Казахский национальный университет имени аль-Фараби

Факультет механико-математический

Кафедра механики

Образовательная программа «6B05403 – Механика»

Дисциплина: Введение в механику сплошной среды

Лекция № 13

Второй закон термодинамики. Энтропия

Преподаватель: Туралина Динара Елеусизовна

к.ф.-м.н., ассистент-профессор

Алматы, 2026 год

Формулировка второго закона

Второй закон термодинамики: невозможно устройство, которое переводило бы тепло от тела с меньшей температурой к телу с большей температурой без каких-либо изменений в других телах.

Первый закон говорит, сколько энергии переходит; второй — в каком направлении идут процессы.

Обратный переход возможен лишь с затратой работы — так работает холодильная машина.



Тепло самопроизвольно переходит только от горячего тела к холодному

Энтропия и абсолютная температура

Обобщённая количественная формулировка второго закона: существуют функции состояния — **энтропия S** и **абсолютная температура T**, такие, что для произвольных, вообще говоря необратимых, процессов

$$T\,dS = \delta Q^{(e)} + \delta Q', \qquad \delta Q' \geq 0$$

$\delta Q^{(e)}$

приток тепла извне

$\delta Q'$ — некомпенсированное тепло

всегда неотрицательно: $\delta Q' \geq 0$

$\delta Q' = 0$ / $\delta Q' > 0$

для обратимых / необратимых процессов

Отсюда следует неравенство Клаузиуса:

$$dS \geq \frac{\delta Q^{(e)}}{T}$$

Обратимые и необратимые процессы

Обратимые процессы

Могут протекать в обратном направлении через те же состояния без изменений в окружающих телах. Идеализация: бесконечно медленные (квазистатические) процессы без трения.

$\delta Q' = 0$

Необратимые процессы

Все реальные процессы: вязкое трение, теплопроводность при конечной разности температур, диффузия, пластическая деформация, химические реакции.

$\delta Q' > 0$

Некомпенсированное тепло $\delta Q'$ — мера необратимости процесса.

Энтропия в обратимом процессе

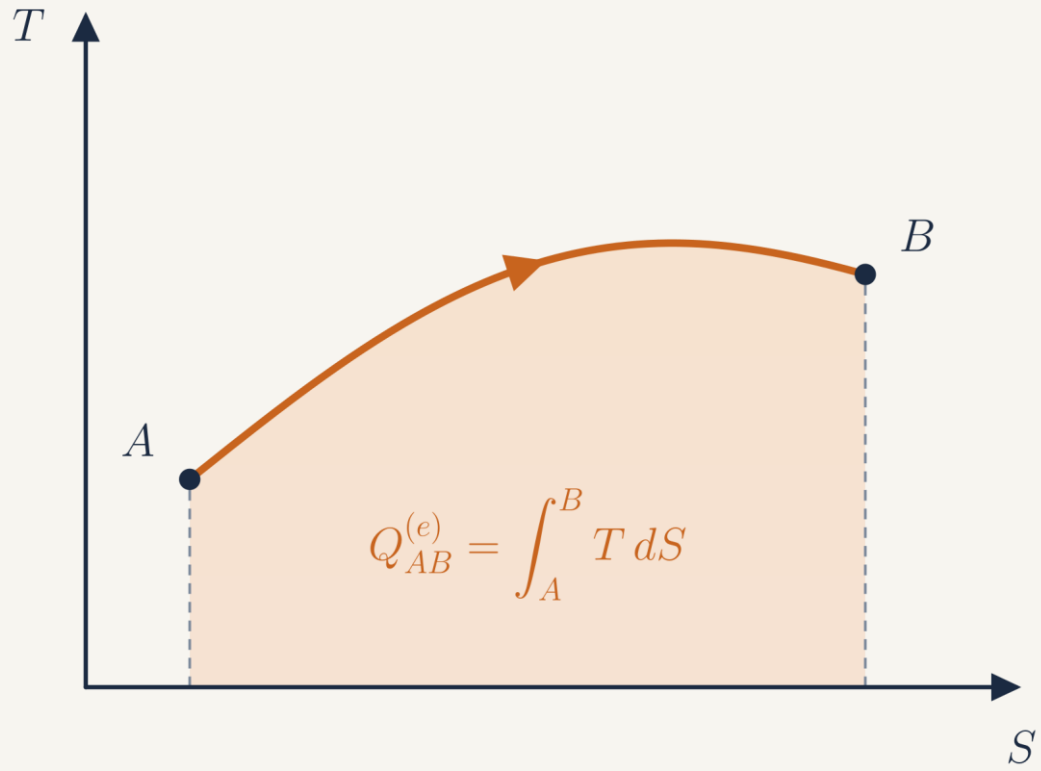
Для обратимого процесса δQ’ = 0, и второй закон даёт

$$dS = \frac{\delta Q^{(e)}}{T}$$

Фиксируя начальное состояние *A*, для любого состояния *B*, в которое можно перейти обратимым путём:

$$S(B) = \int_A^B \frac{\delta Q^{(e)}}{T} + S(A)$$

Энтропия, как и энергия, определена с точностью до постоянной S(A).



На диаграмме T–S площадь под кривой обратимого процесса равна подведённому теплу

Адиабатические процессы

Если система теплоизолирована, но может подвергаться любым силовым воздействиям, процессы называются **адиабатическими**:

$$\delta Q^{(e)} = 0$$

Для **обратимых** адиабатических процессов:

$$T\,dS = 0 \quad \Rightarrow \quad S = \text{const}$$

Обратимый адиабатический = изэнтропический

S = const. И наоборот: обратимый изэнтропический процесс адиабатичен, $\delta Q^{(e)} = 0$.

Необратимый адиабатический

dS = δQ′/T > 0: энтропия может только расти.

Рост энтропии в теплоизолированной системе

Если процесс адиабатический и **необратимый**:

$$T\,dS = \delta Q' > 0 \quad \Rightarrow \quad dS > 0$$

Энтропия теплоизолированной системы, если она изменяется, может только **расти**, так как δQ′ ≥ 0.

Процесс прекращается, когда энтропия достигает максимума — система приходит в равновесие.

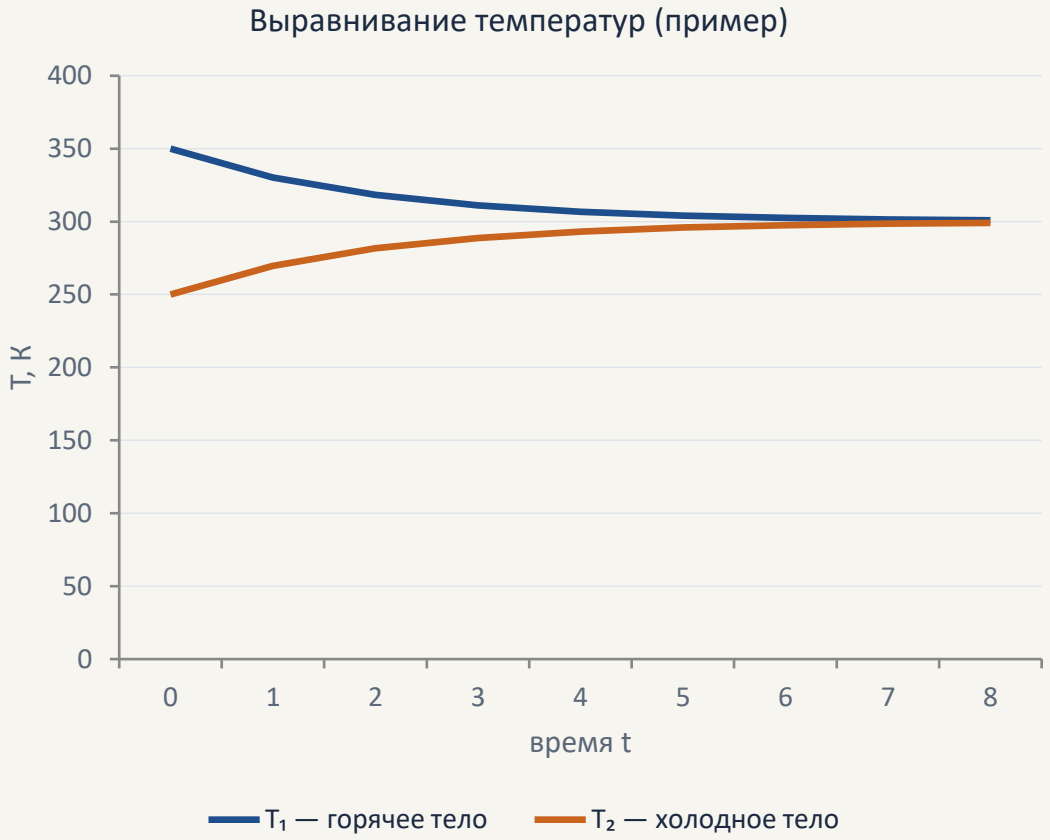


Пример: теплообмен двух тел

Два тела с температурами $T_1 > T_2$ образуют теплоизолированную систему. Тепло Q переходит от первого ко второму. Изменение энтропии системы:

$$\Delta S = \frac{Q}{T_2} - \frac{Q}{T_1} = Q\,\frac{T_1 - T_2}{T_1 T_2} > 0 \qquad (T_1 > T_2)$$

Энтропия растёт, пока температуры не выравняются. Обратный процесс дал бы $\Delta S < 0$ — это запрещено вторым законом.



Пример: энтропия идеального газа

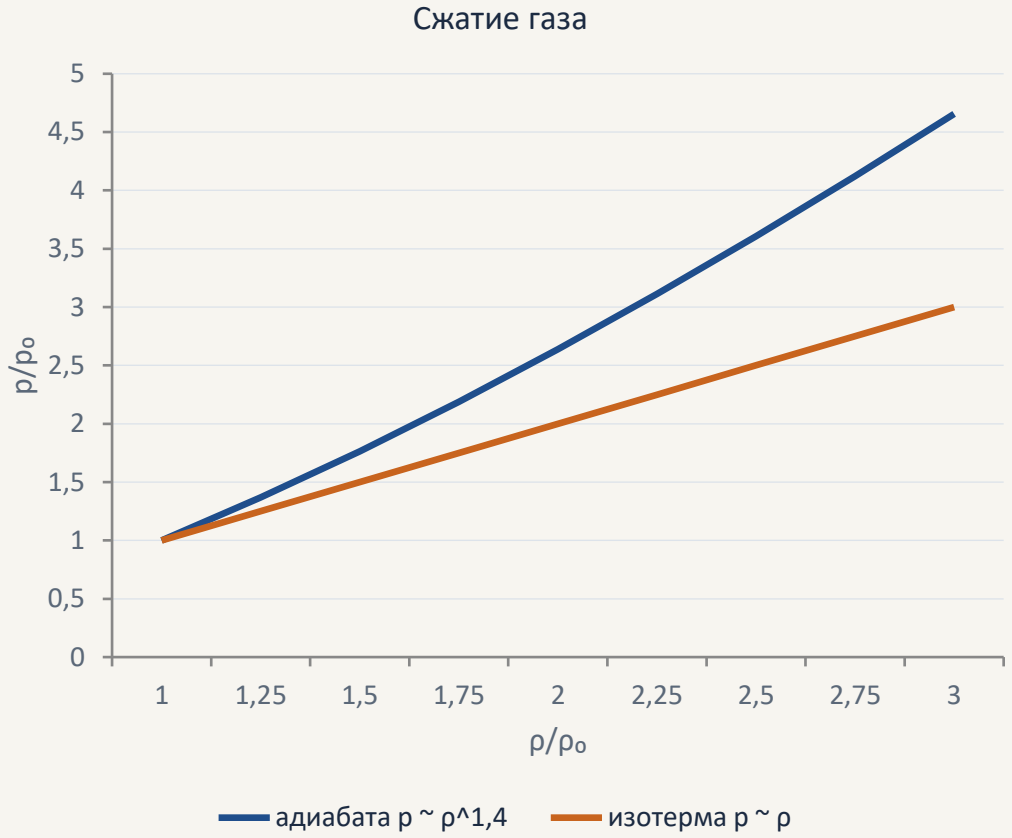
Для совершенного газа ($U = c_V T$, $p = \rho RT$) из $TdS = dU + p\,d(1/\rho)$ получаем:

$$S = c_V \ln T - R \ln \rho + \text{const}$$

При обратимом адиабатическом (изэнтропическом) процессе — **адиабата Пуассона**:

$$S = \text{const} \;\Rightarrow\; \frac{p}{\rho^\gamma} = \text{const}, \qquad \gamma = \frac{c_V + R}{c_V}$$

Для воздуха $\gamma \approx 1{,}4$: при адиабатическом сжатии давление растёт быстрее, чем при изотермическом.



Цикл Карно и предельный КПД

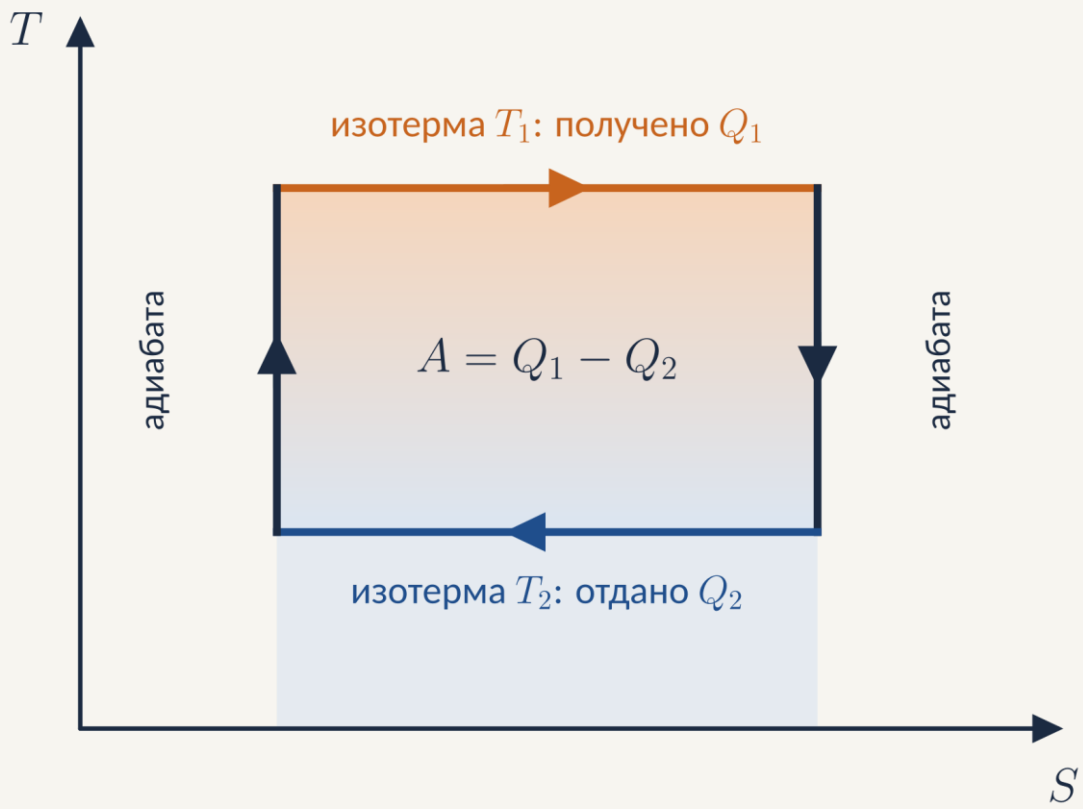
Цикл Карно состоит из двух изотерм и двух адиабат. На диаграмме T–S это прямоугольник; его площадь — полезная работа.

КПД обратимого цикла Карно:

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Никакая тепловая машина, работающая между T_1 и T_2, не может иметь КПД больше, чем у цикла Карно.

Пример: $T_1 = 600$ К, $T_2 = 300$ К — $\eta \le 50$ %.



Цикл Карно на диаграмме T–S

Первый и второй законы: сравнение

	Первый закон	Второй закон
Утверждение	невозможен вечный двигатель I рода	тепло не переходит само от холодного к горячему
Функция состояния	полная энергия $\mathcal{E}$ (внутренняя U)	энтропия S и абсолютная температура T
Формула	$d\mathcal{E} = \delta A^{(e)} + \delta Q^{(e)} + \delta Q^{(**)}$	$T\,dS = \delta Q^{(e)} + \delta Q',\ \ \delta Q' \geq 0$
Характер	закон сохранения (равенство)	закон направленности (неравенство)
Адиабатический процесс	dU = работа сил	обратимый: S = const; необратимый: dS > 0

Заключение и вопросы для самоконтроля

Выводы

1. Второй закон определяет направленность процессов: тепло само переходит только от горячего тела к холодному.
2. Существуют функции состояния — энтропия S и абсолютная температура T: $T\,dS = \delta Q^{(e)} + \delta Q'$, $\delta Q' \geq 0$.
3. Для обратимых процессов $dS = \delta Q^{(e)}/T$; энтропия определена с точностью до постоянной.
4. Обратимые адиабатические процессы изэнтропичны: $S = \text{const}$.
5. В необратимых адиабатических процессах энтропия только растёт: $dS > 0$.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте второй закон термодинамики.
2. Что такое некомпенсированное тепло? Каков его знак?
3. Чем обратимые процессы отличаются от необратимых? Приведите примеры.
4. Как вычисляется энтропия в обратимом процессе?
5. Какие процессы называются адиабатическими и изэнтропическими?
6. Почему энтропия теплоизолированной системы не убывает?
7. Покажите, что при теплообмене двух тел энтропия растёт.
8. Чему равен КПД цикла Карно?