

**Якупов Т.Р. Зайнашева Г.Н.**

**Физико-химические аспекты  
биологической жизнедеятельности.**

**Учебное пособие  
по термодинамике**

**Казань 2020**

**Министерство сельского хозяйства РФ  
ФГБОУ ВО Казанская государственная академия  
ветеринарной медицины имени Н.Э. Баумана**

Физико – химические аспекты  
биологической жизнедеятельности.

Учебное пособие по термодинамике

Казань 2020

УДК 577.31  
ББК 28

Печатается по решению Ученого совета факультета биотехнологии и стандартизации ФГБОУ ВО Казанская ГАВМ от 25.06.2020.

Рецензенты: зав. кафедрой микробиологии и вирусологии ФГБОУ ВО Казанская ГАВМ, профессор Галиуллин А.К.  
зав. лабораторией биохимии и молекулярно-генетического анализа ФГБНУ «ФЦТРБ-ВНИВИ», профессор биохимии Фаизов Т.Х.

Якупов Т.Р. Физико – химические аспекты биологической жизнедеятельности. Учебное пособие по термодинамике / Т.Р. Якупов, Г.Н. Зайнашева. – Казань: ФГБОУ ВО Казанская ГАВМ, 2020.– 47 с.

Учебное пособие предназначено для ознакомления студентов основами термодинамики биологических систем. Составлено из нескольких разделов, где описываются основные понятия термодинамики, физико-химические основы жизнедеятельности организма.

© Якупов Т.Р., Зайнашева Г.Н., 2020

© федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанская государственная академия ветеринарной медицины имени Н.Э. Баумана», 2020

Содержание	стр.
Введение.....	4
Основные понятия термодинамики.....	12
Первое начало термодинамики .....	18
Второе начало термодинамики.....	21
Термодинамика биологических систем.....	26
Словарь базовых терминов и определений.....	41
Литература.....	46

## Введение

Проблема происхождения и сущности жизни всегда находилась в центре внимания философии и естествознания. В объяснении феномена жизни возникли две противоположные точки зрения – механицизм или материалистическая и витализм или идеалистическая.

Механицизм (от греческого *mechané* - орудие, сооружение) объяснял жизнь исходя из механических или физических форм движения и превращения материи. Механицизм отвергал противопоставление живого и неживого, исходя из того, что биологические явления полностью объяснимы физико-химическими закономерностями. Жизнь представлялась совокупностью физических и химических процессов, которые протекают на статичных, неизменных структурах. В этой трактовке отсутствовала идея развития, эволюции. Живой организм рассматривался как сложный физико-химический механизм, работающий в заданном режиме. Механицизм был популярным в 17-18 веках, в настоящее время представляет исторический интерес.

Успехи физики и химии в конце 19 и в начале 20 веков, открытия свойств и законов движения неорганических тел в живой природе способствовали

возникновению и развитию физикализма, как естественнонаучного мировоззрения. По Н.С. Юлиной (2011), физикализм - определенная позиция в философии сознания, предполагающая, что все события и отношения, в том числе ментальные, являются проявлениями физических событий и отношений.

Для физикализма, как и для механицизма в целом, также характерно отрицание специфики биологических объектов. Сложное сводится к более простым элементам, целое - к сумме его частей. По представлениям физикалистов жизнь развивается в ходе физико-химических процессов. Сложнейшие биологические процессы сначала сводятся к простым химическим, а те, в свою очередь, сводятся к еще более простым - физическим. Биологическая жизнедеятельность рассматривается процессами обмена веществ и энергии по химическим и физическим законам. Достоинством физикализма было то, что он пробуждал стремление к эмпирическому знанию, как основе научного познания. Показательным является высказывание известного австрийского физика Эрвина Шредингера: «Живая материя, хотя она и не отклоняется от установленных к настоящему времени физических законов, вероятно, подчиняется и другим, еще не открытым физическим законам, которые, когда они будут ясно показаны,

составят такую же неотъемлемую часть физики, как и первые».

Возникшие в 20 веке квантовая физика, кибернетика, теории информации способствовали более полному объяснению сложных материальных взаимодействий в природе и живых организмах. Но сама по себе физико-химическая интерпретация жизненных реакций не давала в прошлом и не дает сейчас ответа на вопрос: где кончается неживая природа и начинается живая?

Витализм - концепция, корни которой уходят в классическую древность. Великий античный философ Аристотель (IV век до н. э.) ввел понятие «энтелехия», которое противопоставляется «материи» и означает конечную причину, цель, идею о совершенстве формы организма, которая и управляет развитием. По определению Аристотеля живой природе присуща «цель в самой себе».

Витализм (от латинского *vitalis* - жизненный, живой) утверждает, что живое не сводится только к физико-химическим явлениям, в нем действуют еще и особые «жизненные силы». Шталь, автор виталистической теории в медицине, считал главным для живого организма - его душу, именно она управляет телом и не допускает его распада.

На фоне выдающихся открытий в области физики и химии в 19 веке виталисты начали терять свои позиции. В 1828 году Ф. Велер синтезировал из неорганических веществ мочевины – азотсодержащее органическое вещество животного происхождения, и тем самым нанес ощутимый удар по виталистам, утверждавшим, что органические вещества могут возникать только с помощью «жизненной силы». Не меньшее значение имели исследования немецкого физиолога Макса Рубнера, в которых он установил, что закон сохранения энергии действует и в органическом мире.

В начале 20 века система витализма наиболее полно была изложена Хансом Дришем – немецким биологом и философом, открывшим эмбриональные регуляции - процессы восстановления нормального развития целого зародыша или зачатка после его естественного или искусственного нарушения. Он сформулировал закон, согласно которому динамика развития каждой части зародыша зависит от ее места в целостном организме. Дриш утверждал, что живой организм отличается от машины прежде всего тем, что способен к само регенерации и само воспроизводству, а также к сохранению обычной формы при изменении условий внешней среды. По его словам, развитие организма не сводится к реализации пред-



установленного, заранее спланированного экстенсивного (пространственного) разнообразия, как утверждали механицисты, а происходит переход интенсивного (непространственного) разнообразия в экстенсивное. Такой переход свойствен только живым системам и осуществляется под действием специфически витального фактора - энтелехии. Таким образом, Дриш наделил все живое энтелехией, которую рассматривал как силу, обуславливающую существование и развитие организма, и которой приписывал функцию отбора из всех потенциальных путей развития. Разум, по его представлениям, также есть проявление энтелехии [1].

Положительное значение витализма состояло в критике механистических взглядов на биологическую причинность, в стимулировании работ по биологической жизнедеятельности.

В современном обществе роль науки неоспорима, она стала непосредственной производительной силой общества. Вместе с тем радикально изменяется и сама система научного познания. Развиваются комплексные и междисциплинарные исследования, появляются новые способы и методы познания, методологические установки. В картине мира выделяются элементы, характеризующиеся сложностью организации, ранее не поддававшиеся математиче-

скому моделированию. Одно из таких новых направлений в современном естествознании представлено синергетикой.

Синергетика – новая научная дисциплина, наука о самоорганизации и устойчивости структур различных сложных неравновесных систем: физических, химических, биологических и социальных. С развитием такого системного подхода и современного учения о самоорганизации причины специфической живой организации стали искать не во внешних силах, а в самопроизвольно возникающих новых свойствах сложных систем. «Живое состояние» представляется как естественное свойство наиболее сложно организованной материи. Нарастающий уровень сложности в организации органических молекул и является той гранью, за которой возникает новое качество – живое состояние материи. Нельзя не согласиться с утверждением: «Сущность жизни есть функция определенной материальной организации» [4]. Определение такого порогового уровня организации органических молекул и представляется главной задачей биологической химии. Другими словами, необходимо понять, каким образом минимальное количество «неживых» органических молекул и за счет каких физико-химических взаимодействий между собой определяют «живое состояние».

В этом и заключается физико-химическая сущность жизни.

Нашу планету населяют разнообразные углеродные формы жизни. Не устранены разногласия относительно того, что считать живой материей, организмом, пороговым уровнем организации молекул, за которым начинается жизнь. За время существования человечества для ответа на эти вопросы использовались различные подходы.

Современная биология дает определение жизни, в основном перечисляя характерные черты или свойства живой материи, среди которых основополагающей, безусловно, является метаболизм. Обмен веществ и энергии или метаболизм есть не что иное, как совокупность всех физико-химических процессов происходящих в организме. Таким образом, физические явления и химические реакции, происходящие между органическими молекулами, и лежат в основе биологической жизнедеятельности. Поэтому законы термодинамики и принципы химической кинетики можно считать основополагающими в «способах существования белковых тел».

### **Основные понятия термодинамики.**

*Термодинамика* – наука, изучающая взаимные превращения различных видов энергии, связанные с переходом энергии между телами в форме тепла и работы.

Термодинамика состоит из двух основных разделов:

- физическая термодинамика, изучающая наиболее общие законы превращения энергии;
- химическая термодинамика, предметом изучения которой является превращения различных видов энергии при химических реакциях, т.е. химической энергии.

Химическая термодинамика изучает не только соотношения между химической и другими видами энергий, но исследует возможности и предел самопроизвольного протекания химического процесса в конкретных условиях, а также состояние химического равновесия и условия его смещения. Таким образом, химическая термодинамика позволяет предсказывать возможные направления и сознательно управлять физико-химическими процессами, лежащими не только в основе химического производства, но и в жизнедеятельности организмов.

Объектом изучения в термодинамике является термодинамическая система. Это тело или совокупность тел, которое может обмениваться энергией и

веществом с другими телами. Термодинамическая система условно выделяется в окружающем пространстве для более удобного рассмотрения процессов, протекающих в ней. В термодинамике системы разделяются на виды:

1. *Изолированная система* – это система, которая не обменивается с окружающей средой ни массой, ни энергией (сосуд Дюара). Изолированная система со временем переходит в состояние термодинамического равновесия. В этом состоянии, как и в стационарном, параметры системы остаются неизменными. Переход системы из одного равновесного состояния в другое равновесное состояние называется термодинамическим процессом.

2. *Закрытая система* – это система, которая обменивается с окружающей средой только энергией (любое тело, отдающее теплоту окружающей среде или принимающее ее из среды).

3. *Открытая система* – это система, которая может обмениваться с другими системами и массой, и энергией.

Состояние системы определяется термодинамическими параметрами состояния – температурой  $T$ , давлением  $P$ , концентрацией  $C$ , объемом  $V$ , массой  $m$ . Кроме того система характеризуется такими величинами как внутренняя энергия  $U$ , энтальпия  $H$ ,

энтропия  $S$ , энергия Гиббса  $G$ . Перечисленные свойства системы зависят от температуры, давления, концентрации, но не зависят от механизмов путей процесса, определяются только конечным и начальным состояниями системы, и поэтому их можно считать функциями состояния системы.

*Термодинамические функции состояния* – это любые переменные физические величины, значения которых определяются через термодинамические параметры. Их величины зависят только от начального и конечного состояния системы и не зависят от пути перехода из одного состояния в другое.

Если параметры системы при взаимодействии ее с окружающими телами сохраняются с течением времени, то состояние системы называется стационарным.

*Термодинамическим процессом* называется изменение состояния термодинамической системы, сопровождающееся изменением хотя бы одного из параметров во времени. В зависимости от условий перехода системы из одного состояния в другое в термодинамике различают следующие процессы:

- *изотермические*, происходящие при постоянной температуре:  $T = \text{const}$ ;
- *изобарные*, протекающие при постоянном давлении:  $P = \text{const}$ ;

- *изохорные*, протекающие при постоянном объеме:  $V = \text{const}$ .

- *адиабатные*, протекающие в условиях полного отсутствия теплообмена с окружающей средой.

Для идеального газа изотермический процесс описывается законом Бойля — Мариотта: *при постоянной температуре и неизменных значениях массы газа и его молярной массы, произведение объема газа на его давление остаётся постоянным.*

$$\text{Уравнение изотермы: } P_1 V_1 = P_2 V_2$$

Классическим примером изотермического процесса является кипение жидкости или плавление твердого тела при постоянном давлении. При изотермическом процессе системе подводится или отводится определенное количество теплоты и совершается внешняя работа.

Поведение идеального газа при изобарном процессе подчиняется закону Гей-Люссака: *при постоянном давлении и неизменных значениях массы газа и его молярной массы, отношение объема газа к его абсолютной температуре остаётся постоянным.*

$$\text{Уравнение изобары: } V_1 / T_1 = V_2 / T_2$$

Простейшие примеры изобарных процессов — нагревание воды в открытом сосуде, расширение газа в цилиндре со свободно ходящим поршнем. В обоих случаях давление равно атмосферному. Для

осуществления изобарного процесса к системе также надо подводить или отводить теплоту, которая расходуется на работу и изменение внутренней энергии.

Поведение газа при изохорном процессе подчиняется закону Шарля: *при постоянном объёме и неизменных значениях массы газа и его молярной массы, отношение давления газа к его абсолютной температуре остаётся постоянным.*

$$\text{Уравнение изохоры: } P_1 / T_1 = P_2 / T_2$$

В отсутствие внешних полей (электрического, магнитного и др.) изохорный процесс происходит без совершения какой-либо работы, а изменение внутренней энергии системы равно количеству подведённой теплоты.

При адиабатном процессе давление и объём связаны между собой уравнением Пуассона:

$$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma ,$$

где  $\gamma$ - показатель адиабатического процесса, определятся отношением молярных теплоемкостей газа при постоянном давлении и постоянном объёме.

При адиабатном процессе система может выполнять работу над внешними телами только за счет убыли своей внутренней энергии. Таким образом, *при адиабатном расширении газ совершает работу и сам охлаждается.* Наоборот, *при адиабатном сжа-*



*тии над газом совершается работа и газ нагревается.*

Осуществить адиабатный процесс можно, окружив систему теплоизолирующей оболочкой. Самый простой пример такой системы – сосуд Дьюара (термос). Адиабатным может быть и процесс, протекающий так быстро, что теплообмен с окружающей средой не успевает произойти или настолько мал, что им можно пренебречь. Опыт показывает, что при адиабатном процессе изменяются все три параметра состояния: температура  $T$ , давление  $P$ , объём  $V$ . Например, при быстром сжатии газа его температура повышается, а при быстром расширении — понижается. При адиабатном расширении воздуха его температура может понизиться настолько, что образуется туман. Нагретые слои воздуха от земли быстро поднимаются вверх, расширяются в более холодных слоях и охлаждаются. Так образуются кучевые облака. Нагревание воздуха при быстром сжатии используется в дизельных двигателях для зажигания горючей смеси.

Термодинамика базируется на двух основных законах, получивших название первого и второго начал термодинамики.

## **Первое начало термодинамики**

### **(закон сохранения энергии).**

Первое начало термодинамики, обоснованное Ломоносовым, Майером, Гессом, Джоулем и др. и есть закон сохранения энергии. Этот закон выполняется во всех явлениях природы и подтверждается всеми опытами.

Термодинамика рассматривает преимущественно две формы, в виде которых происходит превращение энергии – теплоту и работу. Первое начало термодинамики и устанавливает соотношение между тепловой энергией ( $Q$ ) и работой ( $A$ ) при изменении общей или внутренней энергии системы ( $\Delta U$ ).

Первое начало термодинамики имеет несколько формулировок, однако все они выражают неуничтожимость энергии и ее эквивалентность. Для тепловых процессов первое начало термодинамики формулируется следующим образом: *Количество теплоты, переданное системе, идет на изменение внутренней энергии системы и совершение системой работы:*

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

Под внутренней энергией системы понимают сумму кинетической и потенциальной энергий частиц, из которых состоит система. Внутренняя энергия является функцией состояния системы и для данного состояния является вполне определенной

величиной.  $\Delta U$  – есть разность двух значений внутренней энергии, соответствующих конечному и начальному состоянию:  $\Delta U = U_2 - U_1$ .

Выражение, обозначающее элементарную сумму внутренней энергии и произведенной работы, называют *энтальпией* и обозначают буквой  $H$ .

Существует и другое определение энтальпии – это свойство вещества, указывающее количество энергии, которую можно преобразовать в теплоту, определяется как:

$$H = U + PV$$

где:  $P$  - давление,  $V$  - объем системы

При постоянном давлении изменение энтальпии равно количеству теплоты, подведенной к системе, поэтому энтальпию часто называют тепловой функцией или теплосодержанием, т.е. это свойство вещества, указывающее количество энергии, которую можно преобразовать в теплоту.

В состоянии термодинамического равновесия энтальпия системы минимальна:

$$\Delta H = \Delta U$$

Энтальпия измеряется в джоулях или калориях. Например: 1 кал нагревает 1 г воды на  $1^{\circ}\text{C}$ .

Количество энтальпии вещества определяется его *данной температурой*. *Данная температура* — это значение температуры, при которой энтальпия ве-

*щества равна нулю.* Другими словами, у вещества нет доступной энергии, которую можно преобразовать в теплоту. Данная температура у различных веществ разная. Например, данная температура воды — это тройная точка ( $0^{\circ}\text{C}$ ), азота  $-150^{\circ}\text{C}$ , а хладагентов на основе метана и этана  $-40^{\circ}\text{C}$  и др. (М.В.Смирнова, 2020).

Если температура вещества выше его данной температуры, энтальпия выражается положительным, а при температуре ниже данной энтальпия вещества выражается отрицательным числом. Энтальпия используется в вычислениях для определения разницы уровней энергии между двумя состояниями. Это необходимо для настройки оборудования и определения коэффициента полезного действия процесса.

Энтальпия является предпочтительным выражением изменения энергии системы во многих химических, биологических и физических измерениях при постоянном давлении, так как это упрощает описание передачи энергии.

## **Второе начало термодинамики.**

Первое начало термодинамики устанавливает количественные закономерности термодинамических процессов, но не устанавливает направлений

происходящих процессов. Второе начало термодинамики, как и первое, является обобщением опытных данных.

Второе начало термодинамики позволяет определить направление превращения энергии, предсказать, какой процесс, и в каком направлении может протекать при данных параметрах термодинамической системы. Важное практическое значение его состоит в том, что оно решает вопросы обратимости и необратимости физико-химических процессов, перехода теплоты в работу и обратно. Зная направление перехода энергии в определенных условиях, всегда можно получить полезную работу.

Существует несколько формулировок второго начала термодинамики:

1. Теплота самопроизвольно не может переходить от тела с меньшей температурой к телу с более высокой температурой (Р.Клаузиус, 1850г.).

2. Невозможен термодинамический процесс, единственным результатом которого было бы превращение теплоты в работу вследствие охлаждения одного тела (У.Томсон, 1851г.).

Смысл второго начала термодинамики заключается в том, что все процессы превращения протекают с рассеиванием некоторой энергии в виде тепла.

Можно предположить, что превращение различных видов энергии в теплоту приводит к обесцениванию энергии. Но тепло, как один из видов энергии, в зависимости от температурных условий имеет различную ценность. Например, понижение температуры системы может быть связано с переходом некоторого количества тепла в работу и ценность которого будет гораздо выше остальной, не подвергавшейся превращению теплоты. В связи с этим, для определения меры необратимого рассеяния энергии, в 1865 году Р. Клаузиусом было введено понятие *энтропии* ( $S$ ), как приведенной теплоты:

$$S=Q/T.$$

Разница в энтропии двух состояний термодинамической системы ( $\Delta S$ ) равна отношению количества тепла, затраченного на то, чтобы изменить первоначальное состояние ( $\Delta Q$ ), к температуре, при которой происходит изменение ( $T$ ):

$$\Delta S = \Delta Q/T.$$

Например, чтобы растопить лед, требуется отдать ему некоторое количество тепла. Чтобы узнать, как изменилась энтропия в процессе таяния, нам нужно будет поделить это количество тепла (оно будет зависеть от массы льда) на температуру плавления льда по Кельвину ( $0^{\circ}\text{C} = 273,15 \text{ K}$ ). Отсчет идет от абсолютного нуля по Кельвину ( $- 273^{\circ} \text{C}$ ), по-

скольку при этой температуре энтропия любого вещества равна нулю. Так как обе величины положительны, при подсчете мы увидим, что энтропии стало больше. А если провести обратную операцию — заморозить воду (то есть, забрать у нее тепло), величина  $\Delta Q$  будет отрицательной, а значит, и энтропии станет меньше.

Энтропия, есть мера необратимого рассеяния энергии, которая представляет собой функцию состояния термодинамической системы. С точки зрения физики энтропия представляет собой меру неупорядоченности системы, меру хаоса. Так, при кристаллизации раствора, переходе его в организованное кристаллическое состояние энтропия системы убывает. Таким образом, уменьшение энтропии говорит об увеличении упорядоченности. В изолированной системе для обратимых процессов энтропия остается постоянной, а для необратимых процессов энтропия возрастает. В результате физического или химического процесса всегда происходит изменение энтропии, оно показывает, какое количество энергии беспорядочно рассеивается в окружающую среду в виде тепла при определенной температуре. В связи с этим третью формулировку второго закона термодинамики можно свести к следующей:

3. В изолированных системах энтропия не может уменьшаться ни при каких процессах. Для любых процессов  $\Delta S \geq 0$  - уравнение Клаузиуса (закон неубывания энтропии).

Второй закон термодинамики нельзя применять ко всем явлениям и процессам нашего мира. Пример привел сам Клаузиус: он считал, что энтропия Вселенной постоянно растет, а потому когда-нибудь неизбежно достигнет своего максимума — «тепловой смерти». Эту гипотезу опровергли в 20-х годах прошлого столетия, когда американский астроном Эдвин Хаббл доказал, что Вселенная расширяется, а значит, ее нельзя назвать изолированной термодинамической системой.

1872 году австрийский физик Людвиг Больцман вывел новую формулу, позволяющий рассчитывать абсолютное значение энтропии. Она выглядит так:

$$S = k * \ln W$$

где:  $S$  — энтропия;  $W$  — статистический вес состояния  $k$  — константа Больцмана. Её значение в Международной системе единиц СИ равно  $1.38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К.

Благодаря этой формуле энтропия стала трактоваться как мера упорядоченности системы. Статистический вес состояния ( $W$ ) — это число способов, которыми можно его реализовать. Например, если



представить свой рабочий стол, не трудно понять, сколькими способами на нем можно навести относительный порядок и сколькими - полный беспорядок. Получается, что статистический вес «хаотичных» состояний гораздо больше, значит больше и их энтропия. В этом контексте новый смысл приобретает и второй закон термодинамики: процессы не могут самопроизвольно протекать в сторону увеличения порядка. Таким образом, чем больше упорядоченность в системе, тем меньше ее термодинамическая вероятность, и, следовательно, тем меньше энтропия.

Со времен появления формулы Больцмана термин «энтропия» проник практически во все области науки и оброс разными парадоксами. Главный парадокс, идущий вразрез со вторым началом термодинамики — это существование и функционирование живых существ.

### **Термодинамика биологических систем**

Термодинамика биологических систем – это раздел биофизики, изучающий трансформации энергии в живых организмах.

Живой организм – это термодинамическая система, состоящая из многочисленных компонентов, свойства и способы взаимодействия которых весьма

сложны и недостаточно изучены. Кроме того, в биологической термодинамической системе начальные значения параметров, не полностью определяют ее состояние.

С точки зрения термодинамики живые организмы относятся к открытым системам, так как их специфической особенностью является обмен веществ и энергией с окружающей средой. Само существование живого организма и все процессы жизнедеятельности в нем тесно связаны с изменением энергетического баланса в системе “живой организм – среда”.

Так обмен веществ сопровождается процессами превращения энергии, т.е. обмен энергии и вещества представляет единый процесс, лежащий в основе жизнедеятельности.

Живой организм расходует химическую энергию питательных веществ, превращая этот вид энергии в энергию всех рабочих процессов, и выделяет избыточное количество тепла, поэтому термодинамические методы широко используются при изучении процессов жизнедеятельности живых организмов.

Но рассматривать живой организм только как открытую систему не совсем правомерно, так как он отличается от других открытых систем рядом признаков:

1. Живые организмы являются особой формой существования белковых тел.
2. Они способны к самовоспроизведению.
3. Они способны к саморазвитию.

Именно биологические особенности развития и функционирования живого организма определяют строгую организацию и скоординированность разнообразных и многочисленных реакций обмена веществ.

Не смотря на всю сложность биологических систем, энергетические процессы, происходящие в живых организмах, в целом универсальны, достаточно консервативны и подчиняются общим законам термодинамики. На основании этих законов можно:

- предусмотреть, возможен ли данный процесс, и в каком направлении он будет развиваться;

- рассчитать энергетические превращения в живом организме, отдельных его системах и органах в покое и при совершении работы;

В живом организме работа совершается за счет изменения внутренней энергии, которое происходит благодаря различного рода биохимическим процессам. Живой организм не может работать по принципу тепловой машины за счет поступления тепла извне. В организме благодаря процессам биологического окисления органических молекул высвобождает

ется химическая энергия, часть которой превращается в тепло, а часть затрачивается на обеспечение жизнедеятельности и процессов синтеза. Более 40% этой энергии запасается в макроэргических связях нуклеозидтрифосфатов (АТФ). При разрыве этих связей также высвобождается энергия, за счет которой совершается полезная работа и вновь выделяется тепло. Следовательно, первый закон термодинамики применим к биологическим системам.

Таким образом, в живых организмах источником работы является химическая энергия, которая переходит в работу и теплоту. Процесс рассеивания теплоты в целом, другие физико-химические процессы, происходящие в организме, необратимы и, следовательно, протекают с увеличением энтропии. Однако постоянное увеличение энтропии биологических систем неразрывно связано с повышением температуры тела организма и неминуемо должно приводить к его гибели. Процессы же, при которых энтропия уменьшается, самопроизвольно протекать не могут, т.е. термодинамически невозможны.

Для объяснения этой парадоксальной ситуации необходимо помнить, что уникальность биологической структуры состоит не только в том, сколько энергии в ней содержится и насколько изменилась энтропия при ее образовании, а и в том, что эта

структура имеет такие качественные особенности, которые позволяют ей выполнять конкретные биологические функции. Энергетический обмен организован таким образом, что могут совершаться не только возможные, но и невозможные с термодинамической точки зрения реакции.

Любая живая клетка, не говоря уже о целом организме, со всеми ее липидно-бислойными мембранами, молекулами ДНК и уникальными белковыми структурами - это высокоупорядоченная структура, т.е. система, обладающая максимально низкой энтропией. За счет чего существует система с такой низкой энтропией? Этим вопросом в свое время занялся ещё знаменитый Эрвин Шредингер в своей книге «Что такое жизнь с точки зрения физики». Шредингер говорит о жизни, как о закономерном поведении материи, поддерживающем свою упорядоченность за счет извлечения отрицательной энтропии из пищи и солнечного света: «Живой организм непрерывно увеличивает свою энтропию, или, иначе, производит положительную энтропию и, таким образом, приближается к опасному состоянию максимальной энтропии, представляющему собой смерть. Он может избежать этого состояния, то есть оставаться живым, только постоянно извлекая из окружающей его среды отрицательную энтропию.

Отрицательная энтропия — это то, чем организм питается» [7].

Однако, энтропия, как физическая величина, не может быть отрицательной, так как пропорциональна натуральному логарифму числа микросостояний. Другими словами, это все равно, что, например, клочки бумаги соберутся обратно в лист. Тем не менее, понятие «отрицательная энтропия» находит все большее применение в объяснениях функционирования различных термодинамических систем.

Утверждение Шредингера о том что, «отрицательная энтропия – это то, чем организм питается», условно можно считать правильным применительно к растительным организмам. Зеленые растения для повышения энергетического потенциала используют солнечную энергию, т.е. непрерывно поглощают свободную энергию из окружающей среды, тем самым уменьшая энтропию организма. Животный организм питается углеводами, жирами и белками, молекулы которых, как известно, представляют собой высокоупорядоченные и высокоорганизованные структуры. Несмотря на то, что эти вещества и обладают сравнительно низкой энтропией, но учитывая, что любой организм выделяет в окружающую среду гораздо более простые вещества с большей энтропией, в конечном итоге происходит постепенное

увеличение энтропии организма в целом. Таким образом, для объяснения основного парадокса термодинамики – существования и функционирования живых существ необходимо более детальное рассмотрение особенностей протекания физико-химических процессов происходящих в живом организме.

Все химические реакции в природе сопровождаются образованием либо разрывом химических связей. Расщепление связей всегда сопровождается с выделением, а образование – с поглощением энергии. Клетки животного организма обладают способностью связывать энергию, высвобождаемую при расщеплении химических связей органических молекул и использовать высвобождаемую энергию для осуществления процессов жизнедеятельности. Как правило, реакции образования химических связей сопряжены с процессами синтеза, т.е. образования новых органических молекул. Следовательно, реакции синтеза сложных химических соединений представляют собой одну из форм упорядочивания материи и снижения энтропии. Реакции синтеза, как способ связывания энергии в структурах живой материи, сопровождается накоплением биомассы.

Особенностью биологических систем является то, что в определенных структурах клеток для теп-

лообмена и осуществления жизненных процессов расходуется только часть энергии расщепления химических связей в сложных органических молекулах. В результате образуется свободная химическая энергия.

*Жизнедеятельность живых существ и функционирование живой материи напрямую зависят от способов использования свободной энергии и накопления биомассы.*

При протекании химических реакций одновременно реализуются два направления: стремление простых частиц объединиться в более сложные и стремление сложных частиц к распаду на более простые. Они не зависят друг от друга и их величины противоположны, и процесс идет в сторону той реакции, при которой изменение величины больше. Разность между этими величинами и определяет свободную энергию реакции при постоянных значениях температуры и давления.

С точки зрения физики, свободная энергия или Энергия Гиббса  $G$  – это та часть всей энергии системы, которую можно использовать для совершения максимальной работы. Различают также энергию Гельмгольца  $A$  - часть внутренней энергии системы, также определяющая работоспособность и которая может быть применена для совершения максималь-



ной работы. Ее изменение в реакции определяется разностью сумм энергий Гиббса конечных продуктов реакции и исходных веществ:

$$\Delta G = G_{\text{кон}} - G_{\text{исх}}$$

При постоянных температуре и давлении изменение энергии Гиббса связано с энтальпией и энтропией следующим выражением:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

Характер изменения энергии Гиббса позволяет судить о принципиальной возможности осуществления процесса. Если  $\Delta G$  отрицательно ( $\Delta G < 0$ ), то реакция протекает самопроизвольно в прямом направлении. Если  $\Delta G$  равно нулю ( $\Delta G = 0$ ), то реакция находится в равновесном состоянии. Если  $\Delta G$  положительно ( $\Delta G > 0$ ), то реакция протекать самопроизвольно в прямом направлении не может. Иными словами, если энергия Гиббса в исходном состоянии системы больше, чем в конечном, то процесс принципиально может протекать, если наоборот - то не может. Классическим определением энергии Гиббса является выражение:

$$G = U + PV - TS$$

где:  $U$  - внутренняя энергия,  $P$  - давление,  $V$  - объем,  $T$  - абсолютная температура,  $S$  - энтропия.

К биохимическим реакциям, при которых энтропия уменьшается, а свободная энергия увеличивается, относятся биосинтез различных веществ,

работа систем активного транспорта и т.д. Протекание таких реакций оказывается возможным благодаря механизму так называемого энергетического сопряжения, т.е. взаимосвязанности протекания реакций возможных и невозможных с точки зрения термодинамики. При этом возможная с точки зрения энтропийного критерия реакция обеспечивает энергией реакции термодинамически невозможные. Для осуществления такого энергетического сопряжения необходимы два условия:

1) свободная энергия, даваемая термодинамически возможной реакцией, должна превышать энергию, потребляемую реакцией термодинамически невозможной, то есть должен быть некоторый избыток энергии с учетом вероятных потерь при ее передаче;

2) обе сопрягаемые реакции должны иметь общий компонент [2].

Явление, так называемое, энергетическое сопряжение в биосистемах, осуществляется обычно при участии структурных элементов клетки. Основным примером такого сопряжения являются процессы, происходящие в дыхательной цепи клетки или клеточное дыхание.

Дыхательная цепь представляет собой специфическую систему окислительно-восстановительных ферментов тесно связанные с белками внутренней

мембраны митохондрий и служащие для переноса водорода и электронов от субстрата к кислороду с окислительным фосфорилированием. Дыхательная цепь с окислительным фосфорилированием составляет основу аэробной фазы биологического окисления и является сущностью жизнедеятельности всех аэробных клеток. Несмотря на чрезвычайную сложность организации этой системы с точки зрения физической химии, смысл процессов происходящих в ней весьма прост и объясняется следующим образом: ферменты в дыхательной цепи располагаются таким образом, что при каждой реакции восстановления затрачивается меньше энергии, чем выделяется в предшествующей реакции окисления. Создается свободная химическая энергия которая используется для окислительного фосфорилирования АДФ с образованием АТФ. Около 60% энергии, высвобождаемой в дыхательной цепи в результате окислительно-восстановительных реакций, используется для фосфорилирования АДФ с образованием АТФ. 40% выделяемой энергии рассеивается в виде тепла. АТФ, аденозинтрифосфат – макроэргическое, т.е. богатое химической энергией соединение, используемое в дальнейшем для совершения самой разнообразной работы.

Из всего вышеизложенного вытекает, что использование энтропии как меры упорядоченности применительно к биосистемам нельзя считать лишённым смысла и не случайно, в течение длительного времени считали, что второй закон термодинамики неприменим к биологическим системам.

Законы термодинамики были разработаны для изолированных систем, а живой организм является открытой системой. Теория открытых систем была создана австрийским биологом Людвигом фон Берталанфи в 30-х годах прошлого столетия. Открытая система, говорил он, - это система, которая имеет вход и выход, обменивается с окружающей средой веществом и энергией и поддерживает внутреннее равновесие. Берталанфи успешно применил принцип теории открытых систем для анализа ряда биологических проблем – тканевого питания, соотношения обмена веществ и роста у животных, эмбрионального развития и др. Живой организм в здоровом состоянии поддерживает равновесие в форме постоянной температуры тела независимо от температуры окружающей среды. Как биолога его больше интересовали процессы нарушения внутреннего равновесия организма, и процессы поддержания равновесия - гомеостазис.

В этом же направлении работал И.Р. Пригожин — бельгийский физик и химик российского происхождения. Он на основе изучения открытых систем в 1945 г. сформулировал принцип минимума производства энтропии. В стационарном состоянии скорость возрастания энтропии, обусловленной протеканием необратимых процессов, имеет положительное и минимальное из возможных значений. Это положение получило название теоремы Пригожина. Суть теоремы Пригожина заключается в том, что стационарное состояние, к которому необратимо стремится открытая линейная термодинамическая система, должно отличаться тем, что в нём перенос энтропии или рассеивания энергии в окружающую среду бывает минимальным настолько, сколько позволяют наложенные на систему граничные условия. Живой организм всегда стремится работать на наиболее выгодном энергетическом уровне.

Важность этого положения ярко описал биоэнергетик А. Качальский: "Этот замечательный вывод проливает свет на мудрость живых организмов. Жизнь - это постоянная борьба против тенденции к возрастанию энтропии. Синтез больших, богатых энергией макромолекул, образование клеток с их сложной структурой, развитие организации - все это мощные антиэнтропийные факторы. Но поскольку,

согласно второму закону термодинамики, справедливому для всех явлений природы, избежать возрастания энтропии нельзя, живые организмы избрали наименьшее зло - они существуют в стационарных состояниях, для которых характерна минимальная скорость возрастания энтропии".

Стремление энтропии к минимальной величине ведет к тому, что при любом отклонении от стационарного состояния в системе наступают такие внутренние изменения, которые будут стремиться вернуть её к минимуму производства энтропии и приближать систему к стационарному состоянию. Система самонастраивается на наиболее выгодный, устойчивый термодинамический режим функционирования.

Отклонения от стационарного состояния или неравновесные процессы в открытых системах, и изучает термодинамика Пригожина. Классическую термодинамику Пригожин назвал теорией "разрушения структуры", что означает разрушение упорядоченности системы и как следствие повышение энтропии. С этой точки зрения теория Пригожина, несомненно, теория "создания структуры". Объединив оба подхода, он дал четкую естественнонаучную формулировку конструктивной роли необратимых процессов на всех уровнях природы и предло-

жил основы будущей всеобщей теории формообразования. Необратимость была введена в уровень фундаментальных законов физики.

Следовательно, основным отличительным признаком живой системы, является свойство, заключающееся в способности к связыванию свободной энергии и накоплению связанной энергии в биомассе, а также к удержанию системы в неравновесном состоянии, в которое система приходит вследствие накопления избыточной энергии.

В чем же заключается природа состояния неравновесности, в которое живая система приходит вследствие накопления избыточной энергии и природа «сдерживающего условия», позволяющего поддерживать систему в состоянии неравновесности? И. Пригожин отмечал: «сильно неравновесные необратимые процессы могут быть источником когерентности, т.е. самим условием образования огромного множества типов структурированного коллективного поведения» [3].

Неравновесность молекулярной структуры живого заключается в совершении когерентного движения молекул, участвующих в процессе связывания свободной энергии. Мертвая клетка, имеющая полный набор необходимых органелл, имеющая одинаковую с живой клеткой физическую структуру и хи-

мический состав, не имеет возможности возврата в живое состояние, вследствие того, что клетка перестала быть единым целым и оказалась в качестве разрозненного набора структурных компонентов.

Таким образом, основным признаком биологической системы можно считать ее способность к связыванию свободной энергии и накоплению биомассы, а также к удержанию системы в неравновесном состоянии. Следовательно, пороговым уровнем организации органических молекул, за которым начинается «живое состояние», можно считать такое минимальное количество органических молекул, за счет физико-химического взаимодействия которых реализуется жизнедеятельность.

### *Словарь базовых терминов и определений*

**Биологическая жизнедеятельность** – совокупность процессов, протекающих в живом организме, служащих поддержанию в нём жизни и являющихся проявлениями жизни. Для жизнедеятельности характерен обмен веществ и поддержание гомеостаза. Жизнедеятельность может заключаться как в активном перемещении в пространстве для поддержания обмена веществ и более сложных действиях, так и в неподвижном существо-



вании с обменом питательными веществами со внешней средой.

**Внутренняя энергия** - калорический параметр, характеризующий совокупность энергии теплового движения микрочастиц системы.

**Время** – в философии: объективная форма существования материи; в физике – продолжительность протекания какого-либо процесса.

**Давление** – физическая величина, характеризующая напряженное состояние сплошных сред, численно – это интенсивность нормальных сил, с которыми одно тело действует на поверхность другого.

**Движение** – в философии: форма существования материи; в физике: изменение положения тела или его частей относительно других тел. Движение в пространстве связано с длиной пройденного пути и временем, затраченным на этот путь.

**Длина** – протяжение в том направлении, в котором две крайние точки линии лежат на наименьшем расстоянии друг от друга. Длина отрезка прямой – расстояние между его концами, длина ломанной – сумма длин ее звеньев; длина кривой – предел длины вписанной в нее ломаной, когда число ее звеньев, неограниченно возрастает, причем длина каждого звена стремится к нулю.

Жизнедеятельность организма поддерживается биологическими процессами, составленными из некоторого числа химических, физико-химических и электро-химических реакций, обуславливающих трансформацию их элементов.

**Масса** – в философии: количественная мера материи тела; в физике: мера инертности тела по отношению к действующей на него силе, мера гравитационных свойств тела, а также мера энергосодержания. В СИ за единицу массы принят килограмм (кг).

**Материя** – объективная реальность, существующая независимо от человеческого сознания и отображаемая им. Неотъемлемым свойством материи, всеобщей формой ее существования, является движение в пространстве и во времени.

**Политропный процесс** - обратимый процесс перехода рабочего тела из начального равновесного состояния в конечное равновесное состояние при условии неизменной теплоемкости.

**Работа** - количество энергии, которой термодинамическая система обменивается с окружающей средой в результате макроскопического упорядоченного направленного движения.

**Рабочее тело** - материальное тело, посредством которого в термодинамическом процессе осуществ-

ляется преобразование теплоты в работу или работы в теплоту.

**Равновесное состояние термодинамической системы** - неизменность параметров системы во времени при отсутствии воздействия внешней среды.

**Расстояние** – геометрическое понятие, содержание которого зависит от того, для каких объектов оно определяется. Например, расстояние между двумя точками – длина соединяющего их отрезка прямой; расстояние от точки до прямой (или плоскости) – длина отрезка перпендикуляра, опущенного из этой точки на данную прямую (или плоскость).

**Температура** – скалярная физическая величина, характеризующая тепловое состояние системы. Согласно молекулярно – кинетической теории температура связана с интенсивностью движения микроструктурных частиц материи. Численное значение температуры представляет собой величину отклонения теплового состояния тела от теплового равновесия с другим телом, состояние которого принято за начало отсчета. Шкала для измерения температуры определяется выбранным началом ее отсчета. В настоящее время система единиц СИ предусматривает применение двух температурных шкал: **т е р м о д и н а м и ч е с к у ю** (абсолютную шкалу) и **м е ж д**

ународную практическую (МПШТ). По первой шкале за начало отсчета условно принимается абсолютный ноль температуры. Единица измерения термодинамической температуры – кельвин, обозначение: Т. По второй шкале за начало отсчета выбрано состояние, соответствующее таянию льда в воде, это 273,15 К. Температуру по этой шкале выражают в градусах Цельсия (0 С) и обозначают t. В ряде стран еще используется внесистемная шкала, выраженная в градусах Фаренгейта (0 F). Пересчет температуры со шкалы Фаренгейта на шкалу Цельсия проводится по выражению  $t = (tF - 32)$  .

**Температурное поле** - совокупность значений температуры во всех точках рассматриваемого пространства в некоторый фиксированный момент времени.

**Теплообмен** – это самопроизвольный необратимый процесс переноса теплоты в пространстве с неоднородным полем температуры.

**Теплота** – один из способов передачи энергии от системы к системе. Процесс передачи теплоты называется теплообменом.

**Термодинамика** – это наука о наиболее общих свойствах макроскопических физических систем, находящихся в состоянии термодинамического рав-

новесия, и о процессах перехода между этими состояниями.

**Удельная газовая постоянная** – физическая величина, равная отношению произведения давления на удельный объем газа к абсолютной температуре.

**Физический закон** – это найденная на опыте и установленная путем обобщения опытных данных количественная или качественная объективная зависимость одних физических величин от других.

**Цикл или круговой процесс** - совокупность термодинамических процессов, в результате осуществления которых рабочее тело возвращается в свое первоначальное состояние.

**Энергия** – это общая количественная мера движения и взаимодействия всех видов материи. Энергия, затраченная системой при перемещении точки вследствие приложения силы 1 Н на расстояние 1 м в направлении действия силы равна 1 Дж, то есть  $1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н} \cdot 1 \text{ м}$ .

**Энтальпия** - калорический параметр термодинамической системы, равный сумме внутренней энергии и потенциальной энергии давления.

**Энтропия** - калорический параметр состояния термодинамической системы (функция состояния), характеризующий направление протекания процесса теплообмена между системой и внешней средой.

## Использованная литература

1. Кондаков И.М. Психология. Иллюстрированный словарь. // И.М. Кондаков. – 2-е изд. доп. и перераб. – СПб.- 2007.- с. 186-187.
2. Курбатова С.В. Избранные главы биофизической и медицинской химии // С.В.Курбатова, Е.А.Колосова, Е.Е.Финкельштейн.- Самара.- 2013.- 39с.
3. Пригожин И. Время, хаос, квант. К решению парадокса времени // И.Пригожин, И.Стенгерс. - М.-2003.- 240 с.
4. Смирнов И. Философия: Учебник для студентов высших учебных заведений. // И.Смирнов, В.Титов. - Издание второе, исправленное и дополненное. – М.- 1998. – 288 с.
5. Чернавский Д.С. Проблема происхождения жизни и мышления с точки зрения современной физики. // Д.С. Чернавский. - Усп. Физ. наук, 2000 (170), 2.-с.157-183.
6. Шноль С.Э. Физико-химические факторы биологической эволюции. // С.Э.Шноль.- М. Наука.- 1979.- 261с.
7. Шредингер Э. Что такое жизнь? Физический аспект живой клетки.// Э.Шредингер.- Москва - Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». -2002.
8. Юлина Н.С. Физикализм: дивергентные векторы исследования сознания // Н.С.Юлина.- Вопросы философии. 2011.- № 9.- С. 153-166.

9. Якупов Т.Р. Биохимия. Учебное пособие  
/ Т.Р.Якупов.- Казань.-2015. –С.110.