

**ВОЕННО–МЕДИЦИНСКАЯ АКАДЕМИЯ**  
**имени С.М. Кирова**  
**Кафедра биологической и медицинской**  
**физики**  
**ЛЕКЦИЯ № 11**

по дисциплине «Физика, математика»  
на тему: «**Основы термодинамики**  
**живых организмов**»

для курсантов и студентов I курса ФПВ,  
ФПиУГВ, спецфакультета

- **Термодинамикой** называют раздел науки и техники, исследующий процессы преобразования и использования энергии.
- Так как **понятие энергии** (как и понятие массы) относится к числу **наиболее общих понятий науки**, законы термодинамики являются наиболее общими законами не только физики, но и науки вообще.

- Так как все без исключения жизненные процессы связаны с преобразованиями энергии в живых организмах, термодинамика имеет большое значение и в биологических науках; в этом плане говорят о **биологической термодинамике**.

- Не случайно, по-видимому, что из трёх первооткрывателей важнейшего закона современной науки – первого начала термодинамики двое (**Р.Майер** и **Г. Гельмгольц**) были военными врачами.

**Юлиус Роберт Майер**  
(1814-1878)



**Герман Людвиг Фердинанд фон Гельмгольц**  
(1821-1894)



# 1. Понятие термодинамической системы. Виды термодинамических систем.

- **Термодинамическая система** — совокупность макроскопических тел, которые могут взаимодействовать между собой и с др. телами (внешней средой) — обмениваться с ними энергией и веществом.
- Термодинамическая система состоит из столь большого числа структурных частиц (атомов, молекул), что её состояние можно характеризовать **макроскопическими параметрами**: объемом, давлением, температурой, плотностью, концентрацией веществ, образующих термодинамическую систему, и т.д.

- Термодинамические системы бывают **трех видов**:
- 1. **Изолированные** (нет обмена ни веществом, ни энергией с окружающей средой).
- 2. **Закрытые (замкнутые)** (нет обмена веществом с окружающей средой).
- 3. **Открытые** (есть и энерго- и массообмен с окружающей средой).

## 2. Внутренняя энергия термодинамической системы. Первое начало термодинамики.

- **Энергию** любой системы можно разделить на две части:
- 1) энергия, зависящая от положения и движения системы, **как целого**, и
- 2) энергия, определяемая движением и взаимодействием **микрочастиц, образующих систему**.
- Вторую часть называют **внутренней энергией системы  $U$** .



- **Внутренняя энергия  $U$**  включает в себя:
  - 1) кинетическую энергию теплового движения частиц;
  - 2) потенциальную энергию, заключенную в химических связях;
  - 3) внутриядерную энергию.

- В системах, химический состав которых в ходе энергетических преобразований остается неизменным, при вычислении внутренней энергии можно учитывать только энергию теплового движения частиц.
- Примером такой системы является **идеальный газ**.

- **Внутренняя энергия идеального газа:**

$$U = \frac{i}{2} \cdot \frac{m}{\mu} RT$$

- где  $i$  – число степеней свободы молекулы,  
 $m$  – масса,  $\mu$  - молекулярная масса,  
 $R = 8,32 \cdot 10^3$  Дж·К<sup>-1</sup>·кмоль<sup>-1</sup> - универсальная газовая постоянная,  
 $T$  - абсолютная температура.

- Абсолютная температура является мерой средней кинетической энергии молекул, а значит – и внутренней энергии.

# Первое начало термодинамики

- Представляет собой **закон сохранения энергии**.
- Он гласит, что энергия не может быть создана или уничтожена, она лишь **переходит из одного вида в другой** в различных физических процессах.
- Отсюда следует, что **внутренняя энергия изолированной системы** остается неизменной.

- В случае закрытых систем изменение внутренней энергии системы ( $\Delta U$ ) может происходить двумя способами:
  - а) путем **совершения работы** ( $A$ ) системой или над системой;
  - б) посредством **передачи тепла** ( $Q$ ).

$$\Delta U = Q - A$$

- Или:  $Q = \Delta U + A$

(Тепло, переданное системе, идет на изменение внутренней энергии и совершение работы.)

- **Правило знаков:**
- **+Q** – тепло, поступающее в систему;
- **-Q** – тепло, отдаваемое системой;
- **+A** – работа, совершаемая системой над окружающими телами;
- **-A** – работа, совершаемая окружающими телами над системой.



### 3. Приложение первого начала термодинамики к живым организмам. Различие в преобразованиях энергии в технике и в живом организме.

- Справедливость первого начала (закона сохранения энергии) для живых организмов никогда не вызывала сомнений, более того, оно впервые было сформулировано именно для живых организмов (Р. Майер, Г. Гельмгольц).

- Однако в биологической термодинамике первое начало удобнее записывать несколько в другой форме с учетом того, что **единственным источником энергии для живых организмов является энергия химических связей пищевых продуктов.**

Поэтому:

$$W_{\text{пищи}} = A + Q + \Delta U$$

Энергия пищи тратится на совершение живым организмом **работы**, на изменение его **внутренней энергии** и частично отдается в окружающую среду в форме тепла.

- Организм **теплокровных** животных имеет постоянную температуру, и химический состав его в среднем не изменяется, поэтому  **$\Delta U=0$** .
- Тогда данное уравнение имеет вид:

$$W_{\text{пищи}} = Q + A$$

# Различия в преобразованиях энергии в технике и в живых организмах.

- **В технике** основным источником энергии является **сжигание топлива** или преобразование **ядерной энергии** в **тепловую**.
- **Часть полученного тепла** в различного рода двигателях используется для совершения работы, а другая часть отдаётся в окружающую среду.

- Живые организмы отличаются прежде всего тем, что **роль промежуточного звена между источником свободной энергии и работой в них выполняет не тепловая энергия, а химическая.**
- В живых организмах работа **не может совершаться** за счет тепловой энергии. Тепло всегда означает **тепловые потери** при различных видах совершения работы.

- В живых организмах свободная энергия, получаемая при усвоении пищи, почти целиком выделяется в ходе **биологического окисления**, происходящего на внутренних мембранах митохондрий.
- **Примерно 50% этой энергии** диссипирует (выделяется в виде тепла, которое целиком уходит в окружающую среду).

- Остальные 50% тратятся на синтез так называемых **макроэргов** – веществ, обеспечивающих энергией все клетки организма.
- Важнейшим из таких веществ является **аденозинтрифосфорная кислота (АТФ)**.



- Работа в живом организме производится за счёт энергии, выделяющейся при отщеплении от **АТФ** концевой фосфатной группы **НРО<sub>3</sub>** (обычно обозначаемой одной буквой **Ф**) и переносе этой группы на какое-то другое вещество, чаще всего – на воду:

**АТФ-аза**



- На совершение работы используется **около 40%** энергии АТФ, или **20%** от исходной энергии пищи.
- Остальная энергия опять-таки превращается в тепло и уходит из организма.
- Таким образом, **КПД организма составляет около 20%**.

- Синтез макроэргов происходит, и основном, за счёт **окисления мономеров**, на которые расщепляются в кишечнике пищевые продукты.
- Важнейшим из этих мономеров является **глюкоза**.
- За счёт энергии, выделяющейся при окислении **1 моля глюкозы**, может синтезироваться **36 молей АТФ**. Это так называемый **аэробный** синтез; он требует расхода кислорода.

- Кроме того, **2 моля АТФ** могут синтезироваться без участия кислорода при других реакциях (**анаэробный синтез**).
- Таким образом, за счёт энергии **1 моля** глюкозы всего может синтезироваться **38 молей АТФ**.

# Основные виды работы, совершаемой в живых организмах

- 1) Механическая работа
- 2) Химический синтез (особенно сложных биомолекул)
- 3) Поддержание физико-химических градиентов на мембранах
- 4) Перенос электрических зарядов

## 4. Основные способы теплообмена организма.

- В организме любого живого существа непрерывно выделяется тепло.
- Это тепло должно отводиться в окружающую среду, иначе организм перегреется и погибнет.
- Однако, и слишком быстрая отдача тепла опасна для организма – она приводит к переохлаждению.

- Существует 4 способа теплообмена организма с окружающей средой:
- 1) **Теплопроводность** – это перенос тепла за счёт усиления молекулярного движения в веществе.

$$Q_{\text{ТП}} = K \cdot \frac{T_1 - T_2}{x} \cdot S \cdot t$$

- 2) **Конвекция** - перенос тепла, связанный с движением газа или жидкости.
- 3) **Излучение:**

$$Q_{\text{изл}} = \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4) \cdot S \cdot t$$

- 4) **Испарение:**

$$Q_{\text{исп}} = L \cdot m$$

- где  $m$  – масса испарившейся воды,  $L$  – удельная теплота испарения воды ( $2,25 \cdot 10^6$  Дж.кг<sup>-1</sup>).



# 5. Температурный гомеостаз.

## Способы терморегуляции.

- Температура тела человека и многих животных поддерживается постоянной с достаточно высокой точностью.
- Это свойство организма называют **температурным гомеостазом**.
- Постоянство температуры тела обеспечивается выработавшейся в ходе эволюции **системой терморегуляции**.

- Различают **химическую** и **физическую** терморегуляцию.
- **Химическая** терморегуляция основана на изменении **теплопродукции** (скорости и характера биологического окисления, совершения мышечной работы – дрожь) .
- **Физическая** терморегуляция основана на изменении **теплообмена**.

## 6. Свободная и связанная энергия. Энтропия.

- **Внутренняя энергия** любой системы состоит из двух разных частей:
- 1. **Свободная энергия  $G$**  – это та часть внутренней энергии, которую в принципе можно полностью использовать для совершения работы.
- 2. **Связанная энергия  $W_{\text{СВЯЗ}}$** , которую в данных условиях вообще нельзя превратить в работу.

$$U = G + W_{\text{СВЯЗ}}$$

- **Мерой связанной энергии** системы является **энтропия  $S$** .

$$S = \frac{W_{\text{СВЯЗ}}}{T}$$

- то есть энтропия  $S$  – это величина связанной энергии, приходящаяся на единицу абсолютной температуры.
- Размерность энтропии – Дж·К<sup>-1</sup>.

- Изменение энтропии рассчитывают:
- а) при изотермическом процессе:

$$\Delta S_{1 \rightarrow 2} = \frac{Q_{1 \rightarrow 2}}{T}$$

- б) в случае изменения температуры:

$$\Delta S_{1 \rightarrow 2} = \int_1^2 \frac{dQ}{T}$$

# Вероятностный смысл энтропии

- Состояние системы (**макросостояние**) характеризуется такими параметрами, как температура, давление, объем и т.д.
- Однако каждому макросостоянию системы соответствует множество **микросостояний**, характеризующихся различными положениями и скоростями микрочастиц, образующих систему.

- **Термодинамическая вероятность** ( $P_{\text{тд}}$ ) - это число микросостояний, которыми может быть реализовано данное макросостояние системы.
- **Формула Больцмана:  $S = k \cdot \ln P_{\text{тд}}$**
- Здесь  $k$  – постоянная Больцмана ( $k = 1,37 \cdot 10^{-23}$  Дж.К<sup>-1</sup>).

## 7. Второе начало термодинамики

- Первое начало термодинамики даёт основу для расчёта энергетики всех процессов. Однако, оно ничего не говорит о **направлении** этих процессов.
- С точки зрения первого начала прямой и обратный процессы (например, синтез АТФ и её расщепление) одинаково ВОЗМОЖНЫ.



- На самом деле, в каких-то конкретных условиях процесс всегда идёт в одном направлении.
- Правило, позволяющее определить, в каком именно направлении будет идти процесс при заданных условиях, называется **вторым началом термодинамики**.

- По самому смыслу понятия вероятности любая система, предоставленная сама себе (то есть **изолированная**), будет переходить **из состояния с меньшей вероятностью** в состояние **с большей вероятностью**.
- Обратный переход в принципе возможен, но практически невероятен.

- Учитывая формулу Больцмана, мы сразу приходим к формулировке второго начала термодинамики: все реальные процессы в изолированной системе происходят в сторону состояний с большей вероятностью, то есть с увеличением энтропии.

$$\Delta S_i > 0$$

- Поскольку в изолированной системе  $U = G + W_{\text{связ}} = G + ST = \text{const}$ , то увеличение энтропии приводит к **уменьшению свободной энергии.**

$$\Delta G_i < 0$$

В конечном итоге изолированная система переходит в состояние **термодинамического равновесия.**

## 8. Второе начало термодинамики для живых организмов. Продукция и поток энтропии.

- Все живые организмы относятся к **открытым системам**.
- Очевидно, что **запас свободной энергии** открытой системы (в том числе и человека) **может как расти, так и убывать** - всё будет зависеть от того, что будет преобладать: приток свободной энергии из окружающей среды или убыль свободной энергии в результате совершения работы и процессов диссипации энергии.

- Для живых организмов справедливы выражения:
- $\Delta S = \Delta S_i + \Delta S_e$  (общее изменение энтропии равно сумме изменений энтропии за счет процессов, протекающих внутри системы ( $i$ ), и за счет процессов обмена с окружающей средой ( $e$ )).
- То же справедливо для изменения свободной энергии:  $\Delta G = \Delta G_i + \Delta G_e$

- Все процессы внутри системы идут с уменьшением свободной энергии, поэтому изменение свободной энергии за счёт процессов внутри системы всегда отрицательно ( $\Delta G_i < 0$ ).
- Что же касается члена  $\Delta G_e$ , то он может иметь любой знак.
- Чаще система получает извне поток свободной энергии, то есть  $\Delta G_e > 0$ , но вполне возможны и случаи, когда система отдаёт свободную энергию другим телам; тогда  $\Delta G_e < 0$ .

- Поэтому общее изменение свободной энергии (и, соответственно, энтропии) открытой системы может иметь **любой знак** (или равняться нулю).
- Это не противоречит второму началу термодинамики.



- Формулировка **второго начала термодинамики для открытых систем** (в том числе, для живых организмов): в открытой системе изменение внутренней энергии **за счёт процессов внутри системы** всегда отрицательно, а изменение энтропии за счёт процессов внутри системы всегда положительно.

- $$\Delta G_i < 0; \quad \Delta S_i > 0$$

## 9. Продукция энтропии и поток энтропии. Теорема Пригожина

- Во многих случаях представляет интерес **скорость изменения энтропии**, которая выражается производной  $\frac{ds}{dt} = \left(\frac{dS}{dt}\right)_i + \left(\frac{dS}{dt}\right)_e$  мени.
- Первый член справа называют **продукцией энтропии**, а второй член – **потоком энтропии**.

- **Стационарным состоянием системы** называют состояние, в котором процессы в системе так сбалансированы, что **основные величины, характеризующие систему, остаются постоянными.**
- В стационарном состоянии **продукция энтропии равна ее потоку.**

- И.Р. Пригожин доказал положение, которое называется теоремой Пригожина: в стационарном состоянии продукция энтропии минимальна.

$$\left(\frac{dS}{dt}\right)_i \rightarrow \min$$

- **Минимальная продукция энтропии** соответствует минимальной диссипации свободной энергии (минимальным потерям энергии), то есть **максимальному КПД**.
- Поэтому можно сказать, что в **стационарном состоянии КПД системы наибольший**.