

ТЕРМОДИНАМИКА ПРОГРЕССА: СВЯЗЬ ПРИНЦИПА $dC/dt = E/\hbar$ С ПРОИЗВОДСТВОМ ЭНТРОПИИ И ПОТОКОМ СВОБОДНОЙ ЭНЕРГИИ

Аннотация В рамках исследовательской программы «Теория прогресса как квантовая фаза» устанавливается прямая связь между фундаментальным принципом $dC/dt = E/\hbar$ и законами неравновесной термодинамики. Показано, что скорость изменения сложности dC/dt пропорциональна мощности производства энтропии $T(dS/dt)$ в открытой диссипативной системе и связана с потоком свободной энергии Гельмгольца. Внутренняя энергия сложности U интерпретируется как часть свободной энергии, запасённая в форме структурной информации. Теория количественно объясняет, как производство энтропии, далёкое от равновесия, не только не препятствует, но и является необходимым условием для роста сложности. Получен новый термодинамический критерий прогресса: $\Xi_{\text{thermo}} = (dC/dt)_{\text{pot}} / (T \sigma) \geq 1$, где σ — скорость производства энтропии.

Ключевые слова: неравновесная термодинамика, производство энтропии, свободная энергия, принцип прогресса, энергия сложности, открытые системы.

1. Введение: Парадокс прогресса и второго начала

Второе начало термодинамики утверждает, что полная энтропия изолированной системы не убывает: $dS/dt \geq 0$. Принцип прогресса $dC/dt = E/\hbar$ [1-7] постулирует существование величины «сложность» C , которая может возрастать в эволюционирующих системах. Возникает кажущийся парадокс: как рост сложности ($dC/dt > 0$) согласуется с ростом энтропии ($dS/dt > 0$)?

Разрешение лежит в области **термодинамики открытых систем**, обменивающихся энергией и веществом с окружением. В таких системах производство энтропии σ внутри системы положительно, но система может экспортировать энтропию в окружающую среду, поддерживая внутренний порядок. Данная работа показывает, что **dC/dt является количественной мерой способности системы организовывать поток энергии для создания внутреннего порядка на фоне общего производства энтропии.**

2. Теоретический синтез: Прогресс, энтропия и свободная энергия

2.1. Базовые определения

Для системы с полной энергией E , температурой T и энтропией S :

$$(1) \quad dC/dt = E / \hbar \text{ [Базовый принцип]}$$

$$(2) \quad E = F + T S \text{ [Связь полной и свободной энергии Гельмгольца]}$$

где F — свободная энергия Гельмгольца. Подставляя (2) в (1):

$$(3) \quad dC/dt = (F + T S) / \hbar$$

Это фундаментальное разделение: **полный прогресс системы складывается из вклада свободной энергии (F/\hbar) и теплового (энтропийного) вклада ($T S / \hbar$).**

2.2. Динамика для открытой системы

Для открытой системы изменение энтропии складывается из производства внутри σ и потока через границу $d_e S$:

$$(4) \quad dS/dt = \sigma + d_e S/dt, \text{ где } \sigma \geq 0$$

Согласно неравновесной термодинамике, мощность диссипации (рассеяния энергии в тепло) равна:

$$(5) \quad \Gamma_{\text{diss}} = T \sigma$$

Вспомним общий критерий структуро-генеза $\Xi = (dC/dt)_{\text{pot}} / \Gamma_{\text{diss}}$ [4]. Подставляя (5):

$$(6) \quad \Xi_{\text{thermo}} = (dC/dt)_{\text{pot}} / (T \sigma)$$

Новый термодинамический смысл критерия: Ξ_{thermo} показывает, во сколько раз потенциал системы к изменению сложности превышает мощность её термодинамической диссипации.

2.3. Энергия сложности U как часть свободной энергии

Из определения $E = M c^2 + U$ [1] и связи (2) можно сопоставить:

$$M c^2 + U \approx F + T S$$

Для нерелятивистской системы $M \ll c^2$ — константа. Тогда изменение U связано с изменением свободной энергии и энтропии:

$$(7) \quad \Delta U \approx \Delta F + T \Delta S$$

Формула для U [1,5]: $U = \hbar \cdot k \cdot (S_{\max} - S) \cdot I \cdot (1 - \delta) \cdot F_{\text{масштаба}}$. Величина $T (S_{\max} - S)$ имеет размерность энергии и представляет собой **максимальную работу, которую система могла бы совершить, релаксируя к равновесию**. Следовательно, U можно интерпретировать как **ту часть этой работы (свободной энергии), которая «инвестирована» или «законсервирована» в структурную упорядоченность, измеряемую информационной ёмкостью I** .

3. Количественная модель и расчёты

3.1. Связь dC/dt с потоком свободной энергии

Рассмотрим открытую систему в стационарном состоянии ($dS/dt = 0$). Тогда из (4) поток энтропии наружу равен производству внутри: $d_e S/dt = -\sigma$. Этот поток обеспечивается потоком энергии. Мощность, поступающая в систему, равна мощности диссипации: $P_{\text{in}} = T \sigma$. Часть этой мощности идёт на совершение работы (увеличение свободной энергии F), часть рассеивается. **Выдвигаем гипотезу:** Скорость роста сложности пропорциональна мощности, идущей на увеличение свободной энергии:

$$(8) \quad dC/dt = (1/\hbar) * (dF/dt + T dS/dt)_{\text{eff}}$$

В стационарном состоянии $dF/dt = 0$, но существует **циркуляция свободной энергии**. Более точная формулировка:

$$(9) \quad \langle dC/dt \rangle = (1/\hbar) * \Psi_F$$

где Ψ_F — **средний поток свободной энергии через систему** за характерное время.

3.2. Расчёт для конкретной системы: звезда главной последовательности

Возьмём звезду типа Солнца.

$$M_{\text{sun}} = 1.989e30 \text{ кг}$$

$$L_{\text{sun}} = 3.828e26 \text{ Вт (светимость)}$$

$T_{\text{eff}} = 5778 \text{ K}$ (эффективная температура)

$S_{\text{sun}} \approx (M_{\text{sun}} / m_p) * k_B * f$, оценка $\sim 10^{34} \text{ Дж/К}$

A. Производство энтропии σ : Основной источник — лучистый перенос в недрах.

Мощность диссипации $\Gamma_{\text{diss}} \approx L_{\text{sun}}$.

$\sigma = L_{\text{sun}} / T_{\text{eff}} \approx 3.828e26 \text{ Вт} / 5778 \text{ К} \approx 6.62e22 \text{ Вт/К}$

$T \sigma = L_{\text{sun}} \approx 3.83e26 \text{ Вт}$

B. Потенциал сложности $(dC/dt)_{\text{pot}}$:

$(dC/dt)_{\text{pot}} = (M_{\text{sun}} * c^2) / \hbar \approx (1.989e30 * 8.988e16) / 1.055e-34 \approx 1.69e81 \text{ с}^{-1}$

C. Термодинамический критерий Ξ_{thermo} для звезды:

$\Xi_{\text{thermo}}(\text{stellar}) = (dC/dt)_{\text{pot}} / (T \sigma) \approx 1.69e81 / 3.83e26 \approx 4.41e54$

Вывод: $\Xi_{\text{thermo}} \gg 1$. Это означает, что **термодинамическая диссипация (излучение) ничтожна по сравнению с колоссальным потенциалом сложности, запасённым в массе звезды**. Звезда — это машина, которая, рассеивая малую часть своей свободной энергии (через излучение), поддерживает гигантскую внутреннюю градацию (градиенты температуры, давления, химического состава), т.е. высокую сложность U .

3.3. Расчёт для системы вблизи равновесия: ячейка Бенара

Рассмотрим классический пример самоорганизации — ячейку Бенара. Для ячейки площадью $A = 0.01 \text{ м}^2$ и разностью температур $\Delta T = 10 \text{ К}$ при $T_{\text{avg}} = 300 \text{ К}$. Поток тепла $J_q \approx \kappa \Delta T / h$, мощность диссипации $\Gamma_{\text{diss}} \approx J_q * A * (\Delta T / T_{\text{avg}})$. Оценочно, $\Gamma_{\text{diss}} \approx 1e-3 \text{ Вт}$. Энергия системы E — тепловая, порядка $k_B T_{\text{avg}} * N_{\text{part}}$. Потенциал сложности: $(dC/dt)_{\text{pot}} = E / \hbar$. Для $N_{\text{part}} \sim 1e23$ (моль вещества), $E \sim 4e3 \text{ Дж}$.

$(dC/dt)_{\text{pot}} \approx 4e3 / 1.055e-34 \approx 3.8e37 \text{ с}^{-1}$

$\Xi_{\text{thermo}}(\text{Bénard}) = 3.8e37 / 1e-3 \approx 3.8e40$

Вывод: Даже в простой гидродинамической системе Ξ_{thermo} огромен. Возникновение упорядоченных конвективных ячеек ($dC/dt > 0$) происходит, когда поток тепла (и производство энтропии σ) превышает критическое значение. **Рост сложности (dC/dt) и производство энтропии (σ) не противоречат, а требуют друг друга.** Система с $\Xi_{\text{thermo}} \gg 1$ имеет большой «запас» для перестройки.

4. Обсуждение и интерпретация

4.1. Принцип максимизации потока свободной энергии

Из (9) следует, что системы, стремящиеся увеличить dC/dt , будут стремиться к состоянию с **максимальным устойчивым потоком свободной энергии Ψ_F** через себя. Это согласуется с гипотезами типа **принципа максимального производства энтропии (MEP)**, но уточняет его: система максимизирует не σ саму по себе, а **отношение $(dC/dt)_{\text{pot}} / (T \sigma)$** , то есть эффективность преобразования диссипации в потенциал сложности.

4.2. Разрешение парадокса

Рост полной энтропии Вселенной ($dS/dt > 0$) и рост локальной сложности ($dC/dt > 0$) согласованы через механизм **экспорта энтропии**. Сложная система (звезда, галактика, жизнь) — это локальная область, где высокий поток свободной энергии поддерживает состояние с низкой энтропией S , **одновременно производя и экспортируя большое количество энтропии σ в окружающую среду**. dC/dt — мера мощности этого процесса.

4.3. Эволюционный критерий

В эволюционирующей системе (протозвезда \rightarrow звезда \rightarrow остаток) Ξ_{thermo} меняется. Переходы между фазами (например, начало горения водорода) могут быть описаны как **скачкообразное увеличение dC/dt при достижении критического значения Ξ_{thermo}** .

5. Проверяемые предсказания

1. В любой наблюдаемой самоорганизующейся системе (от ячейки Бенара до аккреционного диска) должно выполняться: $\Xi_{\text{thermo}} = (dC/dt)_{\text{pot}} / (T \sigma) \gg 1$.
2. **Скорость эволюции** сложной системы (например, темп звездообразования в галактике) должна коррелировать с **скоростью**

производства свободной энергии в ней (например, с потоком гравитационной или термоядерной энергии).

3. **Внутренняя энергия сложности U** , рассчитанная по структурным параметрам (например, для галактики), должна быть пропорциональна разности между её текущей энтропией и энтропией гипотетического равновесного состояния (S_{\max}) при той же полной энергии.

6. Заключение

1. Установлена прямая связь принципа прогресса $dC/dt = E/\hbar$ с фундаментом неравновесной термодинамики.
2. Введён **термодинамический критерий прогресса Ξ_{thermo}** , показывающий, что рост сложности возможен только в системах, где потенциал сложности значительно превышает мощность термодинамической диссипации ($\Xi_{\text{thermo}} \gg 1$).
3. **Энергия сложности U интерпретирована как часть свободной энергии системы, «вложенная» в структурную упорядоченность.**
4. Парадокс между Вторым началом термодинамики и ростом сложности разрешён: **dC/dt и производство энтропии σ являются двумя сторонами одного процесса — диссипации свободной энергии, которая в открытых системах может порождать локальный порядок.**

Данная работа закладывает термодинамический фундамент для всей исследовательской программы, превращая принцип $dC/dt = E/\hbar$ из кинематического постулата в динамический закон для эволюции открытых диссипативных систем.

Литература [1-7] Кемаев М.С. Препринты серии «Теория прогресса как квантовая фаза». Zenodo. 2025-2026.

THE PRINCIPLE OF FUNDAMENTAL IDENTITY OF MATTER AND PROGRESS -
<https://doi.org/10.5281/zenodo.17980169>

Voids as a test for dark energy sterility: application of the structural complexity metric dC/dt - <https://doi.org/10.5281/zenodo.18314503>

Зона обитаемости для сложности: количественные границы эволюции структур во Вселенной - <https://doi.org/10.5281/zenodo.18376999>

Чёрные дыры как предельные концентраторы сложности -
<https://doi.org/10.5281/zenodo.18392321>

Стремление системы к структурной сложности против диссипативных сил:
количественный критерий и приложение к звёздному коллапсу -
<https://doi.org/10.5281/zenodo.18450025>

Единый принцип структурогенеза как следствие фундаментальных
взаимодействий: критерий Ξ и максимизация dC/dt -
<https://doi.org/10.5281/zenodo.18450528>

КВАНТОВАЯ ГРАВИТАЦИЯ КАК ФУНДАМЕНТАЛЬНОЕ УСЛОВИЕ
СТРУКТУРОГЕНЕЗА: КРИТЕРИЙ Ξ НА ПЛАНКОВСКИХ МАСШТАБАХ -
<https://doi.org/10.5281/zenodo.18552058>

[8] Prigogine, I. (1977). Time, Structure and Fluctuations.

[9] Kondepudi, D., & Prigogine, I. (2014). Modern Thermodynamics.

Все данные так же находятся в репозитории Git Hub:
<https://github.com/aawen7422-ai/JWST-Progress-Theory>

Препринт данной статьи доступен на Zenodo DOI:
<https://doi.org/10.5281/zenodo.18623248>