

Лекция 1. Биофизика как наука о физических закономерностях живых систем.

Термодинамика в классической физике и ее применение для биологических объектов



1.1. Цели и задачи биофизики

Опр. Биофизика - наука о физико-химических явлениях в живых системах, находящихся в неразрывной связи с окружающей средой

Опр. Биофизика – наука, изучающая физические и физико-химические процессы, которые протекают в биологических системах на разных уровнях организации и являются основой физиологических процессов

Опр. Объект Биофизики – живая система (часть клетки, клетка, отдельный орган, целый организм)

Опр. Биофизические исследования начинаются с физической постановки задачи, относящейся к живой природе, и должны формулироваться исходя из общих законов физики и атомно-молекулярного строения вещества

Задачи биофизики:

- Раскрытие общих закономерностей поведения открытых неравновесных систем. Теоретическое обоснование термодинамических основ жизни.
- Научное объяснение явлений индивидуального и эволюционного развития, саморегуляции и самовоспроизведения.
- Выяснение связей между строением и функциональными свойствами биополимеров и других биологически активных веществ.
- Создание и теоретическое обоснование физико-химических методов исследования биообъектов.
- Физическое объяснение всего комплекса функциональных явлений (генерация и распределение нервного импульса, мышечное сокращение, рецепция, и др.)

Биофизика подразделяется на такие области:

- Молекулярная биофизика изучает строение и физико-химические свойства, биофизику молекул.
- Биофизика клетки изучает особенности строения и функционирования клеточных и тканевых систем.
- Биофизика органов исследует молекулярные механизмы рецепции, процессы преобразования энергии внешних воздействий в специфические реакции нервных клеток и механизмов кодирования информации в органах чувств.
- Биофизика сложных систем изучает кинетику биопроцессов, поведение во времени разнообразных процессов присущих живой материи и термодинамику биосистем.



Основные признаки живой материи

• Питание. Пища – источник энергии и веществ, необходимых для роста и других процессов жизнедеятельности.

• Дыхание. В процессе дыхания происходит высвобождение энергии при расщеплении высокоэнергетических соединений.

Высвобождаемая энергия запасается в молекулах АТФ.

• Раздражимость. Живые существа способны реагировать на изменение внешней и внутренней среды

• Подвижность. Живые организмы способны перемещаться из одного места на другое.



✧ Выделение. Это способность живых организмов к выведению из организма конечных продуктов обмена веществ.

✧ Размножение. Выживание определенного вида обеспечивается сохранением главных признаков родителей у потомства путем бесполого или полового размножения.

✧ Рост. Объекты неживой природы растут за счет присоединения вещества к наружной поверхности, а живые организмы – изнутри за счет питательных веществ которые организм получает в процессе питания.

Опр. Живой организм – это открытая, саморегулирующаяся, самовоспроизводящая и развивающаяся неоднородная система, важнейшими функциональными веществами которой являются биологические полимеры – белки и нуклеиновые кислоты.

1.2. Элементы термодинамики

Опр. Термодинамика – это раздел физики, который занимается описанием – качественным и количественным – процессов превращения различных видов энергии.

Опр. Система - это совокупность материальных объектов, ограниченных каким-либо образом от окружающей среды. В зависимости от характера обмена энергии и веществом с окружающей средой через границы системы образуют три группы.

Опр. Изолированные системы - системы, не обменивающиеся с внешней средой ни энергией, ни веществом.

Опр. Закрытые системы - системы, обменивающиеся с окружающей средой только энергией.

Опр. Открытые системы - системы, обменивающиеся с окружающей средой и веществом, и энергией.

Опр. Энергия ($U, E, F, G, \Delta U, dU, \Delta E, dE, \Delta F, dF, \Delta G, dG$) – количественная мера определенного вида движения материи при ее превращении из одного вида в другой. Энергия всегда определяет способность системы совершать работу.

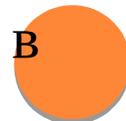
Опр. Работа ($A, \Delta A, dA$) – мера превращения энергии из одной формы в другую. Численно работа равна энергии, превращенной из одной формы в другую в процессе совершения работы.

Единицы измерения энергии:

Джоуль – равен работе, совершаемой при перемещении точки приложения силы в 1н на 1м.

калория – количество тепла, необходимое для нагревания 1 г воды на 1°C, 1 кал=4,18 Дж

Опр. Количество теплоты ($Q, \Delta Q, dQ$) – мера передачи энергии в процессе теплообмена



Опр. Тепловая энергия – сумма кинетической энергии теплового, хаотического движения атомов и молекул вещества.

Показатель теплового движения частиц – температура.

Средняя кинетическая энергия $E = 3/2 kT$,

k – постоянная Больцмана («тепловой квант»),

$k = 1,380 \cdot 10^{-38}$ Дж/К.

Опр. Механическая энергия – форма энергии, характеризующая движения макротел и способность совершать механическую работу по перемещению макротел.

Опр. Химическая энергия – энергия взаимодействия атомов в молекулах. Всякая химическая энергия – это суммарная энергия движения электронов по атомным или молекулярным орбитам.

Опр. Электрическая энергия – энергия взаимодействия электрически заряженных частиц, вызывающая движение этих частиц в электрическом поле.



Опр. Внутренняя энергия (U , ΔU , dU) – это общая сумма всех видов энергии в данной системе (тепловой, механической, химической, электрической).

Внутренняя энергия является функцией состояния системы и для данного состояния имеет определенное значение:

ΔU есть разность двух значений внутренней энергии, соответствующих конечному и начальному состояниям системы:

$$\Delta U = U_2 - U_1$$



Первый закон термодинамики:

Первый закон термодинамики является количественным выражением **закона сохранения энергии**

Закон сохранения энергии:

Энергия не исчезает и не возникает, а только переходит из одной формы в другую в эквивалентных количествах.

Первый закон термодинамики

Общая сумма энергии материальной системы остается постоянной величиной независимо от изменений, происходящих в системе.

Изменение в системе возможно только в результате обмена энергией с окружающей (внешней) средой.

Первый закон термодинамики:

**Изменение внутренней энергии системы ΔU
равно алгебраической сумме тепла,
переданного в процессе ΔQ ,
и совершенной работе ΔA**

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta A$$

или

**Теплота ΔQ , поглощенная системой из внешней
среды, идет на увеличение внутренней энергии
системы ΔU и совершение работы ΔA**

$$\Delta Q = \Delta U + \Delta A$$

**В общем случае ΔA включает работу против сил внешнего
давления $p\Delta V$ и работу ΔA , сопровождающую химические
превращения ΔQ и ΔA – функции процессов**

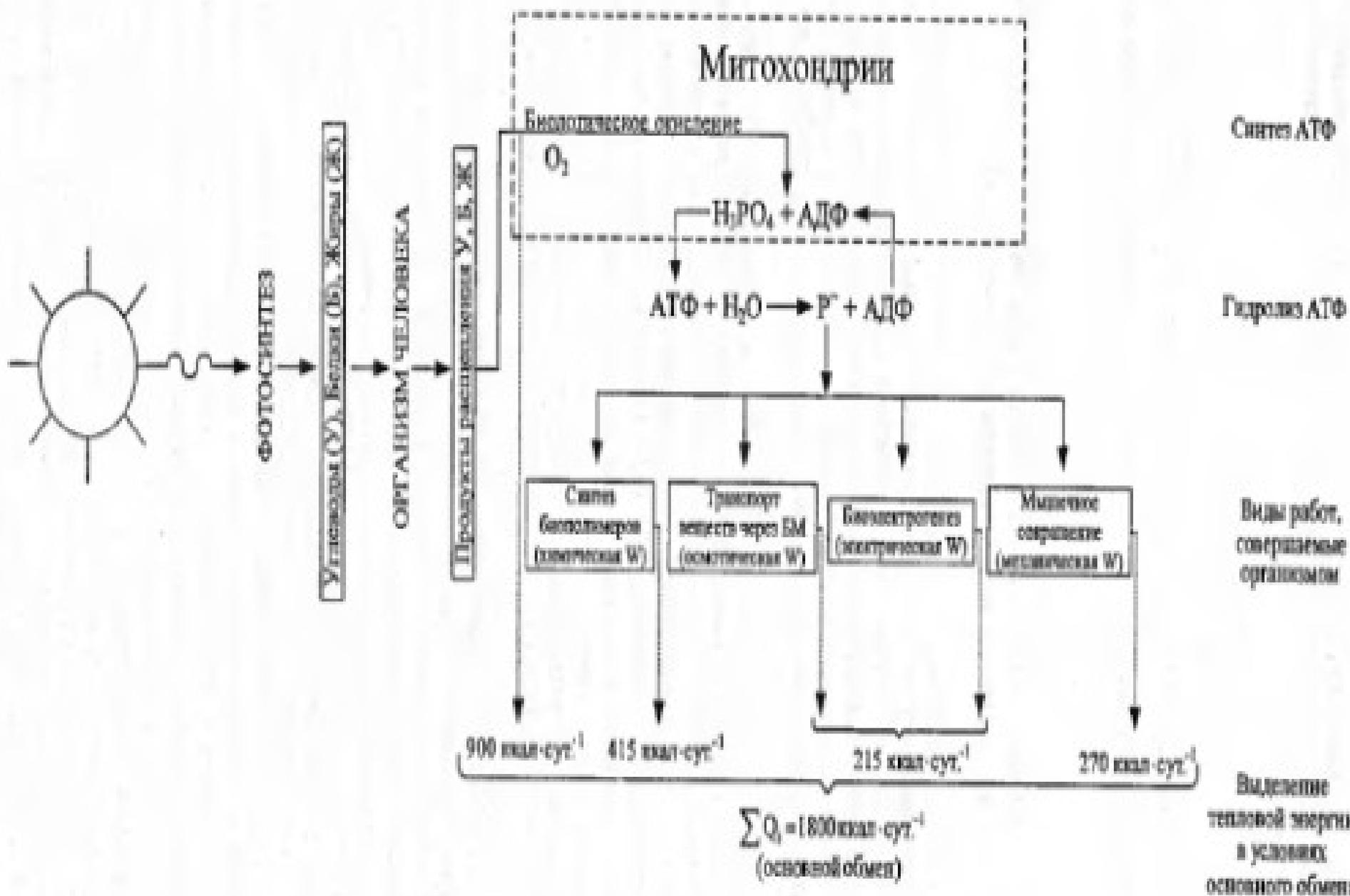
1.3. Биологический организм как открытая термодинамическая система

1. Биологические объекты являются открытыми термодинамическими системами. Они обмениваются с окружающей средой энергией и веществом.
2. Живые организмы производят работу посредством химической энергии пищевых продуктов, усвоенных ими:

$$\Delta U = W_{\text{пищ.}} - Q - A$$

3. В термодинамических процессах в биологических системах отсутствует промежуточный этап (форме тепловой энергии) между химической энергией, запасенной в пище, и работой, совершаемой организмом





4. Основным способом использования свободной энергии – это биологическое окисление, происходящее во внутренней мембране митохондрии и сопровождающееся образованием АТФ и АДФ.

5. Энергия, запасенная в АТФ, высвобождается при гидролизе и используется на совершение работы.

6. Энергия АТФ тратится на :

- синтез сложных биомолекул
(1 моль белка – от 12000 до 200 000 кДж);
- поддержание физико-химических градиентов на клеточных мембранах – осмотическая работа (транспорт веществ);
- биоэлектrogenез – электрическая работа;
- механическая работа (мышечная)



7. В теплообразовании живых организмов можно выделить два этапа:

Потери тепла при синтезе АТФ (первичное тепло)

Потери тепла при синтезе макромолекул, мышечных сокращениях и др. (вторичное тепло)

$$W_{\text{пищ.}} = \Delta U + \sum Q_i + A$$



Формулировка

первого закона термодинамики для живых систем

Все виды работы, совершаемые в живом организме, совершаются за счет энергии АТФ. АТФ – это универсальный источник энергии:



Первый закон термодинамики

полностью применим к живым организмам .

Для живых систем

он формулируется следующим образом:

Все виды работ в организме совершаются за счет эквивалентного количества энергии, выделяющейся при окислении питательных веществ



Опытная проверка применимости первого закона для живых систем проводилась в специальных биокалориметрах, где измерялась теплота, выделенная организмом в процессах метаболизма, при испарениях, а также вместе с продуктами выделения.

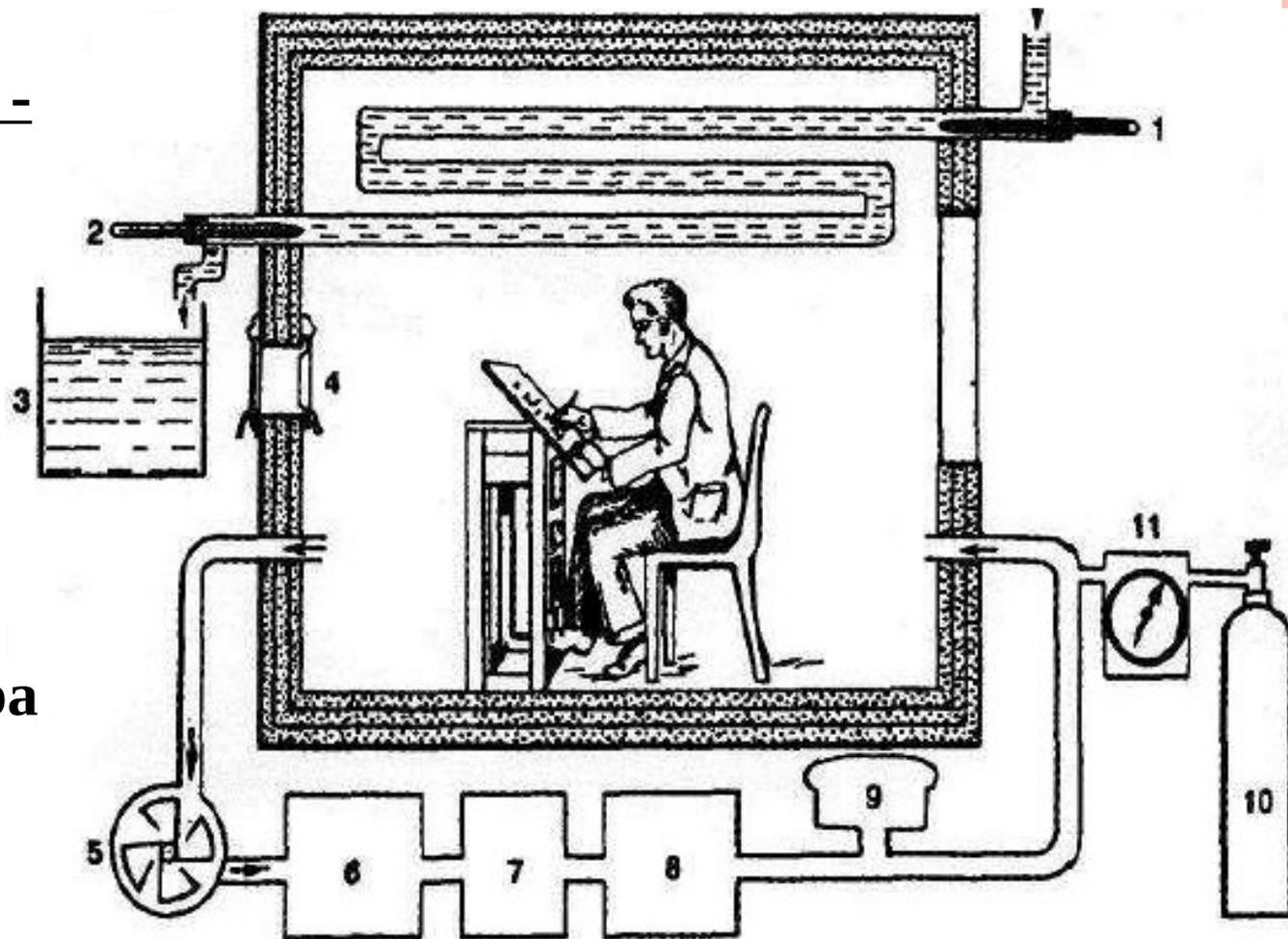
Оказалось, что выделенная организмом теплота полностью соответствует энергии, поглощенной вместе с питательными веществами.

Справедливость первого закона термодинамики для живых систем означает, что сам по себе организм не является независимым источником какой-либо новой энергии.



Прямая
калориметрия -
непосредственное
измерение
количества тепла,
выделенного
организмом _

Схема биокалориметра



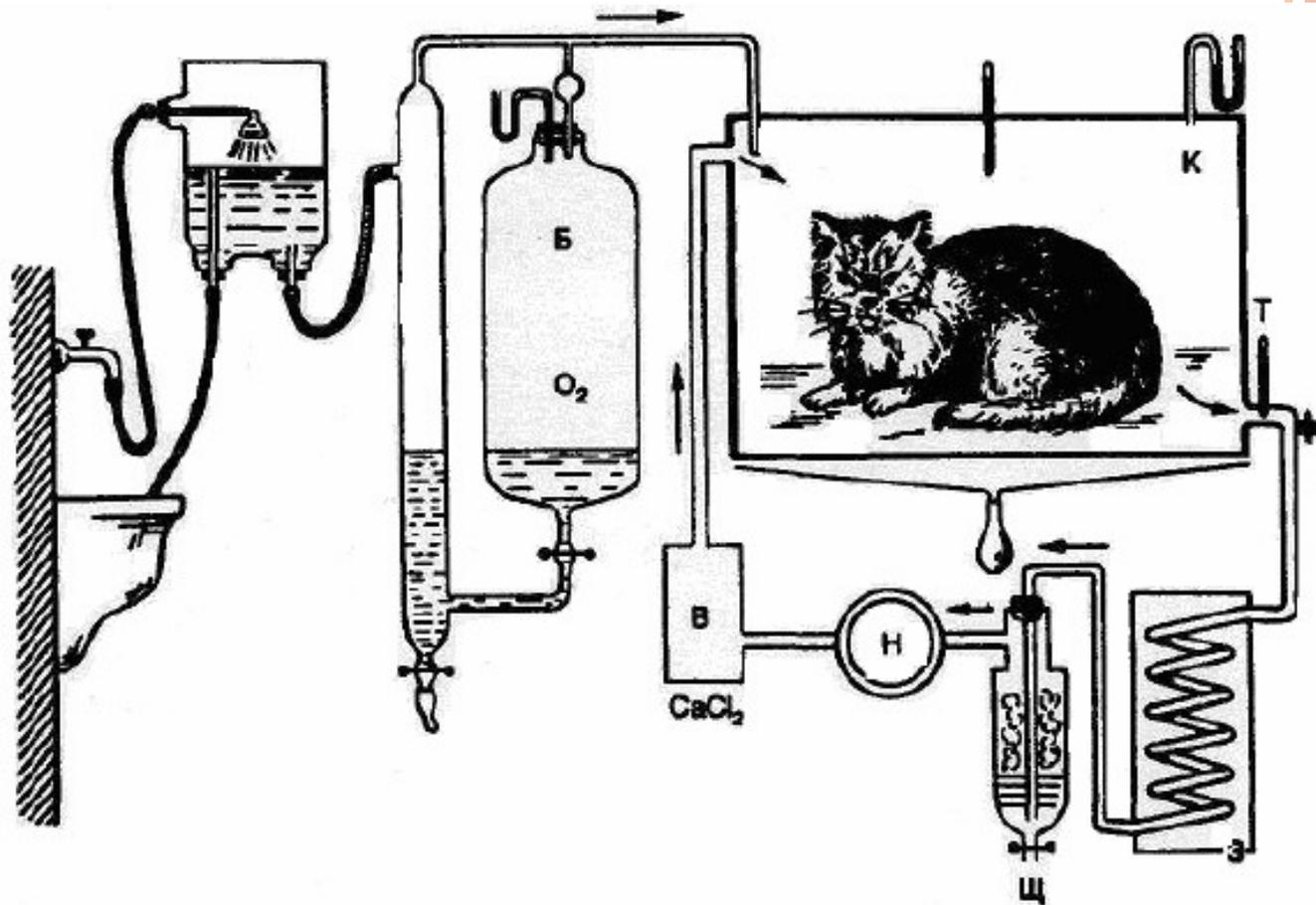
(1,2) - термометры для измерения температуры H_2O , протекающей по трубкам в камере; (3) – бак для воды; (4) – окно для подачи пищи; (5) - насос для удаления воздуха из камеры; (6,8) баки с серной кислотой для поглощения воды; (7) баки с известью для поглощения CO_2 ; (9) - сосуд для поддержания постоянного давления в камере; (10) - баллон для подачи O_2 в камеру через газовые часы (11).

Непрямая

калориметрия -

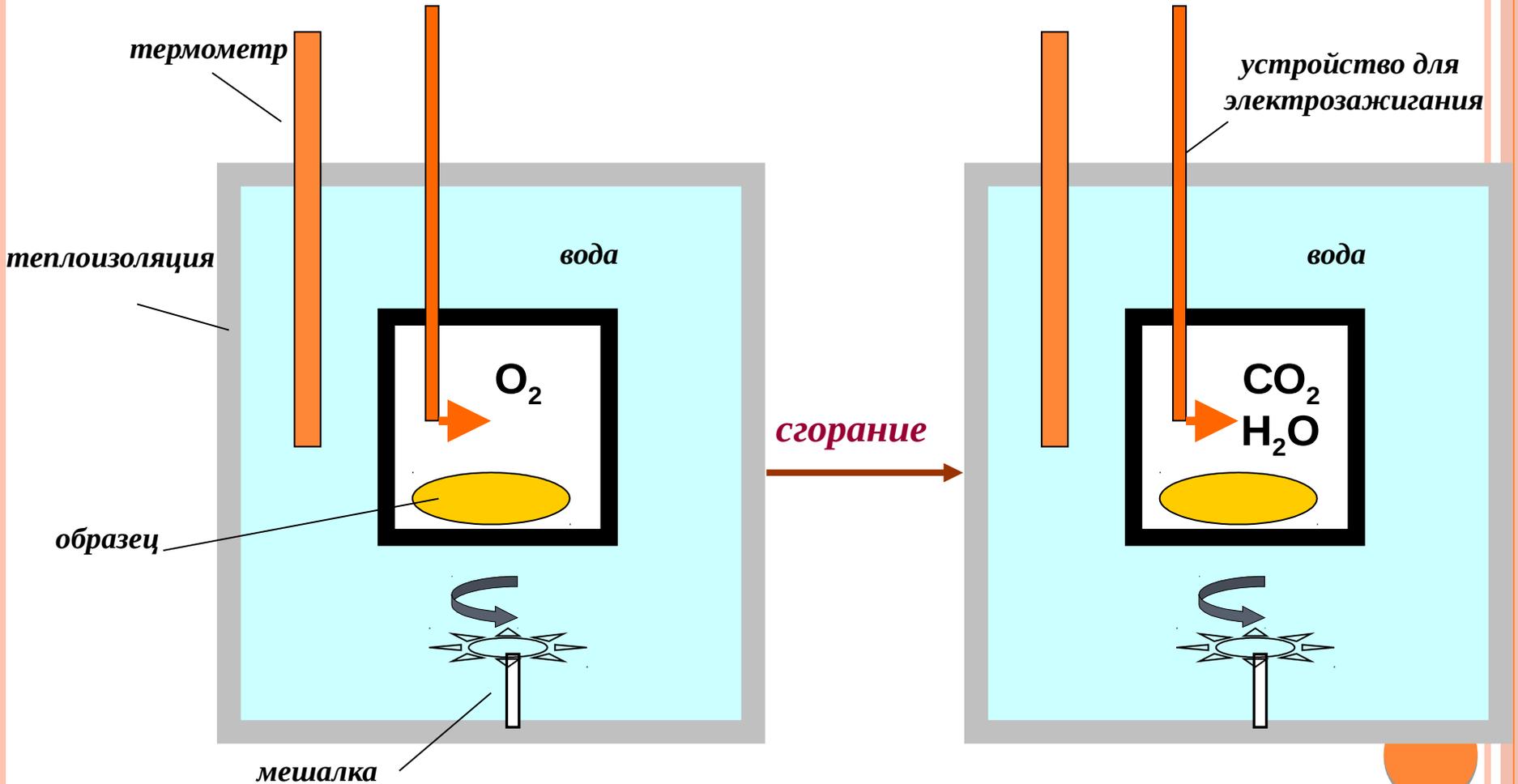
непрямое определение
теплообразования в
организме по его
газообмену

Схема респираторного аппарата



К – камера; Б – баллон с кислородом; Н – мотор, выкачивающий воздух из камеры; З – змеевик для охлаждения воздуха; Щ – сосуд, наполненный раствором щелочи для поглощения углекислого газа; В – баллон для поглощения водяных паров хлоридом кальция; Т – термометры. Слева устройство для автоматической подачи O_2 в камеру и поддержания постоянства давления в ней.

Определение энергоемкости питательных веществ, поступающих в организм



Энергетический баланс человека в сутки

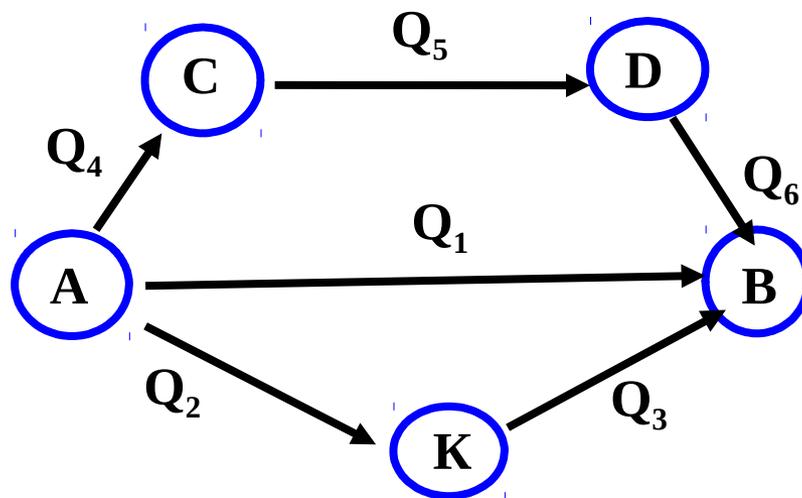
Приход (ккал)	Расход (ккал)
Питательные вещества	Выделенная через кожу
56,8 г белков - 237	теплота - 1374
140 г жиров - 1307	Выдыхаемые газы - 43
79,9 г углеводов - 335	Кал и моча - 23
	Испарение через дыхание - 181
	Испарение через кожу - 227
	Поправки - 11
Всего1879	Всего.....1859

Таким образом, живой организм не является источником новой энергии и первый закон термодинамики полностью применим к живым организмам



При химических превращениях следствием
первого закона термодинамики является
закон Гесса:

**Тепловой эффект химического процесса, проходящего ряд
промежуточных стадий, не зависит от пути превращения,
а определяется лишь начальным и конечным состояниями
химической системы**



$$Q_1 = Q_2 + Q_3 = Q_4 + Q_5 + Q_6$$

A – исходные продукты, B – конечные продукты,
K, C, D – промежуточные продукты;
Q₁, Q₂, Q₃, Q₄, Q₅, Q₆ – тепловые эффекты отдельных стадий

Первый закон термодинамики

Общая сумма энергии материальной системы остается постоянной величиной независимо от изменений, происходящих в системе.

Изменение в системе возможно только в результате обмена энергией с окружающей (внешней) средой.

или:

Изменение внутренней энергии системы равно алгебраической сумме тепла, переданного в процессе, и совершенной работе

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta A$$

Первый закон термодинамики для живых систем:

Все виды работ в организме совершаются за счет эквивалентного количества энергии, выделяющейся при окислении питательных веществ

Свободная энергия, энтропия.

Опр. Термодинамическое равновесие - такое состояние системы, когда изменения различных видов энергии выровнены, и способность системы совершать работу равна нулю. Обращение обратимого процесса не вызывает остаточных изменений в окружающей среде.

Опр. Обратимый процесс - это процесс, при котором система в каждый данный момент времени находится в состоянии, бесконечно близком к термодинамическому равновесию, и достаточно лишь незначительно изменить условия, чтобы процесс был обращен.

Опр. Необратимый процесс - это процесс, при котором система изменяется по направлению к конечному состоянию (при самопроизвольном протекании процесса - к состоянию равновесия) с определенной скоростью. При этом часть свободной энергии системы (то есть той энергии системы, за счет которой может совершаться работа при постоянной температуре) теряется в виде тепла.



Первый закон термодинамики определяет количественные соотношения между различными формами энергии, которые принимают участие в определенном процессе.

Первый закон термодинамики показывает, что различные виды энергии могут превращаться друг в друга в эквивалентных количествах.

Но **первый закон термодинамики** ничего не говорит о направлении, в котором происходит превращение энергии в системе - **в каком направлении будет развиваться тот или иной процесс.**

Второй закон термодинамики заключается в том, что все процессы превращения энергии протекают с рассеиванием части энергии в виде тепла.

Второй закон термодинамики устанавливает критерий, отражающий одностороннюю направленность необратимых (неравновесных) процессов не зависимо от их конкретной природы



Согласно второму закону термодинамики, состояние системы может быть описано особой функцией – **энтропией S** .

Энтропия характеризует потери энергии при необратимых процессах, которые происходят обычно в виде тепла.

Таким образом, энтропия отражает ту часть энергии системы, которая рассеялась в тепловой форме и не может уже быть использована для совершения работы при постоянной температуре.

Изменение энтропии ΔS определяется как отношение суммарного значения поглощенных системой теплоты к температуре системы Q/T :

$$\Delta S \geq \Delta Q/T$$

где Q – поглощенная системой теплота, T – температура.

Для изолированной системы, т.е. системы, не обменивающейся теплом с внешней средой $\Delta Q = 0$ и уравнение принимает вид:

$$\Delta S \geq 0$$

То есть,
при обратимых процессах
изменение энтропии равно нулю

$$\Delta S = 0,$$

а при необратимых оно положительно:

$$\Delta S > 0$$

В изолированной системе энтропия ΔS остается неизменной в равновесных (обратимых) и возрастает в неравновесных (необратимых) процессах. Это и является критерием направленности превращений в изолированной системе.

Таким образом,
протекающий в изолированной системе самопроизвольный неравновесный (необратимый) процесс всегда вызывает увеличение энтропии до ее максимальных значений при окончании процесса и установлении термодинамического равновесия.

Общая формулировка
второго закона термодинамики:

**Любой самопроизвольный процесс в изолированной системе приводит к уменьшению свободной энергии, если процесс необратим (неравновесен);
если процесс обратим (равновесен), то свободная энергия системы постоянна и минимальна**



Роль энтропии

1. Энтропия как мера рассеяния энергии при необратимых процессах

Чем больше возрастание энтропии при каком-либо процессе, тем больше рассеяние энергии и тем более необратим данный процесс.

В изолированной системе энтропия остается неизменной в равновесных (обратимых) и возрастает в неравновесных (необратимых) процессах.

2. Энтропия как мера возможности процесса

Самопроизвольно могут протекать только процессы, при которых энтропия возрастает (необратимые процессы) или остается постоянной (обратимые).

Процессы, при которых энтропия уменьшается, самопроизвольно протекать не могут, то есть термодинамически невозможны.

Таким образом,

термодинамический энтропийный критерий однозначно определяет возможность протекания того или иного процесса.



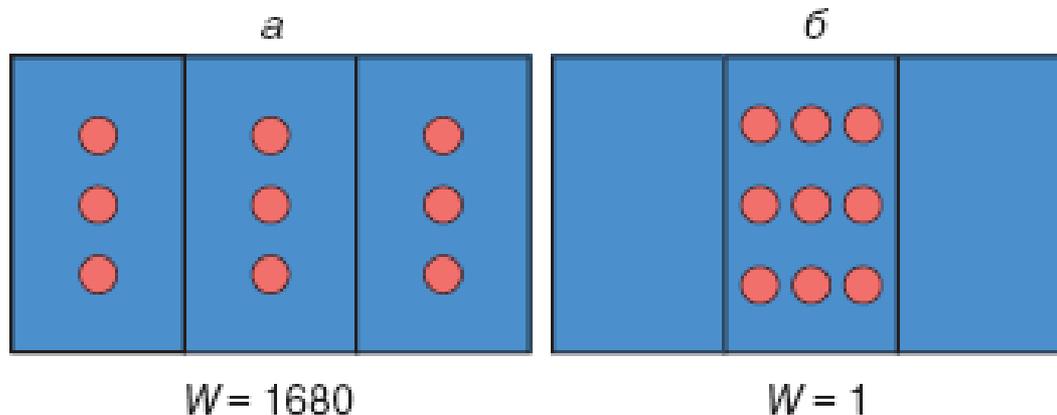
3. Энтропия - мера упорядоченности системы

$$S = k \ln W$$
 - уравнение Планка-Больцмана

где S - энтропия, k - постоянная Больцмана, равная 38×10^{-24} ДжК⁻¹ или $3,311 \times 10^{-24}$ энтропийных единиц

Лед: $S = 9.8$; вода: $S = 16.7$; пар: $S = 45.1$

(энтропийная единица равна 1 кал/град), W - термодинамическая вероятность, то есть число способов, которыми достигается данное состояние



При переходе системы от полного беспорядка (а) к полному порядку (б) меняется термодинамическая вероятность W , а, следовательно, и энтропия S , которая, в соответствии с уравнением Планка-Больцмана равна $S = k \ln W$. Чем больше упорядоченность системы, тем меньше ее энтропия.

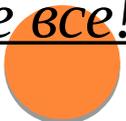
4. Связь между энтропией и информацией

Макроскопическое состояние некоторой системы: с определенной степенью точности указаны значения объема, давления, температуры, химического состава и т.п.

Каждому макросостоянию системы соответствует набор микросостояний. В микросостоянии точно заданы состояния всех частиц, входящих в систему. Для любой макросистемы при температуре выше абсолютного нуля число микросостояний W , соответствующих данному макросостоянию, огромно.

W называется статистическим весом или термодинамической вероятностью данного макросостояния.

Знать микросостояние системы значит знать о системе все!



Второй закон термодинамики для живых систем

Организм, являясь открытой системой, получает энергию извне и запасает ее в виде богатых энергией соединений (АТФ).

При этом энтропия системы понижается.



Запасенная энергия используется для совершения полезной работы. Так как все процессы, протекающие в живых телах, носят необратимый характер, то в ходе этих процессов энтропия увеличивается. При этом часть энергии выделяется в окружающую среду в форме бедных энергией конечных продуктов метаболизма.

Постулат И.П. Пригожина:

Общее изменение энтропии dS открытой системы может происходить независимо либо за счет процессов обмена с внешней средой ($d_e S$), либо вследствие внутренних необратимых процессов ($d_i S$):

$$dS = d_e S + d_i S$$

Энергетическую характеристику открытой, или условно изолированной биологической системы в соответствии со вторым принципом термодинамики можно дать на основе баланса (обмена) энтропии.

Пусть

dS/dt - скорость изменения энтропии открытой системы,

$d_i S/dt$ - скорость образования энтропии в системе за счет внутренних необратимых процессов,

$d_e S/dt$ – скорость обмена энтропией с внешней средой

Уравнение Пригожина:

$d_i S/dt$ по определению всегда положительно,

$d_e S/dt$ может быть как положительным, так и отрицательным.

$$\frac{dS}{dt} = \frac{d_i S}{dt} + \frac{d_e S}{dt}$$

Это уравнение выражает суть энергетических процессов, происходящих в открытой биологической системе.

Теорема И.П.Пригожина

В стационарном состоянии скорость возрастания энтропии, обусловленного протеканием необратимых процессов, имеет положительное и минимальное из возможных значение

$$d_i S/dt > 0 \rightarrow \min$$

В этом состоит критерий направленности необратимых процессов в открытых системах, находящихся вблизи равновесия.

Нахождение системы в экстремуме, соответствующем минимуму производства энтропии, обеспечивает ей наиболее устойчивое состояние.



Различия между термодинамическим равновесием и стационарным состоянием

Термодинамическое равновесие

- ✓ отсутствует поток вещества и энергии в окружающую среду и обратно
- ✓ на поддержание этого состояния не затрачивается свободная энергия
- ✓ работоспособность системы равна 0, т/д потенциалы равны 0
- ✓ энтропия максимальна
- ✓ в системе отсутствуют градиенты

Стационарное состояние

- ✓ постоянный обмен энергией с окружающей средой
 - ✓ постоянно тратится свободная энергия на поддержание состояния
 - ✓ т/д потенциалы постоянны и не равны 0
 - ✓ энтропия постоянна, но не максимальна
 - ✓ градиенты присутствуют
- 

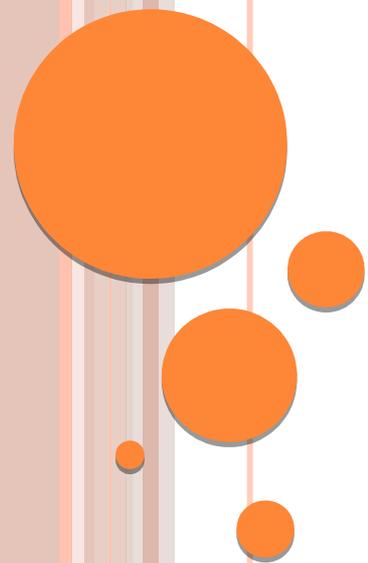
Второй закон термодинамики для живых систем

Скорость изменения энтропии ΔS в организме равна алгебраической сумме скоростей производства энтропии внутри организма и скорости поступления отрицательной энтропии из среды в организм.

Математическая запись второго закона термодинамики для живых систем.

$$dS/dt = dS_i/dt + dS_e/dt$$

Здесь dS , dS_p , dS_e – общее изменение энтропии системы, изменение энтропии за счет процессов, происходящих в организме и изменение энтропии, обусловленное взаимодействием с внешней средой, соответственно.



Спасибо за внимание!