

ЭНТРОПИЯ

и жизнь

А.В. Гасников

Университет Иннополис • 15 мая 2025 г.

*«Лишь в открытых системах происходят события,
не кончается время и возможны открытия». — М.В. Волькенштейн*



О чём пойдёт речь

1

Открытие энтропии

Карно, идеальный газ, цикл, теорема Клаузиуса

2

Энтропия главнее энергии

Шредингер, отопление по Эмдену, клетка как открытая система

3

Особое положение Земли

энергетический баланс, фотонная энтропия, «зона жизни»

4

Открытые системы: самоорганизация и деградация

далеко от равновесия рождается порядок

5

Примеры диссипативных структур

Лоренц, ячейки Бенара, реакция Белоусова–Жаботинского

Раздел 1

Открытие энтропии

Карно · Клапейрон · Клаузиус — путь от паровой машины к понятию состояния

Зачем людям понадобились тепловые машины?



- Начало XIX века: паровые машины двигают шахты, заводы, корабли.
- Главный вопрос инженера: «можно ли получить ещё больше работы из той же порции тепла?»
- В 1824 году молодой французский военный инженер Сад Карно издал небольшую книгу (45 страниц): «Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развить эту силу».
- Эта книга — точка отсчёта термодинамики. Из неё через 40 лет родится энтропия.

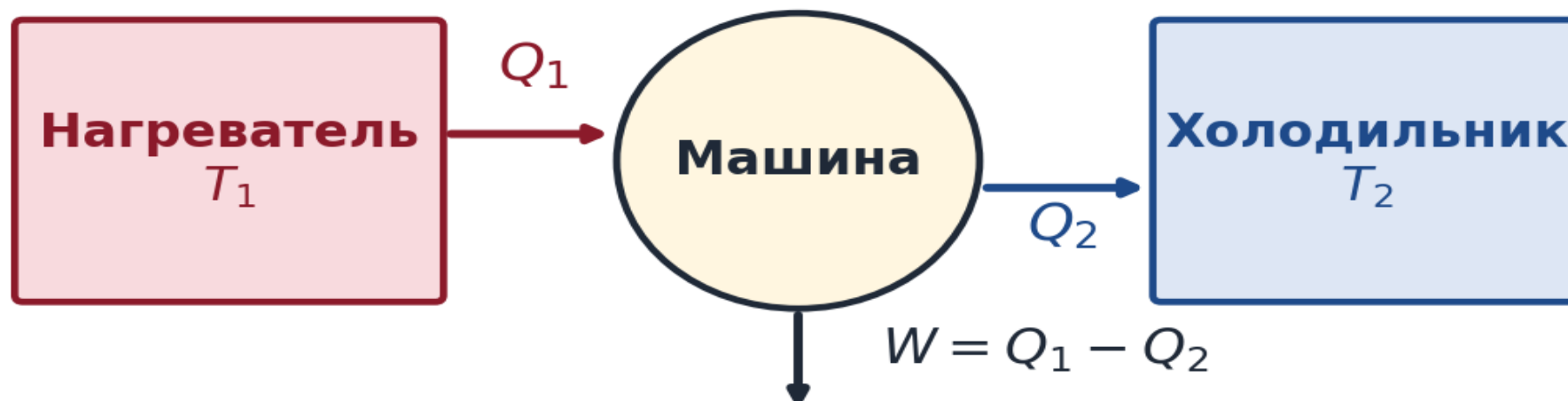
Сад Карно

(1796 – 1832)

*«Без огня природа стала бы немой;
без огня люди давно зябли бы во
тьме и нищете».*

Идея тепловой машины

Тепло перетекает от горячего к холодному — попутно делая работу



Принцип Карно: $\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2}$

Принцип Карно

- Ни одна тепловая машина, получающая Q_1 при T_1 и отдающая Q_2 при T_2 , не может произвести больше работы, чем обратимая.
- У всех обратимых машин КПД одинаковый — он зависит ТОЛЬКО от температур.
- Это — глубокая универсальная истина: природа кладёт жёсткий предел тому, сколько работы можно «вытащить» из теплоты.

$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2}$$

Q_1 — тепло от нагревателя (T_1 — его температура)

Q_2 — тепло, отданное холодильнику (T_2 — его температура)

$W = Q_1 - Q_2$ — полезная работа

К XX веку Карно «полностью отверг» теорию Больцмана — и тем не менее именно его принцип лёг в основу определения энтропии.

Инструмент №1: уравнение состояния идеального газа

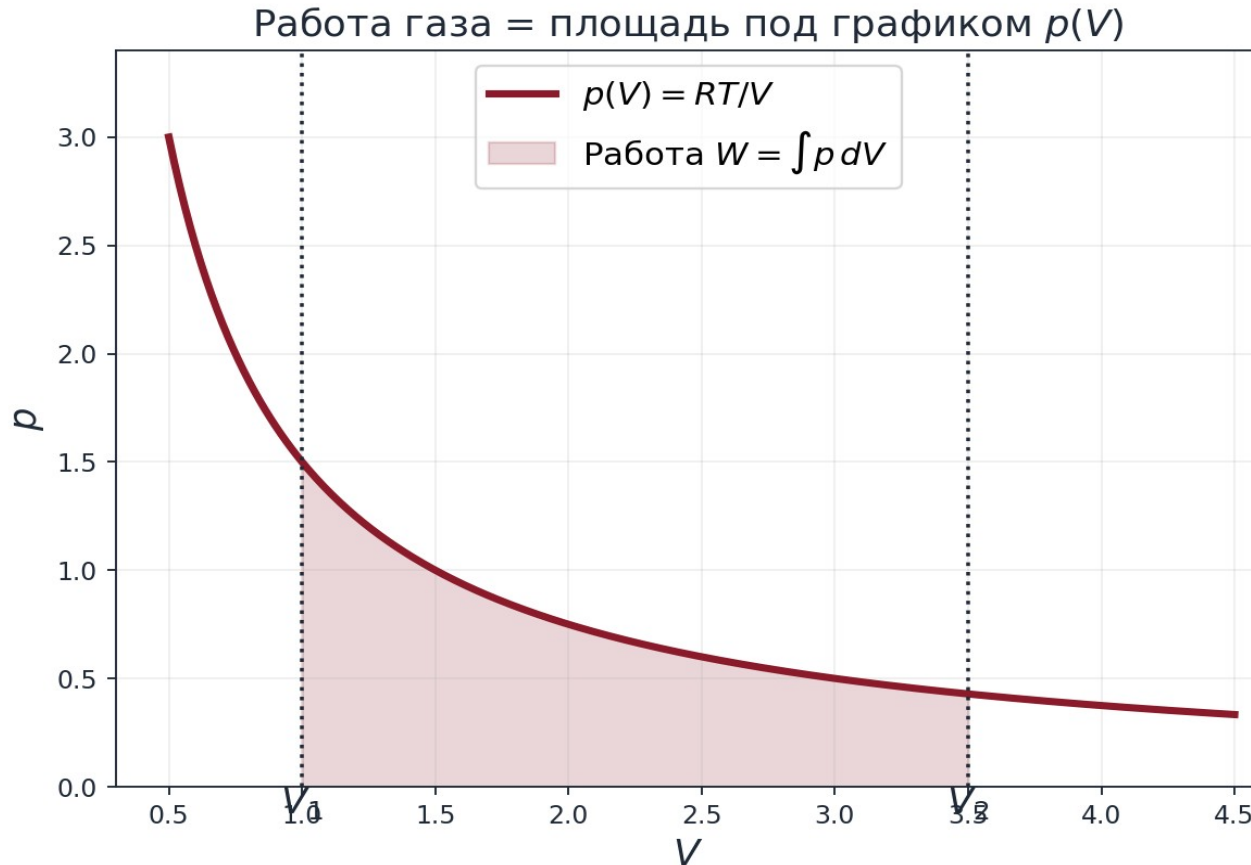


- Для одного моля идеального газа выполняется уравнение Менделеева–Клапейрона:
- Связь трёх величин: давление p , объём V , температура T .
- R — универсальная газовая постоянная ($R \approx 8.31$ Дж/(моль·К)).
- Это уравнение позволяет переводить «вход» теплоты в «выход» работы.

$$pV = RT$$

- увеличиваем T при постоянном V — давление растёт
- увеличиваем V при постоянном T — давление падает

Изотермический процесс: газ работает за счёт нагревателя



- Изотермическое расширение: $T = T_1$ постоянна, газ соприкасается с нагревателем.
- Газ совершает работу W_1 , которая в точности равна полученной теплоте Q_1 .
- Работа = площадь под кривой $p(V)$ — это и есть смысл интеграла.

$$W_1 = \int_{V_1}^{V_2} p dV = Q_1$$

Подставим p из $pV = RT$ и проинтегрируем

- Берём $p = RT/V$ и считаем работу газа от V_1 до V_2 :
- $W_1 = \int p \, dV = RT_1 \cdot \ln(V_2/V_1)$ — натуральный логарифм возникает естественно.
- Та же величина — это полученная теплота $Q_1 = W_1$.
- Делим Q_1 на T_1 — и получаем изменение энтропии на изотерме.

$$\Delta S = \frac{Q_1}{T_1} = R \ln \frac{V_2}{V_1}$$

При $V_2 > V_1$ энтропия газа растёт — газ занимает больше «возможностей».

Адиабатический процесс: тепло не входит и не выходит

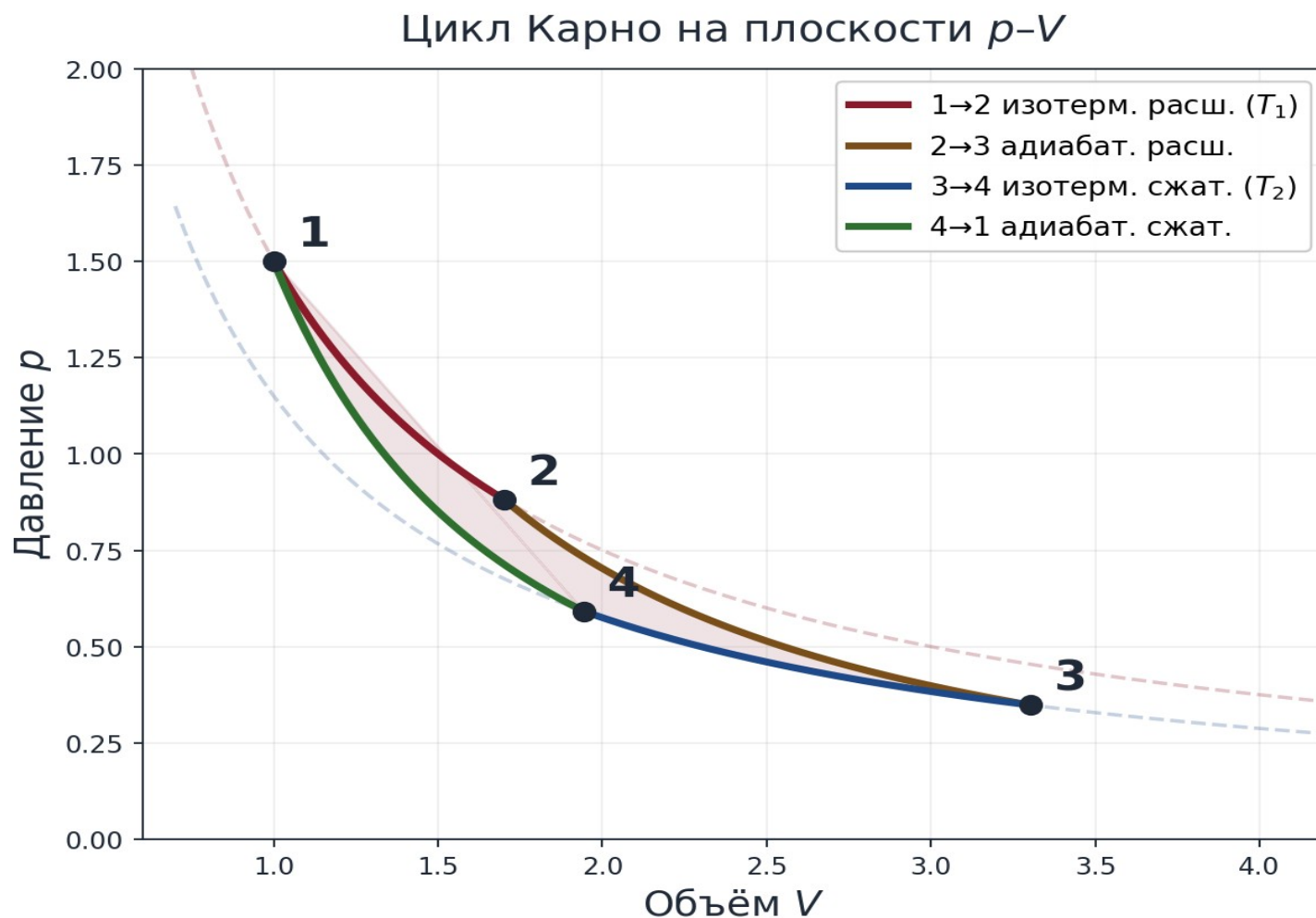
- Газ изолирован от нагревателя и холодильника — расширяясь, он остывает за счёт собственной внутренней энергии.
- Из закона сохранения энергии и уравнения состояния выводится связь между объёмами в адиабатических участках цикла:
- $\gamma = c_p / c_v$ — показатель адиабаты (для воздуха $\gamma \approx 1.4$).

$$T_1 V_2^{\gamma-1} = T_2 V_3^{\gamma-1}, \quad T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_4^{\gamma-1}$$

Поделив одно равенство на другое, получаем $V_2/V_1 = V_3/V_4$ — важный геометрический факт цикла.

Источник: Трубецков и др. (2002), гл. 1.3, формулы (1.10)–(1.12).

Цикл Карно целиком: четыре участка



- 1→2: изотермическое расширение при T_1 — газ берёт Q_1
- 2→3: адиабатическое расширение — газ охлаждается до T_2
- 3→4: изотермическое сжатие при T_2 — газ отдаёт Q_2
- 4→1: адиабатическое сжатие — газ нагревается до T_1

Площадь внутри цикла = полезная работа за один оборот.

Открытие Клаузиуса (1865)

- Сложим изменения энтропии вдоль всех четырёх участков цикла:
- на изотермах: $\Delta S = +Q_1/T_1$ и $\Delta S = -Q_2/T_2$
- на адиабатах: $\Delta S = 0$ (нет теплообмена)
- По принципу Карно: $Q_1/T_1 = Q_2/T_2$ — изменения в точности компенсируются.

$$\oint \frac{dQ}{T} = 0$$

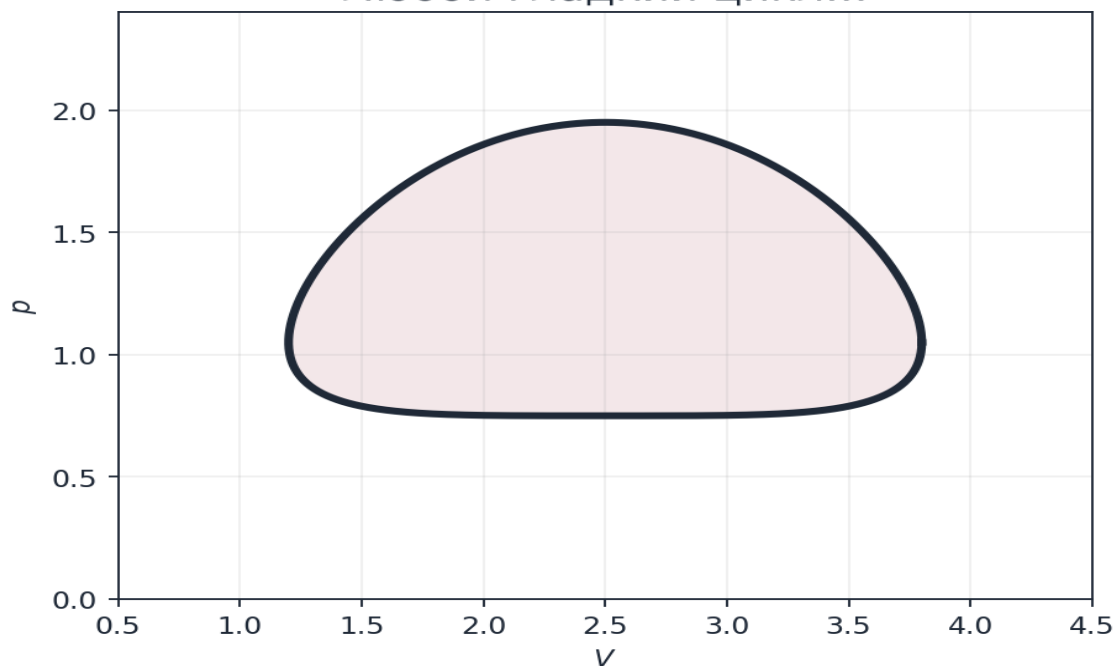
На полном обратимом цикле Карно энтропия возвращается к исходному значению.

А если цикл не Карно?

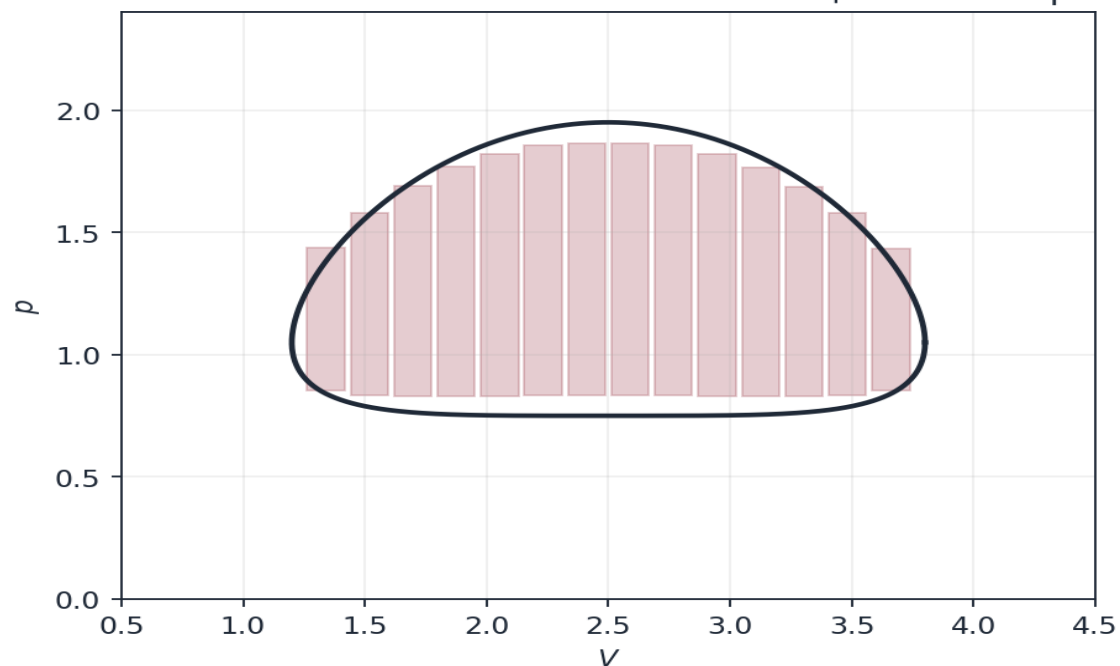
Любой гладкий обратимый цикл «вымачивается» маленькими циклами Карно

Обобщение Клаузиуса: $\oint dQ/T = 0$ для любого обратимого цикла

Любой гладкий цикл...



...можно «вымостить» маленькими циклами Карно



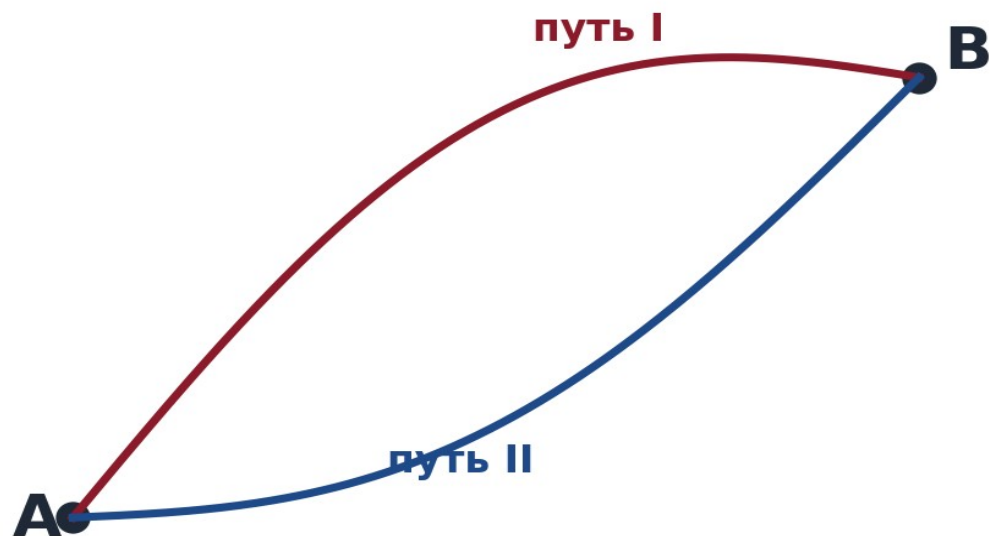
Соседние участки маленьких циклов проходятся в обоих направлениях и взаимно гасятся — остаётся только внешний контур. На каждом маленьком цикле $\oint dQ/T = 0$, значит и на большом тоже.

Идея восходит к Клаузиусу и Кельвину; см. также: Трубецков и др. (2002), гл. 1.

Главный вывод: энтропия — функция состояния



Если $\oint dQ/T = 0$ для любого замкнутого цикла, то интеграл dQ/T между двумя состояниями не зависит от пути:



$$S(B) - S(A) = \int_A^B \frac{dQ}{T}$$

Поэтому можно ввести функцию состояния S — энтропию — определённую с точностью до постоянной.

$$S(B) - S(A) = \int_A^B \frac{dQ}{T} \text{ — не зависит от пути!}$$

$$dS = \frac{dQ}{T}$$

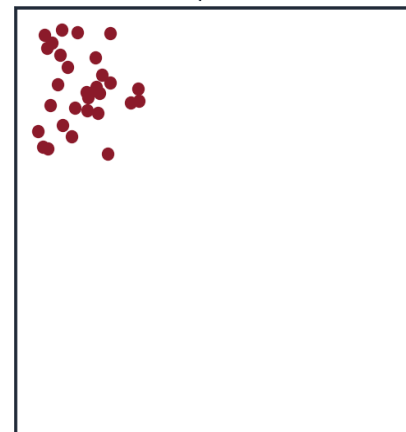
Что означает энтропия физически? Больцман.

- Клаузиус ввёл S «макроскопически» — через тепло и температуру.
- Людвиг Больцман увидел за этим микроскопический смысл: S — это логарифм числа способов W , которыми атомы могут «уложиться» в данном макросостоянии.
- Чем больше способов реализовать состояние — тем оно «вероятнее», тем выше его энтропия.
- Знаменитая H-теорема Больцмана: в замкнутой системе S не убывает и достигает максимума в равновесии.

$$S = k \ln W$$

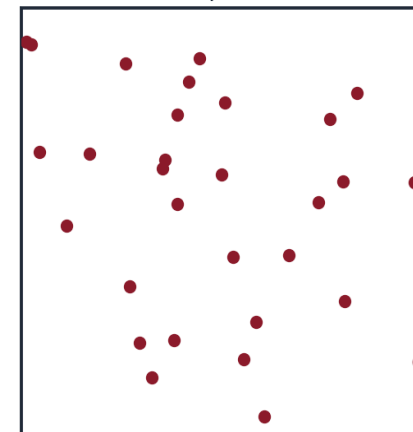
Больцман: $S = k \ln W$ — энтропия = логарифм числа способов

Упорядоченное
(мало микросостояний)



S мало

Хаотичное
(много микросостояний)



S велико

Раздел 2

Энтропия главнее энергии

Шредингер · Эмден · клетка как открытая система

Шредингер: «Что такое жизнь?» (1944)

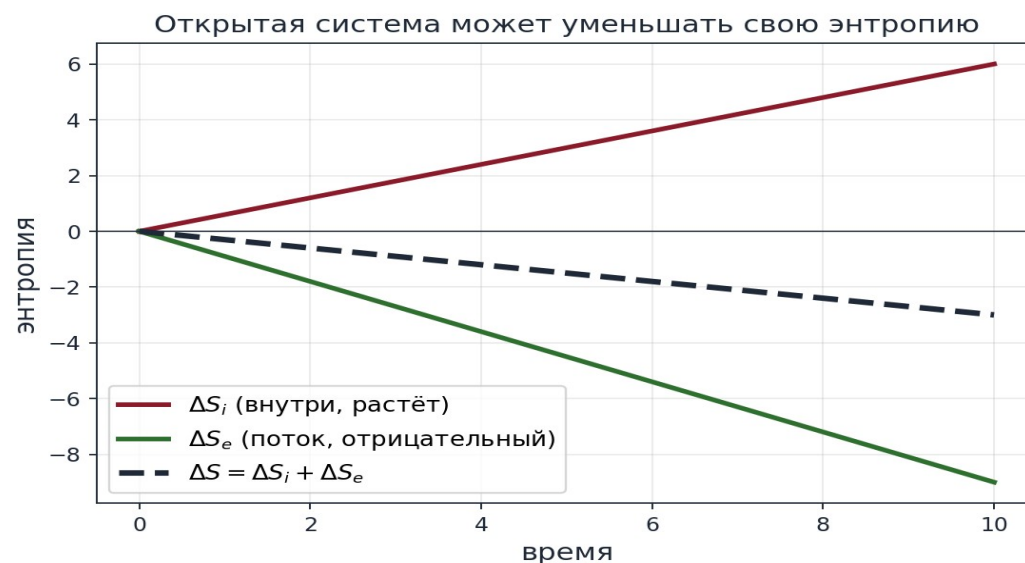
«...то драгоценное, что содержится в нашей пище и предохраняет нас от смерти, короче говоря, всё, что происходит в природе, означает увеличение энтропии в той части мира, где это происходит. Так и живой организм непрерывно увеличивает свою энтропию — или, говоря иначе, производит положительную энтропию и таким образом приближается к опасному состоянию максимальной энтропии, которое представляет собой смерть. Он может избежать этого состояния только путём постоянного извлечения из окружающей среды отрицательной энтропии...»

— Эрвин Шредингер

Чем же мы «питаемся» на самом деле?

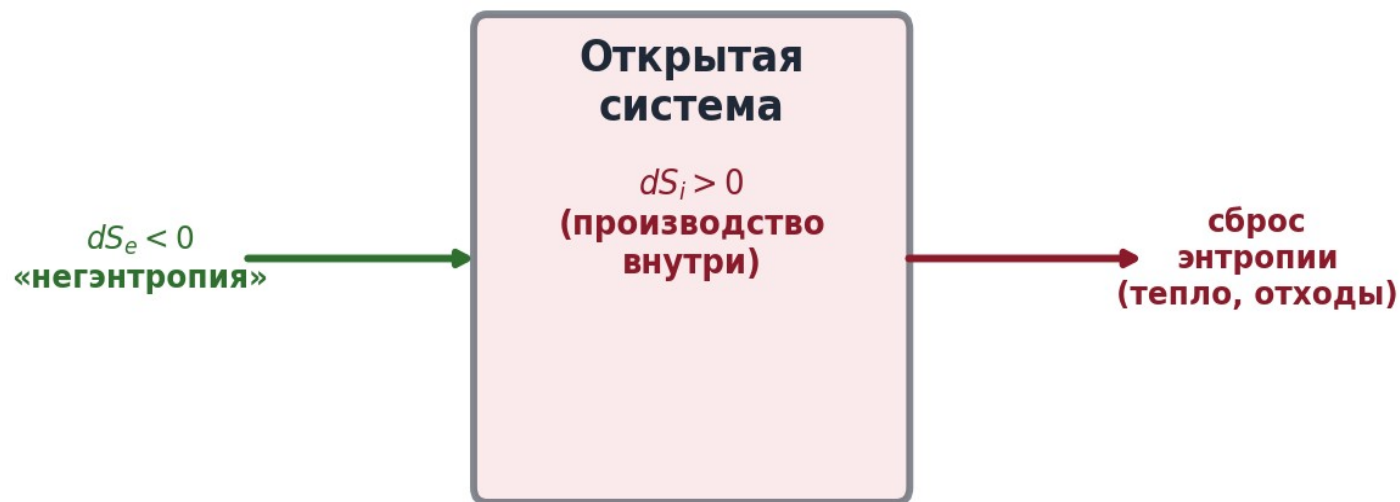
- Шредингер ставит вопрос: что в пище главное — энергия или что-то ещё?
- Ответ парадоксален: главное — НЕ энергия! Энергию мы излучаем обратно почти в той же мере, что получаем.
- Главное — низкая энтропия пищи: упорядоченные молекулы (белки, сахара).
- Мы их «разбираем» и возвращаем в среду в хаотичном виде. Разница в энтропии и поддерживает в нас порядок.

«организм питается отрицательной энтропией»



Источник: Трубецков и др. (2002), гл. 1.3; Шредингер Э. «Что такое жизнь?».

Баланс энтропии для открытой системы



Стационарное состояние: $dS = dS_i + dS_e = 0$

$$dS = dS_i + dS_e$$

$$dS = 0 \implies dS_e = -dS_i < 0$$

- dS_i — энтропия, рождающаяся ВНУТРИ системы (всегда ≥ 0).
- dS_e — приток/отток энтропии через границу (любого знака).
- Полное изменение: $dS = dS_i + dS_e$.
- Стационарное живое: $dS = 0$, значит $dS_e = -dS_i < 0$ — система ест отрицательную энтропию.

Зачем мы топим зимой? Заметка Р. Эмдена (Nature, 1938)



«На вопрос, почему мы топим зимой, неспециалист ответит: чтобы сделать комнату теплее; знаток термодинамики выразится, возможно, таким образом: чтобы подвести недостающую энергию. В таком случае правым окажется профан, а не учёный».

— Роберт Эмден

Эту заметку Зоммерфельд и Кубо специально включили в свою монографию — настолько неожиданно её содержание.

Энергия воздуха в комнате не зависит от температуры!

- Давление внутри комнаты всегда равно атмосферному (двери, щели, поры).
- Энергия единицы массы воздуха: $E = c_V \cdot T$.
- Энергия единицы объёма: $E_1 = c_V \cdot \rho \cdot T$.
- По уравнению состояния $p/\rho = R \cdot T$, поэтому $\rho \cdot T = p / R$.

$$E_1 = c_V \rho T = c_V \frac{p}{R}$$

Подставляя:

E_1 зависит только от давления p , которое равно атмосферному!

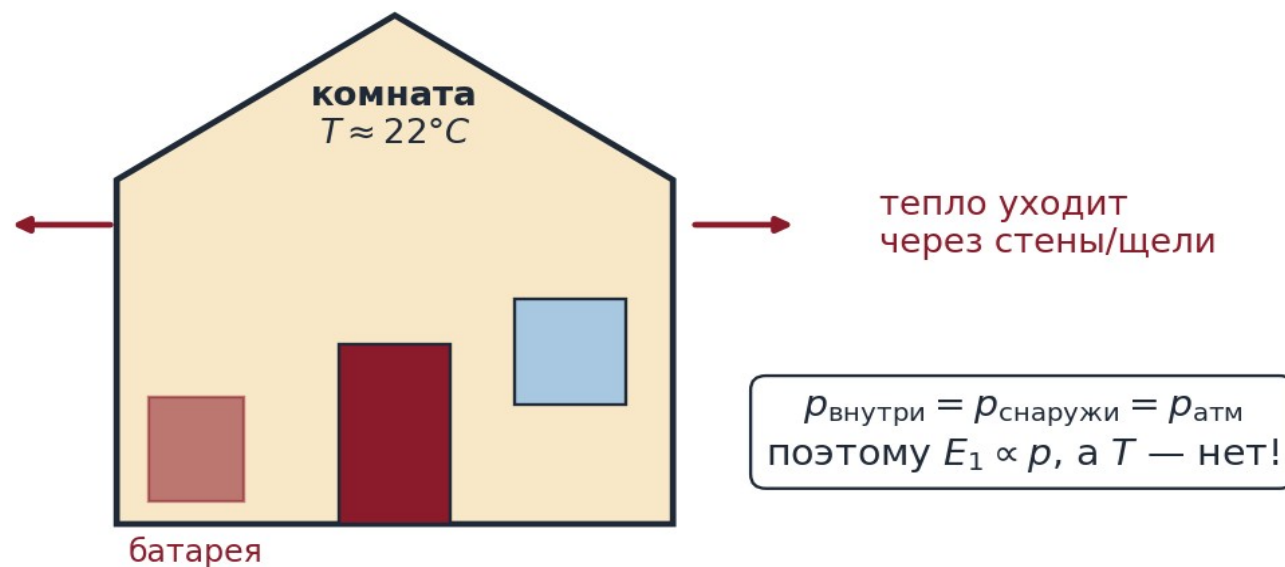
При атмосферном давлении: $E_1 \approx 2.5 \cdot 10^5$ Дж/м³ — постоянно, как ни нагревай.

$$E_1 \approx 2,5 \cdot 10^5 \text{ Дж/м}^3$$

Источник: Трубецков и др. (2002), гл. 1.3, после формулы (1.22).

Куда же уходит подводимое тепло?

улица
 $T \approx -10^\circ\text{C}$



- Всё подведённое тепло уходит через поры и стены наружу.
- Топим мы не для накопления энергии, а для поддержания температурного режима.
- Не топить = не поддерживать «упорядоченность» жилого пространства.
- Полная аналогия с живым организмом!

Аналогия: дом ↔ организм

Отапливаемая комната

- тепло от батарей (вход энергии)
- потери через стены, щели, поры (выход)
- стационарное состояние $T \approx 22^\circ\text{C}$
- энергия внутри не растёт, но порядок поддерживается

Живой организм

- приём пищи (вход низкоэнтропийной материи)
- выделение тепла и отходов (выход)
- стационарное состояние взрослого тела
- энтропия внутри удерживается на низком уровне

Источник: Трубецков и др. (2002), гл. 1.3.

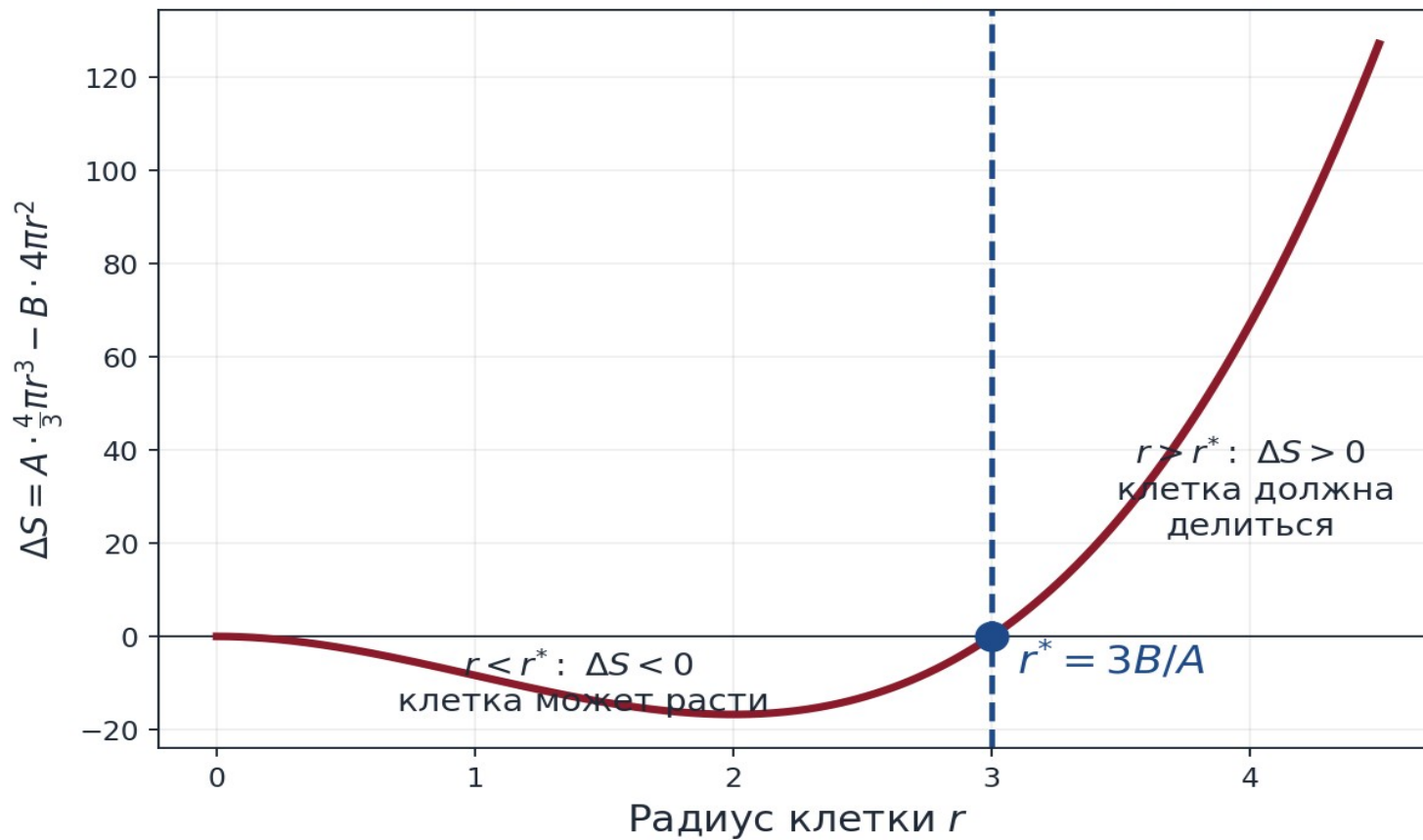
Клетка — простейшая открытая система

- Представим клетку как сферу радиуса r .
- Внутри клетки идут химические реакции — они производят энтропию ΔS_i .
- Производство пропорционально объёму клетки: $\Delta S_i = A \cdot (4/3)\pi r^3$
- Отток энтропии происходит через мембрану — пропорционален площади поверхности: $|\Delta S_e| = B \cdot 4\pi r^2$
- Тогда суммарное изменение:

$$\Delta S(r) = A \cdot \frac{4}{3}\pi r^3 - B \cdot 4\pi r^2$$

Чем больше клетка — тем хуже она отдаёт энтропию

Баланс энтропии клетки как функция её радиуса

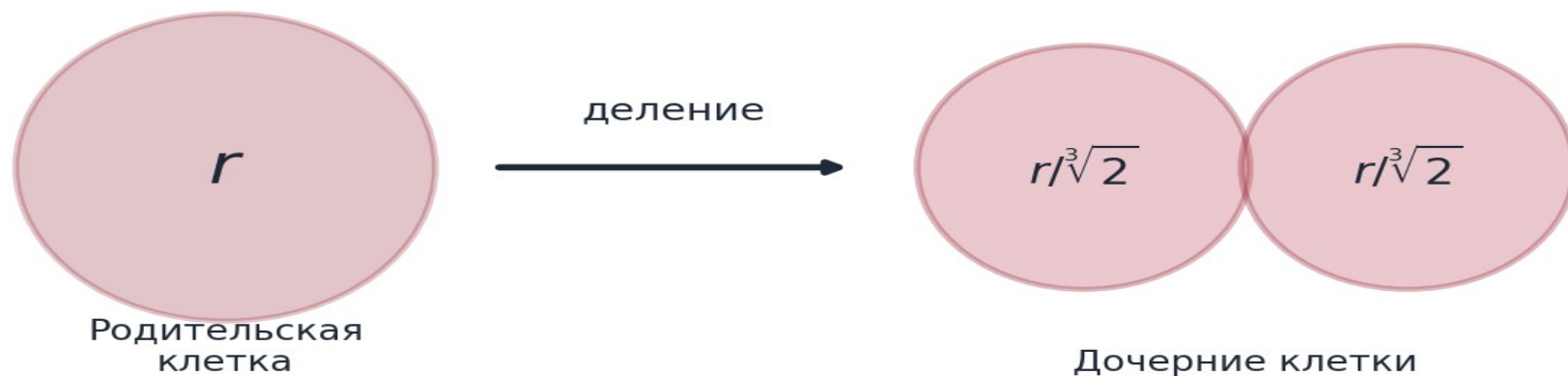


- При $r < r^* = 3B/A$ отток энтропии больше её производства $\rightarrow \Delta S < 0$, клетка может ещё расти.
- При $r = r^*$ — стационарное состояние, $\Delta S = 0$.
- При $r > r^*$ производство превышает отток $\rightarrow \Delta S > 0$, в клетке накапливается «избыточная энтропия». Это термодинамический «перегрев».

$$r^* = \frac{3B}{A}$$

Спасение от перегрева — деление!

Объём сохраняется, но суммарная площадь поверхности растёт



- Объём сохраняется: $r^3 = 2 \cdot (r/\sqrt[3]{2})^3$
- Поверхность РАСТЁТ: $2 \cdot 4\pi(r/\sqrt[3]{2})^2 > 4\pi r^2$
- После деления отток энтропии превышает производство ровно в $\sqrt[3]{2} \approx 1.26$ раза:

$$\frac{|\Delta S_e|}{|\Delta S_i|} = \sqrt[3]{2} \approx 1,26$$

Термодинамика объясняет, ПОЧЕМУ клетки должны делиться, хотя не говорит, как именно. Это — феноменологическая наука.

Источник: Трубецков и др. (2002), гл. 1.3, оценка после формулы (1.24).

Раздел 3

Особое положение Земли

энергетический баланс · фотонная энтропия · «зона жизни»

Земля — стационарная открытая система

Земля поглощает солнечный свет и излучает тепло обратно в космос. В стационаре энергии должно быть поровну:

$$\pi R^2 S_0 (1 - \alpha) = 4\pi R^2 \sigma T_{\text{rad}}^4$$

- $S_0 \approx 1361 \text{ Вт/м}^2$ — солнечная постоянная (поток на верхней границе атмосферы)
- $\alpha \approx 0.30$ — альбедо Земли (доля отражённого света)
- σ — постоянная Стефана-Больцмана
- $T_{\text{рад}}$ — эффективная радиационная температура Земли
- πR^2 — площадь, которую Земля «подставляет» Солнцу; $4\pi R^2$ — полная поверхность

Радиационная температура Земли

$$T_{\text{rad}} = \left[\frac{S_0(1 - \alpha)}{4\sigma} \right]^{1/4} \approx 255 \text{ K}$$

- -18°C — без парникового эффекта. С учётом парниковых газов средняя температура у поверхности $\approx +15^\circ\text{C}$.
- В этом диапазоне вода существует одновременно в трёх фазах — жидкой, твёрдой, газообразной.
- Жидкая вода — универсальный растворитель: именно в ней работают сложные биохимические сети.

Главное: Земля излучает энтропии в ≈ 23 раза больше, чем поглощает

И

- Энергия фотона $\epsilon = h\nu$. Энтропия фотона $\sim \epsilon/T$ (производство при температуре излучателя).
- Поглощаем горячие фотоны Солнца при $T_{\odot} \approx 5800$ K (низкая «удельная» энтропия).
- Излучаем инфракрасные фотоны при $T_{\oplus} \approx 255$ K (высокая «удельная» энтропия).
- Энергии поровну, но фотонов наружу уходит в $\approx 5800/255 \approx 23$ раза больше:

$$\frac{S_{\text{излуч.}}}{S_{\text{поглощ.}}} \sim \frac{T_{\odot}}{T_{\oplus}} \approx \frac{5800}{255} \approx 23$$

С учётом парникового эффекта эта разница только усиливается.

Аргумент популяризован Veritasium «Что же такое энтропия?» (видеолекция).

Один фотон туда — двадцать три обратно



На каждый поглощённый «горячий» фотон Земля выбрасывает в космос ≈ 23 «холодных» фотона. Эта разница — постоянный поток негэнтропии, которым питается ВСЯ биосфера, от бактерий до людей.

Почему именно Земля?



- Ближе к Солнцу: T выше, разница $T_{\odot}/T_{\text{планеты}}$ меньше — поток негэнтропии слабее. + вода кипит.
- Дальше от Солнца: вода замерзает, биохимия не идёт.
- Земля — в узком «окне»: и жидкая вода есть, и поток негэнтропии достаточно велик.
- Это и делает положение нашей планеты по-настоящему уникальным.

Раздел 4

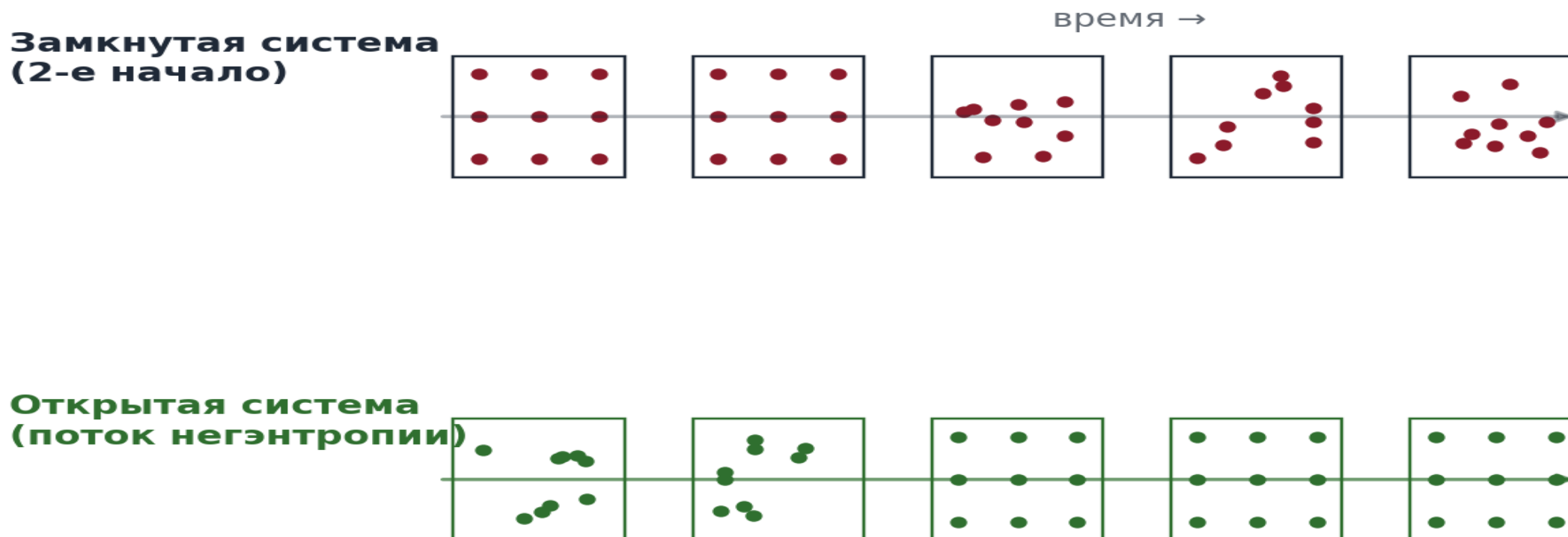
Открытые системы: самоорганизация и деградация

далеко от равновесия может рождаться порядок

Два типа эволюции открытых систем

- В замкнутых системах эволюция идёт к равновесию — к максимуму энтропии, к «тепловой смерти».
- В открытых системах возможны два сценария:
 - ① временная эволюция к (неравновесному) стационарному состоянию;
 - ② эволюция через ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ стационарных состояний — благодаря медленному изменению управляющих параметров.
- Второй сценарий — это путь эволюции в широком смысле: от Дарвина до развития науки.

Самоорганизация $\neq$ единственный путь



Эволюция может идти как к самоорганизации (рост упорядоченности), так и к деградации (рост хаоса). Чтобы отличить одно от другого, нужно объективное определение «нормы хаотичности». Это непростая задача.

Когда возможны диссипативные структуры (ДС)?



- Четыре необходимых условия (по Пригожину/Климонтовичу):
 - ① Открытость — нужен приток энергии, компенсирующий потери на диссипацию.
 - ② Макроскопичность — много элементов, способных к коллективному поведению.
 - ③ Нелинейность — уравнения движения должны быть нелинейными.
 - ④ Неустойчивость — управляющие параметры должны выводить систему из симметричного состояния через бифуркацию.

Хороший пример всех четырёх условий — конвекция: переход от теплопроводности к ячейкам Бенара.

Раздел 5

Примеры диссипативных структур

Лоренц · ячейки Бенара · реакция Белоусова–Жаботинского

Эдвард Лоренц, 1963: динамический хаос

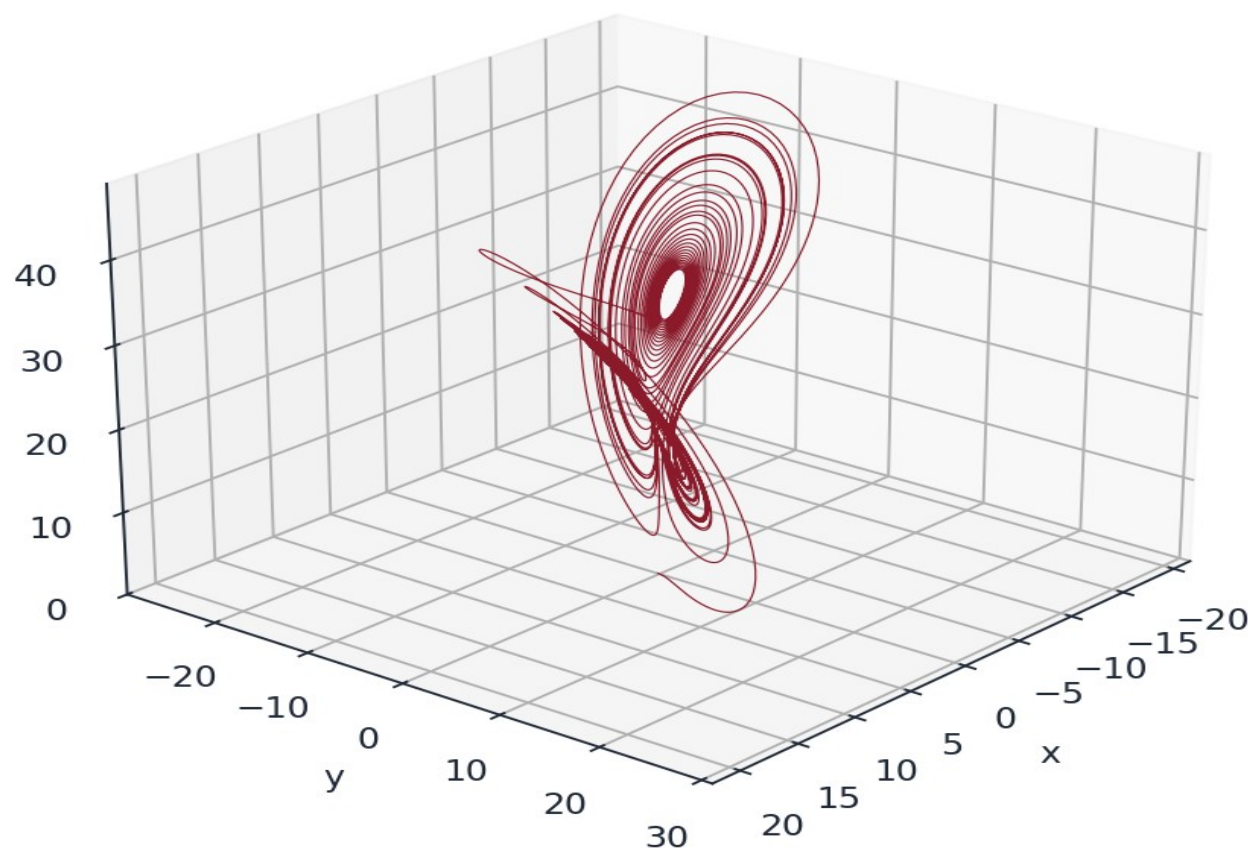
- Лоренц рассматривал конвекцию в атмосфере как открытую систему (источник энергии — нагрев солнцем).
- Свёл её к трём обыкновенным дифференциальным уравнениям для трёх переменных:

$$\dot{x} = \sigma(y - x), \quad \dot{y} = x(\rho - z) - y, \quad \dot{z} = xy - \beta z$$

- σ, ρ, β — параметры; x, y, z — фурье-компоненты скорости и температуры.
- Система детерминированная — никаких случайных слагаемых.
- Но численный счёт показал: траектории НЕ периодические и НЕ выходят на покой. Лоренц назвал это «детерминированным непериодическим течением».

Странный аттрактор Лоренца

Странный аттрактор Лоренца (1963)

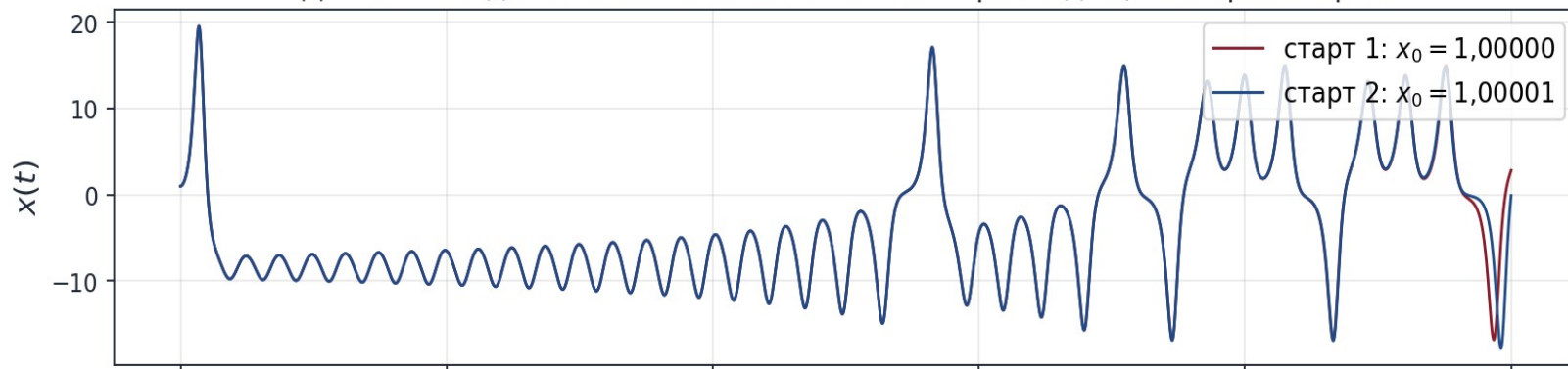


- Трассектория НИКОГДА не повторяется и НИКОГДА не пересекает сама себя.
- Но она «уложена» в красивую структуру с двумя «крыльями» — это и есть «диссипативная структура» в фазовом пространстве.
- Аналог: бесконечный, никогда не повторяющийся «танец» внутри ограниченной области.

Источник: Трубецков и др. (2002), гл. 1.5.

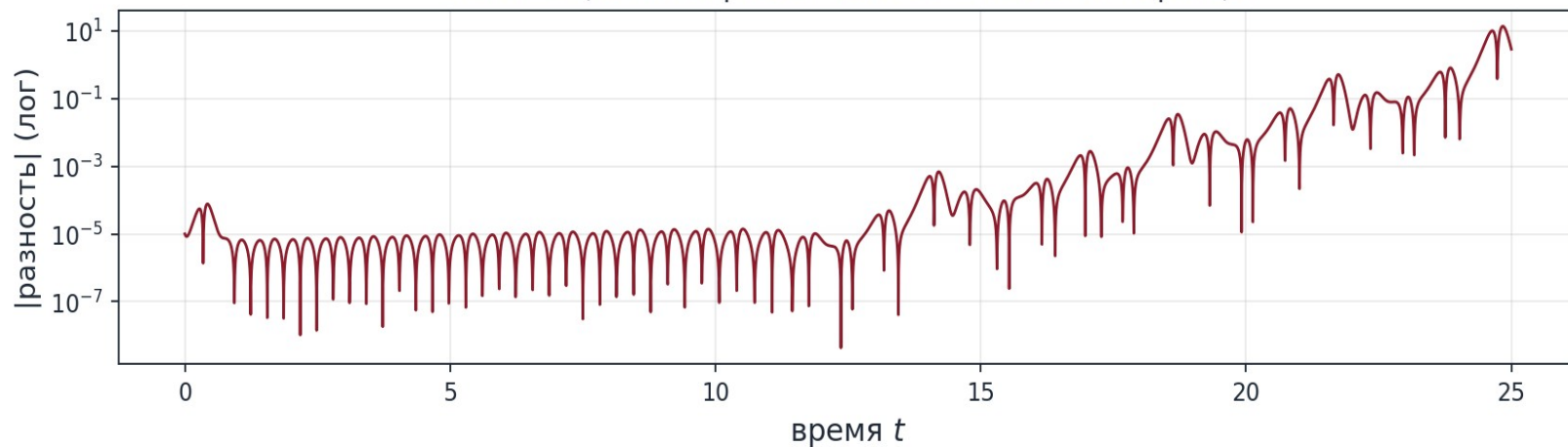
Эффект бабочки: чувствительность к начальным условиям

Две почти одинаковые начальные точки → расходящиеся траектории

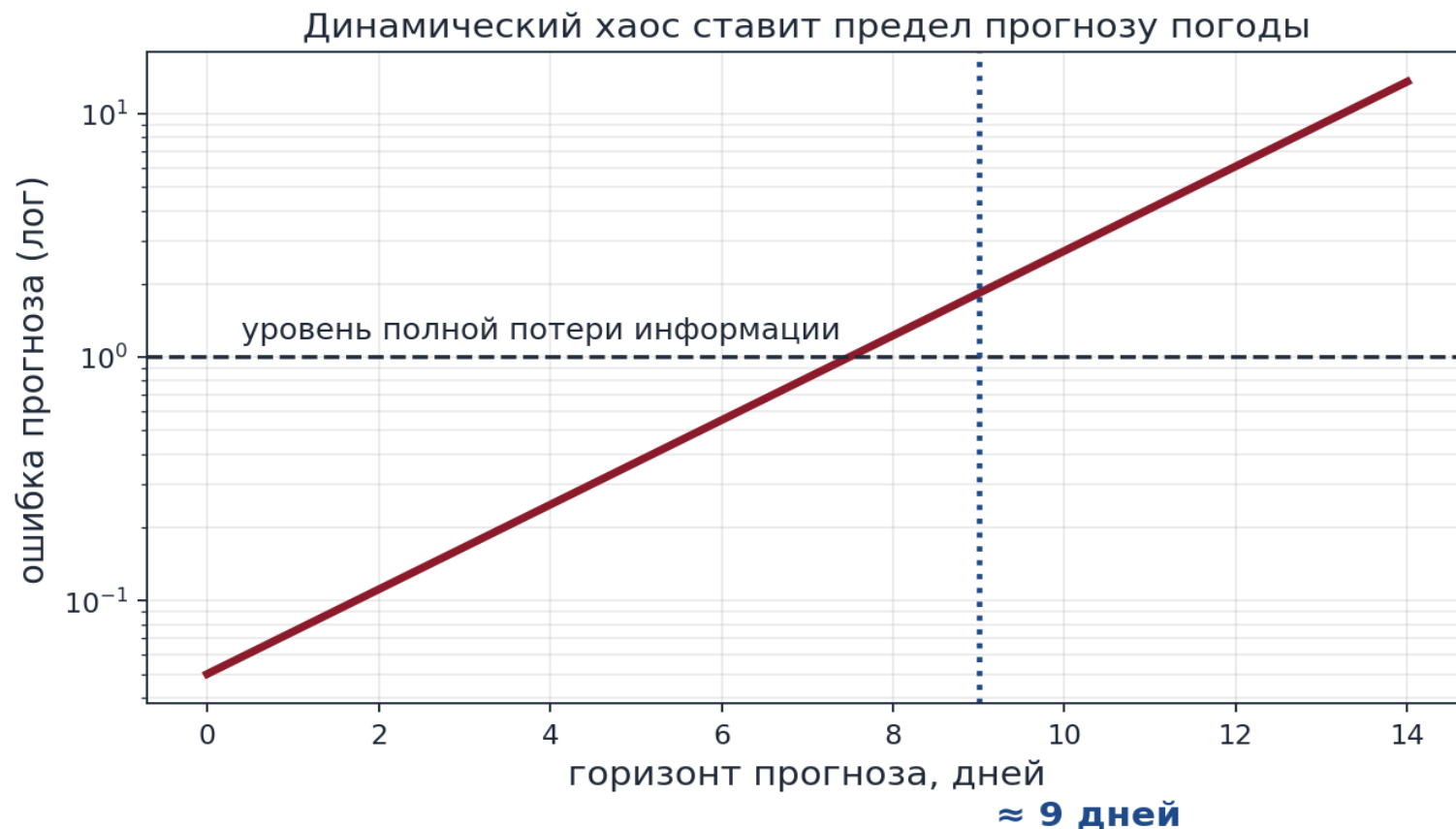


- Две почти ИДЕНТИЧНЫЕ начальные точки: $x_0 = 1.00000$ и $x_0 = 1.00001$.
- Через 10–15 единиц времени — траектории совершенно разные!
- Ошибка растёт ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНО (нижний график — лог. шкала).
- Точно измерить начальное состояние невозможно — отсюда фундаментальный предел прогноза.

Экспоненциальный разбег ошибки — «бабочка Лоренца»



Почему погоду нельзя надёжно предсказать на месяц вперёд



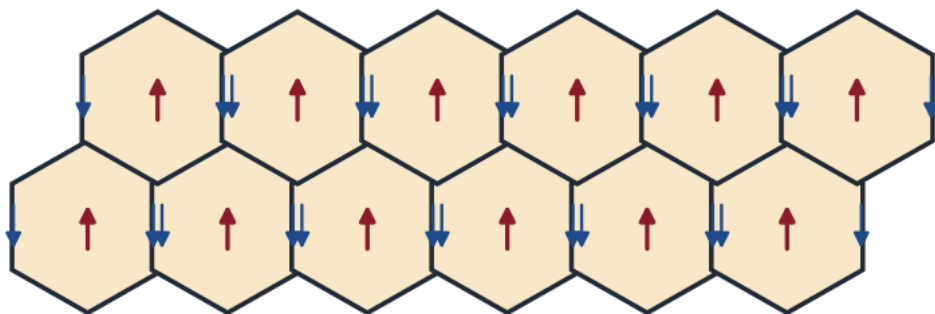
- Любая погрешность измерения температуры/давления удваивается за фиксированное время.
- При характерных параметрах атмосферы — порог наступает около 9 дней.
- После него прогноз неотличим от случайной угадки.
- Это — НЕ слабость техники, а свойство самой системы.

Источник: оценка по Lorenz (1963); Трубецков и др. (2002), гл. 1.5.

Ячейки Бенара: порядок из «хаоса» молекулярных столкновений

холодная поверхность

Ячейки Бенара: упорядоченная конвекция жидкости при $\Delta T > \Delta T_{кр}$



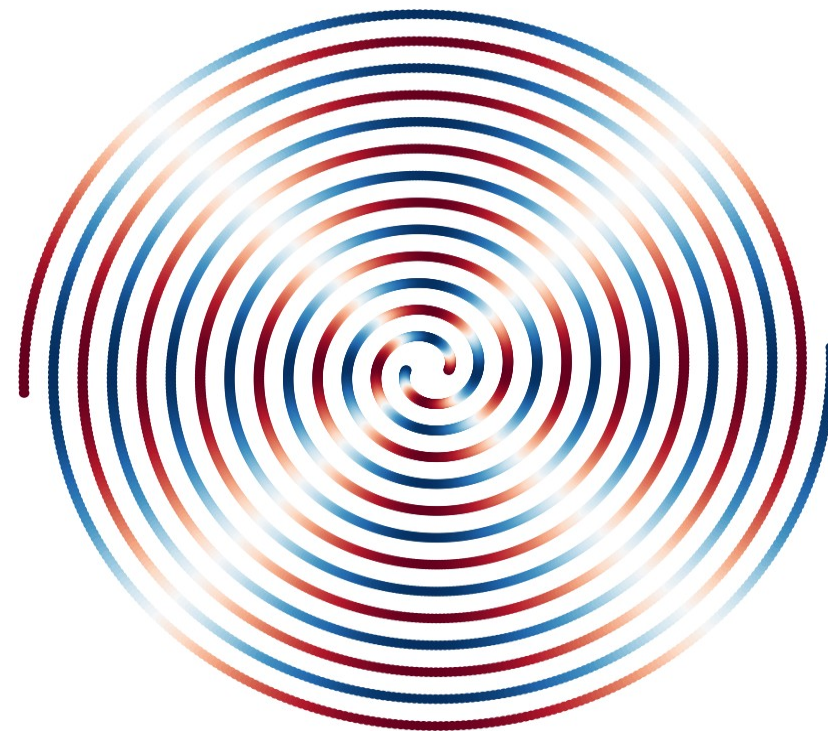
нагреватель

- Тонкий слой жидкости (масло, вода) нагревают снизу.
- При малой разнице температур тепло переносится молекулярной теплопроводностью — никакой структуры нет.
- При $\Delta T > \Delta T_{кр}$ возникает регулярная решётка шестиугольных ячеек: в центре жидкость поднимается, по краям опускается.
- Это — ПРОСТРАНСТВЕННАЯ диссипативная структура.

Реакция Белоусова-Жаботинского

- 1950: Б.П. Белоусов открыл химическую реакцию, в которой раствор регулярно меняет цвет: бесцветный → жёлтый → бесцветный → ...
- Период колебаний: 10–100 секунд — можно увидеть невооружённым глазом!
- Статью Белоусова химические журналы дважды ОТКЛОНЯЛИ — «такого не может быть».
- Позже А.М. Жаботинский показал: в тонком слое возникают концентрические и спиральные волны.
- Это — ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ диссипативная структура.

Спиральные волны
в реакции Белоусова-Жаботинского



Что общего у Лоренца, Бенара и Белоусова-Жаботинского?



Аттрактор Лоренца

хаос в трёх ОДУ;
диссипативная структура
в фазовом пространстве

Ячейки Бенара

регулярная решётка
шестиугольников;
структура в пространстве

Реакция БЖ

автоволны и спирали;
структура одновременно
в пространстве и времени

Все три — открытые неравновесные системы; во всех трёх нелинейность + диссипация рождают порядок.

Источник: Трубецков и др. (2002), главы 1.5, 6.4, 6.6.

Раздел 6

Заключение

что нужно запомнить

Главные идеи лекции

1

Энтропия — функция состояния

Из цикла Карно и теоремы Клаузиуса: $dS = dQ/T$ определено корректно ($\oint dQ/T = 0$).

2

Жизнь питается негэнтропией

Главное в пище — не энергия (Эмден: «зачем мы топим?»), а её низкая энтропия (Шредингер).

3

Земля — стационарная открытая система

На 1 поглощённый фотон Солнца — ≈ 23 излучённых ИК-фотона; этот поток поддерживает всю биосферу.

4

В открытых системах возможен порядок из хаоса

Аттрактор Лоренца, ячейки Бенара, реакция БЖ — диссипативные структуры.

Источники

Основная литература:

- Трубецков Д.И., Мчедлова Е.С., Красичков Л.В. Введение в теорию самоорганизации открытых систем. — М.: Физматлит, 2002. — 200 с. ISBN 5-94052-052-9. Серия «Современная теория колебаний и волн».
 - Используется главным образом глава 1: «Физика открытых систем». Также гл. 6.4 (реакция Белоусова–Жаботинского) и 6.6 (ячейки Бенара).

Видеолекция:

- Veritasium. «Что же такое энтропия?» — Видеолекция. Доступна по ссылке: vk.com/video-62468751_456240769

Дополнительно:

- Шредингер Э. Что такое жизнь? С точки зрения физика. — М.: Атомиздат, 1972.
- Lorenz E.N. Deterministic Non-Periodic Flow // J. Atmos. Sci. 1963. V. 20. P. 130–141.
- Климонтович Ю.Л. Введение в физику открытых систем // Соросовский образовательный журнал. 1996. № 8.



**Спасибо
за внимание!**

*Энтропия — это не «беспорядок».
Это мера числа возможностей. И это главное.*