внимание на огромные бетонные сооружения, по форме напоминающие шахмат-

ную ладью, «вечно парящие», расположенные вблизи почти всякой ТЭС. В них охлаждается так называемая «циркуляционная» вода. Эта техническая вода выполняет роль теплоносителя, охлаждающего отработанный пар, превращая его в чистый конденсат. Циркуляционные насосы прогоняют эту воду через конденсатор и доставляют её к градирне. По толстенной вертикальной трубе, расположенной в центре градирни, вода поднимается на высоту 20 – 30 метров, где разливается по многочисленным желобам, откуда выливается на чаши-«пяточки». Из этих чаш вода веером разбрызгивается и падает вниз, орошая дере-

вянные решётки, заполняющие всё пространство вплоть до основания градирни. Вода своеобразным дождём сливается в приёмный бассейн. Навстречу этому тёплому «дождю» снизу вверх устремляется холодный воздух, охлаждающий эту воду. Из приёмного бассейна холодная вода вытягивается циркуляционными насосами и направляется в конденсатор.

Вот так практически на ветер выбрасывается огромное количество тепла, обеспечивая тем самым замкнутость непрерывного цикла производства механической (самой высококачественной) энергии из неорганизованной внутренней энергии теплового хаоса.

Цикл Карно

В 1824 г. Сади Карно обессмертил своё имя, предложив тепловую машину с наибольшим возможным КПД в рамках температур, обеспечиваемых всего двумя тепловыми резервуарами: горячим с температурой T_H (нагреватель) и холодным с температурой T_X (холодильник).



Равновесный обратимый цикл 1 – 2 – 3 – 4 – 1 состоит из двух изотерм 1 – 2, 3 – 4 и двух адиабат 2 – 3 и 4 – 1 (рис. 11). На горячей изотерме рабочее тело (газ), расширяясь, поглощает тепло нагревателя $Q_{12} = Q_H > 0$. На холодной изотерме оно отдаёт холодному резервуару теплоту $Q_{34} = Q_X < 0$ (это компенсация в чистом виде). КПД этого цикла согласно определению равен

$$\eta = \frac{Q_H - |Q_X|}{Q_H} = 1 - \frac{|Q_X|}{Q_H}.$$

Если привести довольно простые выкладки, то окажется, что КПД цикла Карно равен

$$\eta = 1 - \frac{|Q_X|}{Q_H} = 1 - \frac{T_X}{T_H}.$$

Этот результат в физике получил название «великая теорема Карно», которую следует сформулировать так.

КПД цикла Карно:

а) не зависит от свойств рабочего тела, а зависит только от температур нагревателя T_H и холодильника T_X ;

б) не зависит от положения предельных адиабат 2 – 3 и 4 – 1;

в) максимален среди КПД всех прочих циклов тепловых машин, предельные температуры рабочего тела в которых совпадают с T_H и T_X .

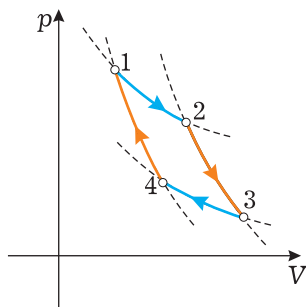


Рис. 11

Заметим, что положения предельных адиабат 2 – 3 и 4 – 1 определяют длительность изотермических процессов, т. е. циклы могут быть в принципе и очень короткими (во времени), и продолжительными. Это свойство циклов Карно дало в руки учёных «метод бесконечно малых циклов Карно».

К сожалению, нет ни одной теп-

ловой машины, реализующей этот цикл в чистом виде. Однако он очень важен в теории тепловых процессов и определяет тот теоретический предел, к которому следует стремиться при построении тепловых машин (двигателей).

Теорема Карно даёт понимание того, сколь велика компенсация – неизбежная отдача в окружающую среду определённого количества тепла. Оценим КПД тепловой электростанции. Если взять температуру перегретого пара $T_H \approx 750 \text{ К}$ (т. е.

около 500°C), а температуру охлаждённого конденсата $T_X \approx 280 \text{ К}$ (примерно 10°C), то $\eta = 1 - \frac{280}{750} \approx 0,6$.

Компенсация составляет примерно 40%. Конечно, и те 60% энергии топлива после совершения полезной работы (свет, работа транспорта, всевозможных станков, тепло в доме, ...) утилизируются, т. е. превращаются во внутреннюю энергию окружающей среды. Но эти 60% позволяют человеку жить на планете в относительном комфорте.

Заключение

Надо сказать, что общее количество выделяемой в результате жизнедеятельности человека энергии на Земле уже превышает мощность порядка 10^{13} Вт , тогда как мощность солнечной энергии, поступающей на Землю, составляет примерно 10^{18} Вт . Средняя температура планеты определяется тепловым балансом между полученной планетой

энергией и отданной ею энергией в пространство в виде теплового излучения. Поэтому дальнейшее наращивание мощностей производства будет неизбежно приводить к постепенному увеличению средней температуры поверхности Земли, что будет наряду с другими факторами влиять на климат и может приводить к катастрофам. Но это уже другая тема.

Юмор Юмор Юмор Юмор Юмор Юмор

Неоспоримое правило безопасности

Переходя через дорогу, смотрите не на светофор, а на машины – светофоры ещё никогда никого не сбивали.