



Второе начало термодинамики: направление тепловых процессов и пределы превращения энергии



Почему тепло течёт «в одну сторону», а
полная конверсия в работу в цикле
невозможна?



Исторический контекст: как сформировалось второе начало термодинамики



В XIX веке паровые машины поставили вопрос о предельной эффективности тепловых двигателей. Карно связал максимум КПД с температурами источников, Клаузиус — с направлением теплопередачи и энтропией, а Кельвин—Планк — с невозможностью «идеального» циклического преобразования теплоты в работу.

Формулировка Клаузиуса

01

Теплота не может самопроизвольно переходить от более холодного тела к более горячему. Для обратного направления требуется внешнее воздействие — иначе процесс будет «срываться» в сторону охлаждения горячего.

02

Эта формулировка напрямую объясняет холодильник, кондиционер и тепловой насос. Электроэнергия затрачивается на перенос тепла к более высокой температуре, где оно затем рассеивается.

03

Если внешняя работа не подводится, поток теплоты определяется различием температур. Реальное «естественное» направление всегда ведёт к уменьшению температурного перепада между телами.

Формулировка Кельвина–Планка

Нельзя построить периодически действующую тепловую машину, которая полностью превращала бы полученную теплоту в работу, не оставляя никаких других изменений. Любой цикл потребует «отпуска» части энергии.

1

В реальных условиях двигатель неизбежно взаимодействует с более холодным телом или окружающей средой, отдавая туда часть теплоты. Следовательно, достижимый КПД никогда не равен 100%.

2

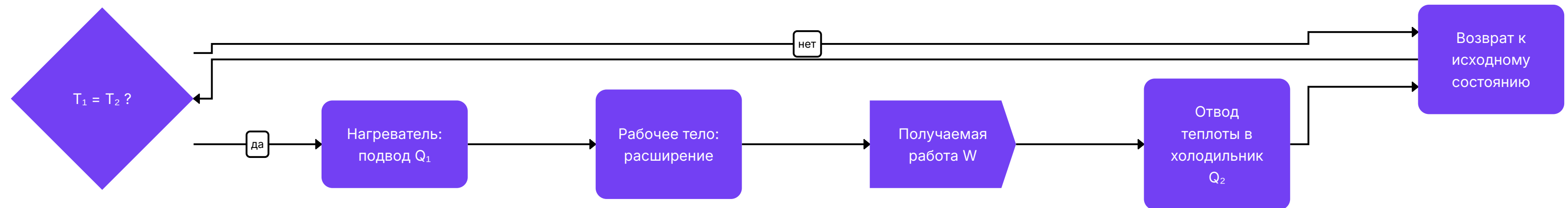
Это ограничение носит фундаментальный характер: оно связано не только с трением или несовершенством материалов, а с самими законами преобразования энергии и направленностью процессов.

3

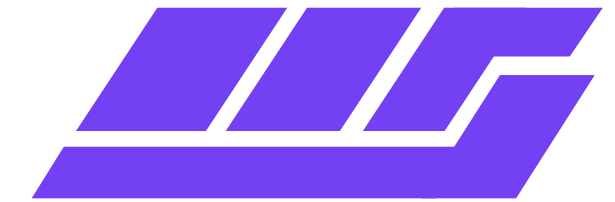
4

Цикл теплового двигателя: от теплоты к работе и обратно

Схема общего принципа работы двигателя с нагревателем и холодильником

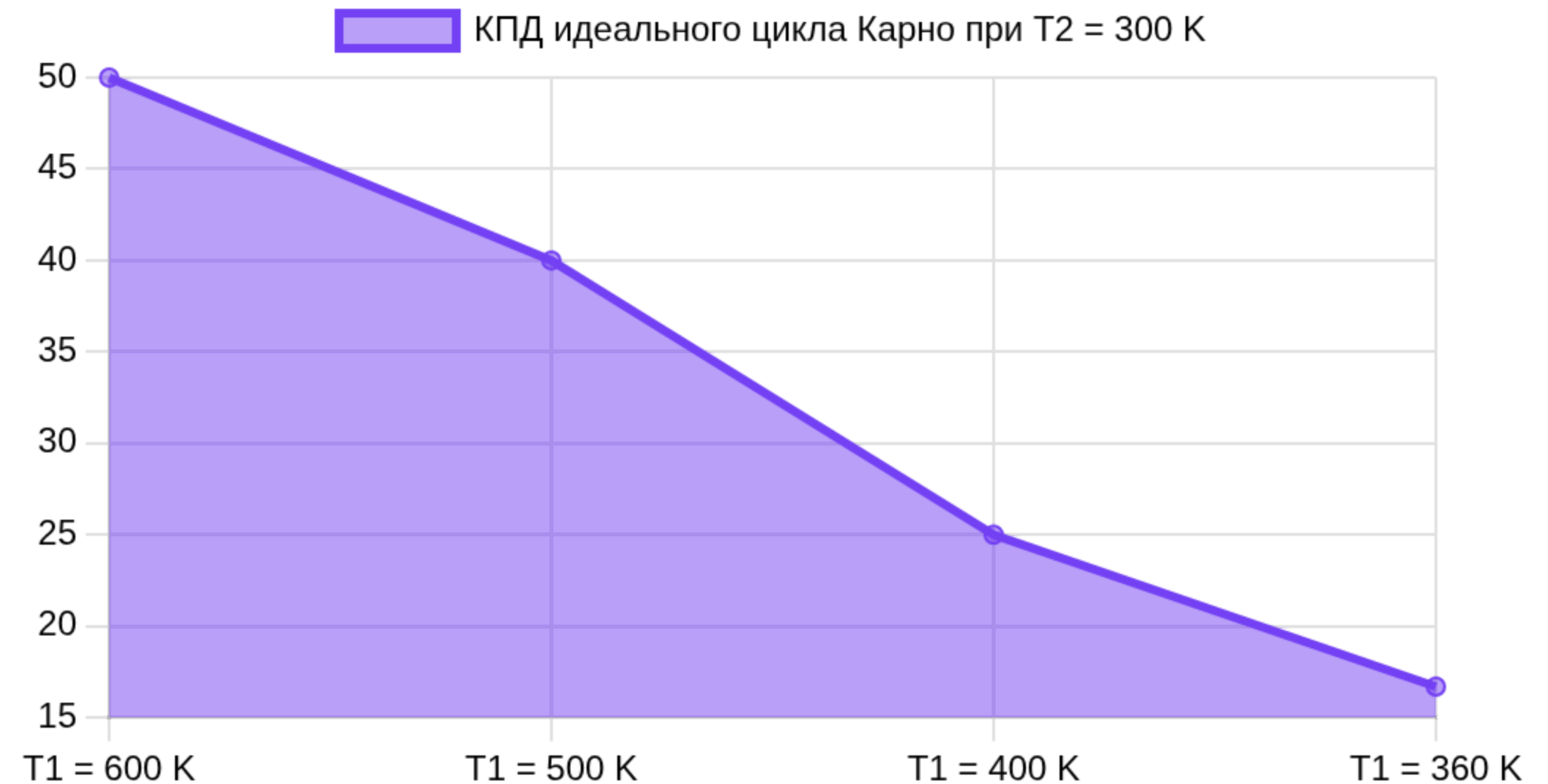


Идеальный предел эффективности: цикл Карно



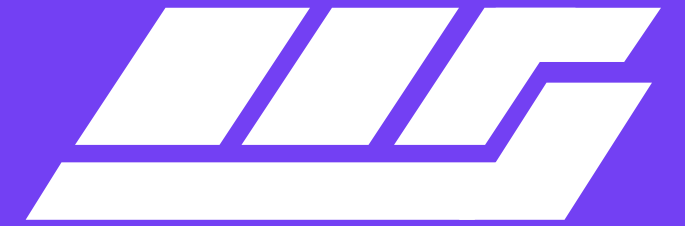
КПД Карно определяется только температурами нагревателя и холодильника, поэтому «техническое» улучшение не может превысить этот предел.

Расчёт по формуле $\eta = 1 - T_2/T_1$ (температуры указаны в условии), безразмерный КПД.



Чем выше T_1 , тем больше максимальная доля теплоты превращается в работу; при сближении температур эффективность резко падает.

Энтропия: мера необратимости и распределения энергии



Энтропия и обратимый переход

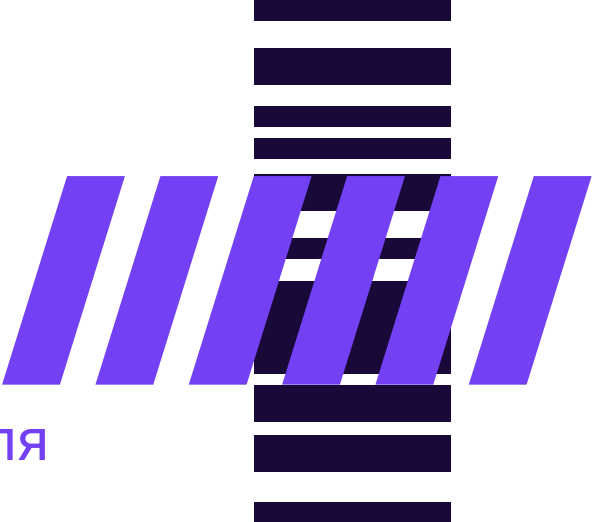
Энтропия обозначается S и в СИ измеряется в Дж/К. Для обратимого процесса её изменение выражается формулой $dS = \delta Q_{\text{rev}}/T$, где T — абсолютная температура.

Неравенство для изолированной системы

Для изолированной системы выполняется $\Delta S \geq 0$: в идеальном обратимом случае энтропия не меняется, а в реальных — возрастает. На картинках рост соответствует переходу к более вероятному распределению микросостояний.



Обратимые и необратимые процессы: сравнение



Физические определения второго начала и энтропии для изолированных систем.



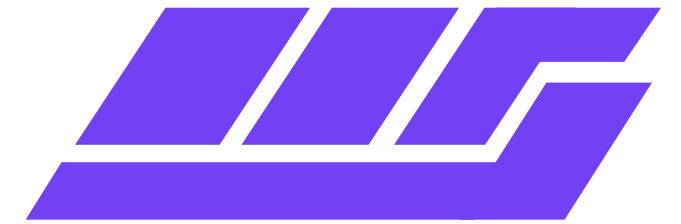
Сравниваются ключевые признаки: изменение энтропии, трение и потери, равновесие, направление процесса и характерные примеры.

Признак	Обратимый процесс	Необратимый процесс
Изменение энтропии	$\Delta S = 0$	$\Delta S > 0$
Наличие трения	нет	есть
Равновесие	квазистатично	нарушается
Направление процесса	может идти в обе стороны	идёт самопроизвольно вперёд
Примеры	идеализированные переходы	диффузия, трение, теплопроводность

Обратимость — идеальный предел. Большинство процессов вокруг нас необратимы, поэтому энтропия в замкнутой системе растёт.

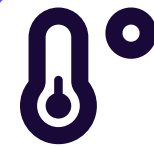


Примеры необратимости в повседневной жизни



Выравнивание температур

Смешивание горячей и холодной воды приводит к установлению промежуточной температуры. Без внешнего воздействия система не возвращает исходные различия сама по себе.



Остывание напитка

Чай или суп остывает до температуры комнаты самопроизвольно и не нагревается обратно без внешних мер. Направление процесса согласуется с переносом теплоты по температурному градиенту.



Трение в механизмах

При трении часть механической энергии превращается во внутреннюю и вызывает нагрев деталей. Обратный переход «сам по себе» не происходит, поскольку сопровождается ростом энтропии.



Диффузия запаха

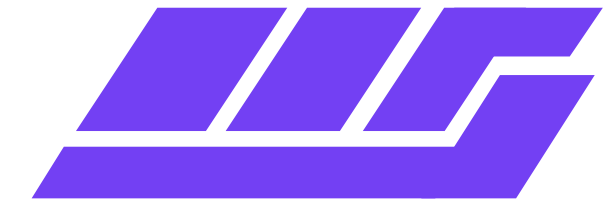
Запах постепенно распределяется по комнате. Молекулы переходят к более вероятному распределению, поэтому первоначальная «локальная» концентрация не восстанавливается без внешнего разделения.



Расширение газа

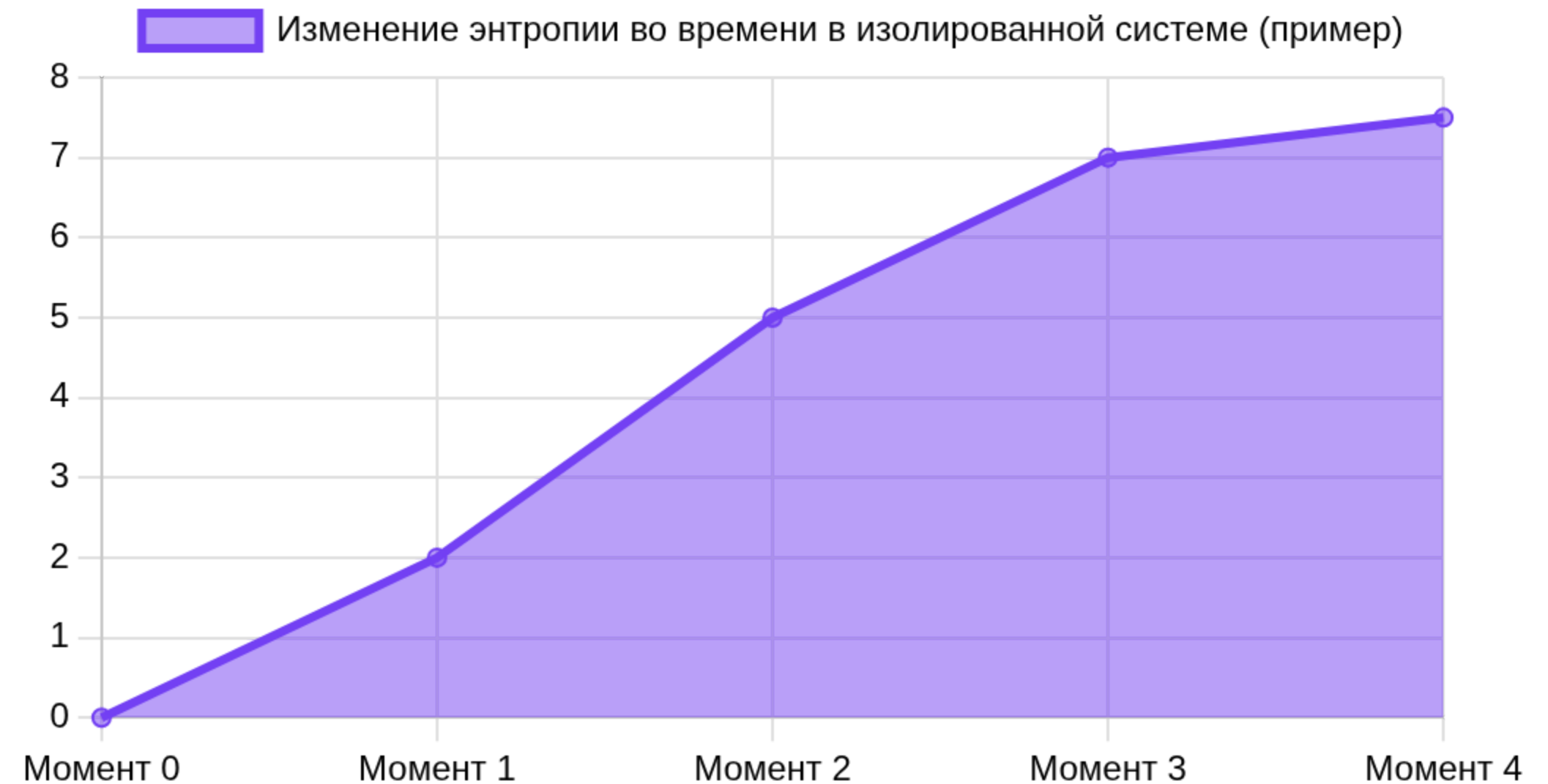
Газ расширяется в пустоту и занимает больший объём. Самопроизвольного сжатия обратно в исходный объём при тех же условиях не наблюдается из-за статистического направления процессов.

Рост энтропии в изолированной системе



На раннем этапе рост энтропии идёт быстрее: система активно «перестраивает» распределение энергии. Затем изменения замедляются.

Иллюстративный набор точек: S_0 ; S_0+2 ; S_0+5 ; S_0+7 ; $S_0+7,5$ (условные значения для демонстрации закона $\Delta S \geq 0$).



Когда достигается равновесие, макроскопический рост прекращается, поскольку система приходит к наиболее вероятному распределению.

Статистический смысл энтропии



- По Больцману энтропия связана с числом микросостояний: $S = k \ln W$, где W — количество способов реализовать данное макросостояние. Чем больше вариантов, тем выше S .
- Если макросостояние допускает множество микроскопических перестроек, оно чаще встречается. Поэтому равновесие — состояние с максимальной вероятностью — возникает самопроизвольно и, как правило, с трудом возвращается назад.
- Так второй закон получает статистическое объяснение: направление процессов определяется не «запретом», а тем, что большинство реализаций соответствует росту энтропии. Необратимость становится следствием вероятности.



Реальные тепловые двигатели и неизбежные потери: три наглядных эпизода



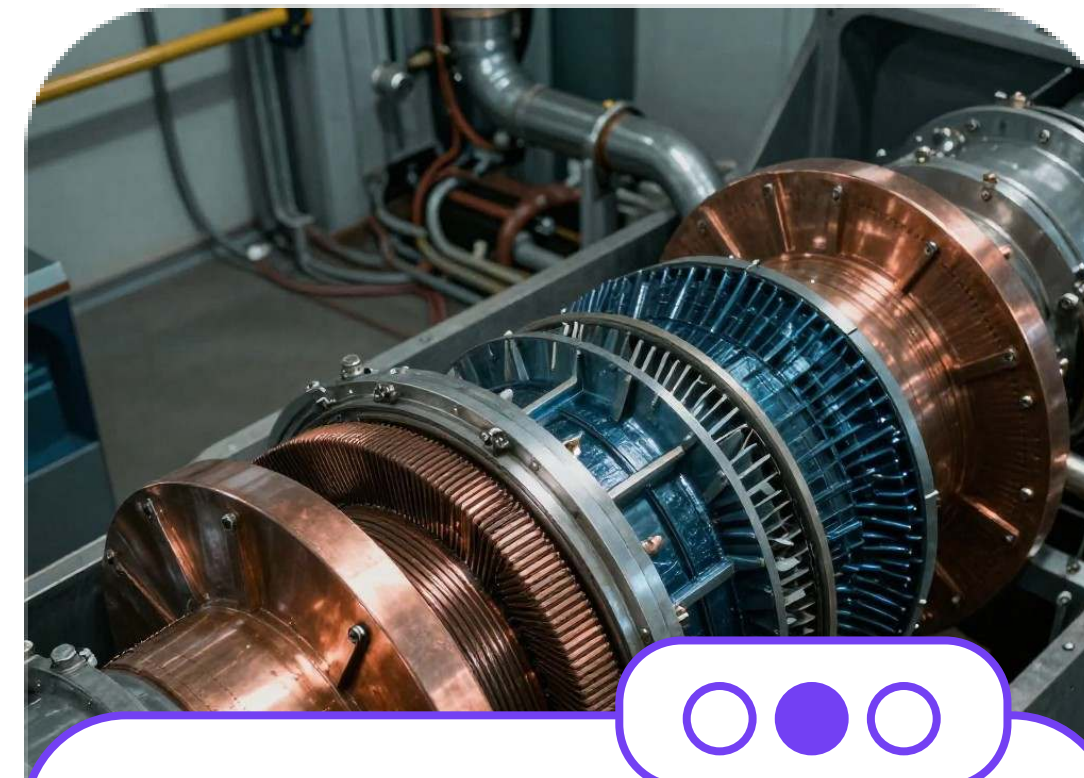
Автомобиль: тепло уходит в атмосферу, даже когда вы ускоряетесь

Двигатель внутреннего сгорания превращает часть энергии топлива в движение, но большая доля неизбежно превращается в теплоту и отводится через систему охлаждения. Механические потери на трение и конечные температуры источников делают КПД ниже теоретического предела.



Паровая турбина: рабочее тело расширяется не «идеально»

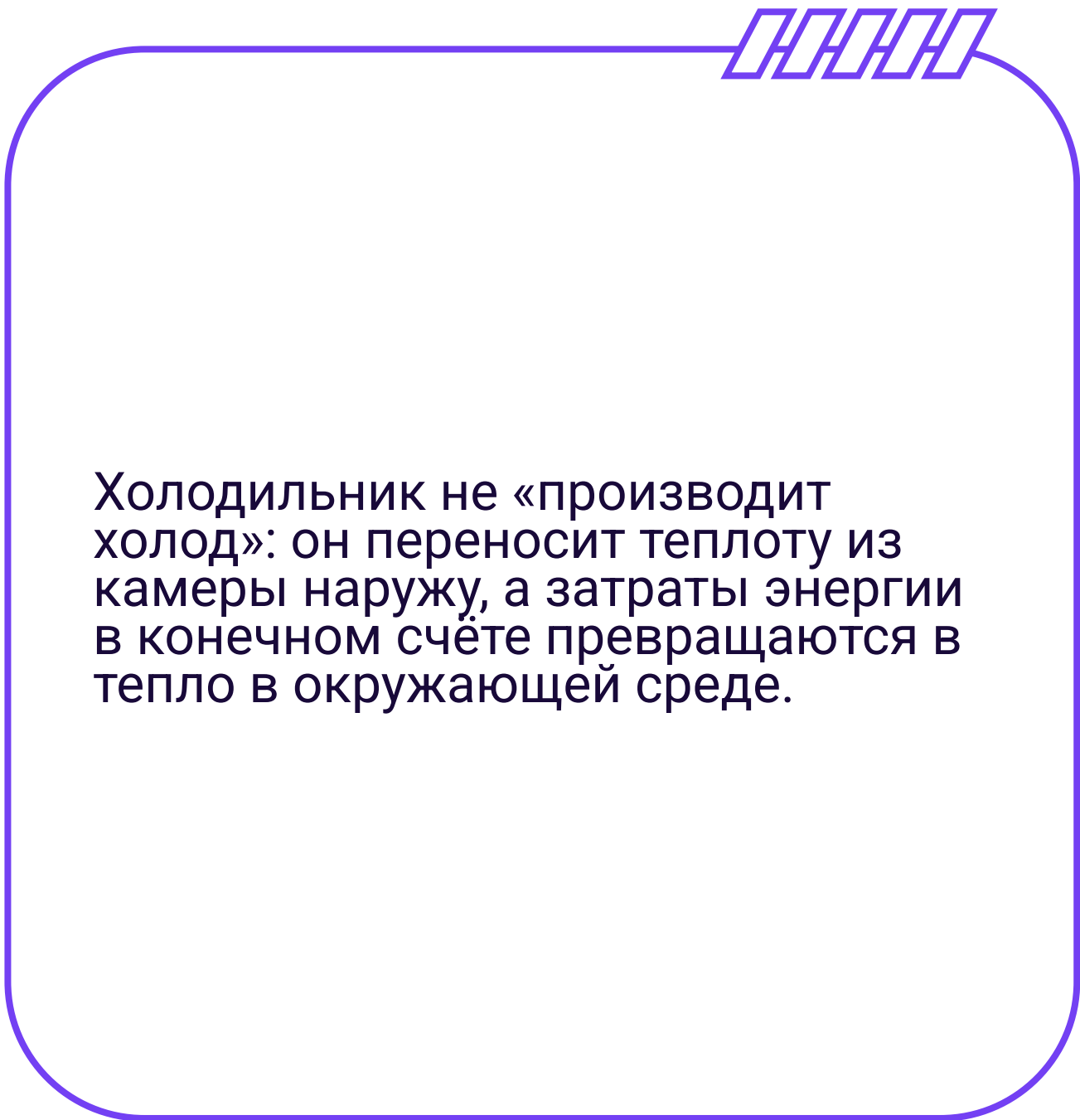
В паровой турбине пар совершает полезную работу, однако часть энергии теряется из-за внутренних сопротивлений и неидеальности процессов расширения. Теплота отводится в конденсатор, а разность температур нагревателя и холодильника ограничивает максимально возможный КПД.



Турбогенератор: электричество выигрывает, но тепло все равно остаётся

Электрический ток рождается в генераторе за счет механической работы, полученной от турбины. При этом в цепях и обмотках возникают потери на сопротивление и нагрев. В сумме такие эффекты не позволяют превратить топливо в работу на уровне 100%.

Почему холодильник требует затраты энергии



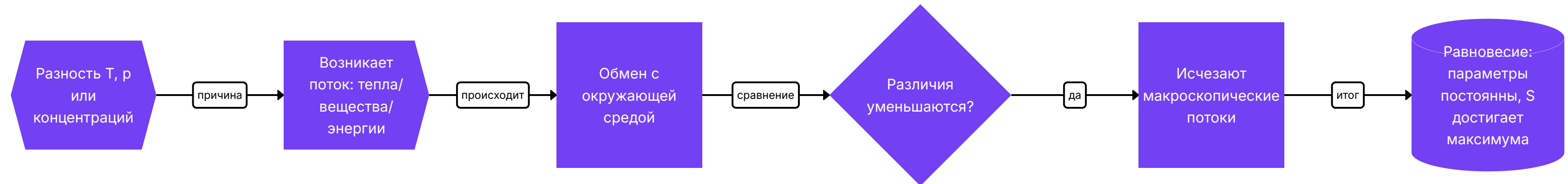
Иллюстративная схема (качественные индексы затрат), без экспериментальных измерений; подготовлено 2026-05-12



Схема показывает: перенос против естественного направления возможен только при внешней работе. При этом значимая часть энергии неизбежно рассеивается как тепло.

Как система приходит к равновесию

Логика необратимых тепловых процессов: потоки из-за разности параметров и последующее исчезновение макроскопических различий.



Второе начало в химии и биологии

01

Химические реакции идут самопроизвольно, когда итоговое изменение энергии и энтропии делает состояние более вероятным. Иными словами, «выгодным» оказывается то распределение, которое легче реализовать.

02

В живых организмах порядок поддерживается не за счёт чуда, а благодаря постоянному обмену веществом и энергией с внешней средой. Организм использует поток, чтобы локально поддерживать нужное состояние.

03

Локальное уменьшение энтропии внутри клетки или организма возможно, если компенсируется большим увеличением энтропии вне этой системы. Поэтому «сумма» для расширенной системы не обязана уменьшаться.

04

Второе начало помогает понять, почему жизнь не нарушает физику: она существует благодаря непрерывному энергопотоку и поддержанию неравновесных процессов, а не благодаря отмене закона для всей системы.

Основные величины и формулы темы

Учебные определения и стандартные соотношения термодинамики (без привязки к конкретным экспериментальным данным)

Величина	Обозначение/единица	Формула или смысл
Температура	T, К	—
Теплота	Q, Дж	—
Энтропия	S, Дж/К	$\Delta S \geq 0$ (изолир.); $S = k \ln W$
КПД	η , безразм.	$\eta = 1 - T_2/T_1$ (Карно)

Ключевые обозначения и формулы, которые задают ограничения на направление процессов и эффективность преобразований энергии.

Набор формул показывает: рост энтропии задаёт необратимость, а конечные температуры ограничивают максимальный КПД циклов.

Распространённые заблуждения о втором начале термодинамики

01

Второе начало не запрещает локальное уменьшение энтропии. В открытых системах это возможно, если система обменивается энергией и веществом с окружением и суммарная энтропия не уменьшается.

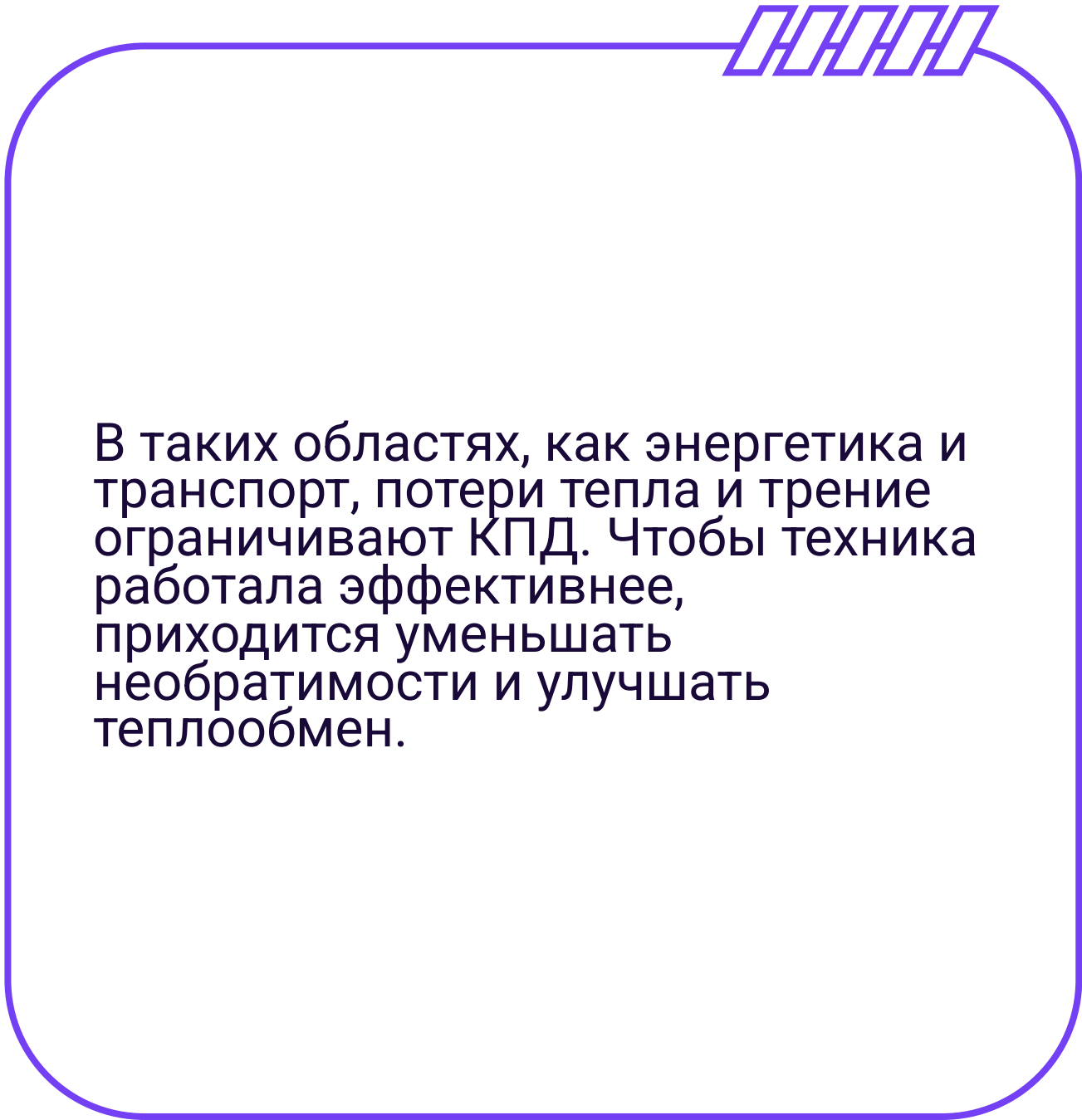
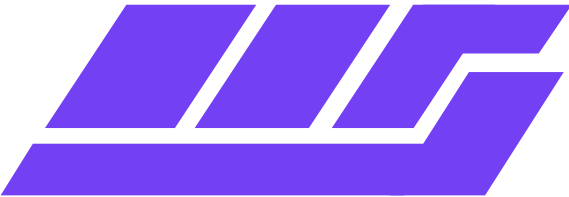
02

Закон не означает, что «всё вокруг обязательно превращается в хаос». Упорядоченные структуры могут возникать — но в замкнутой части мира их образование компенсируется ростом энтропии где-то ещё.

03

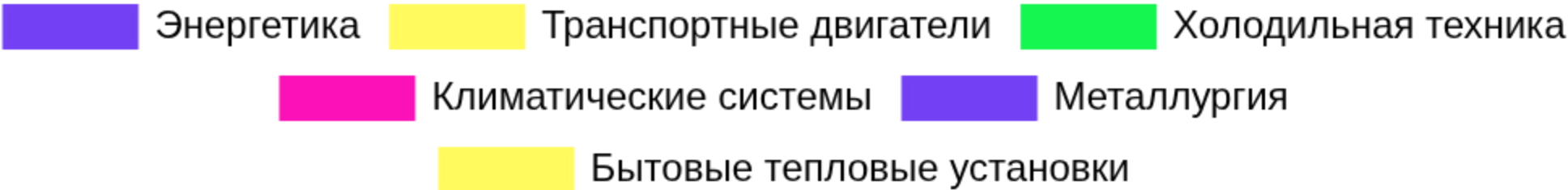
Кроме того, второй закон — не «абсолютный запрет на порядок», а статистическое утверждение о направлении процессов. Он говорит о вероятности макросостояний, поэтому обратный ход требует условий или затрат.

Практическое значение закона для техники и энергетики



В таких областях, как энергетика и транспорт, потери тепла и трение ограничивают КПД. Чтобы техника работала эффективнее, приходится уменьшать необратимости и улучшать теплообмен.

Условная иллюстрация распределения областей применения (без числовой статистики); подготовлено 2026-05-12



Круговая схема подчёркивает, что второе начало определяет «общий фон» эффективности во многих технологиях: почти везде есть потери, отвод тепла и ограничение по температурам.

Значение второго начала для науки и понимания мира

Второе начало связывает физику, химию, биологию и технику общим языком необратимости: направление процессов определяется тем, куда «уходит» энергия и как меняется энтропия.

Закон помогает понять, почему реальные машины не могут обходиться без потерь. Чтобы получить работу, неизбежно нужно отводить тепло в более холодную среду, а это снижает эффективность.

Он объясняет перераспределение энергии в природе: переходы идут от более упорядоченных макросостояний к более вероятным. Там, где вероятность выше, система чаще оказывается без внешнего принуждения.

Наконец, связь с современным представлением о времени проявляется через необратимость в замкнутых системах: наблюдаемый «стрелой времени» выступает рост энтропии. Поэтому прошлое и будущее различимы не случайно.



Итоги: закон, который задаёт направление процессам



Второе начало термодинамики задаёт два фундаментальных ограничения: циклическая машина не может превратить всю теплоту в работу, а тепло не переходит самопроизвольно от холодного к горячему. Энтропия связывает необратимость, вероятность и пределы эффективности.

