УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«ВИТЕБСКАЯ ОРДЕНА «ЗНАК ПОЧЕТА» ГОСУДАРСТВЕННАЯ
АКАДЕМИЯ ВЕТЕРИНАРНОЙ МЕДИЦИНЫ»

И. О. Петроченко, А. М. Курилович, А. Н. Толкач

БИОФИЗИКА. ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕРМОДИНАМИКИ

Методические указания
для студентов факультета ветеринарной медицины
по специальности «Ветеринарная медицина»

Витебск
ВГАВМ
2026

УДК 577.3
ББК 28.07
П31

Рекомендовано к изданию методической комиссией факультета ветеринарной медицины УО «Витебская ордена «Знак Почета» государственная академия ветеринарной медицины» от 30 января 2026 г. (протокол № 2)

Авторы:
старший преподаватель *И. О. Петроченко;*
доцент *А. М. Курилович*;
старший преподаватель *А. Н. Толкач*

Рецензенты:
кандидат биологических наук, доцент *В. П. Баран*;
кандидат сельскохозяйственных наук, доцент *М. В. Рубина*

Петроченко, И.О.

Биофизика. Основы молекулярной физики и термодинамики: П31 методические указания для студентов ФВМ по специальности «Ветеринарная медицина» / И. О. Петроченко, А. М. Курилович, А. Н. Толкач. – Витебск : ВГАВМ, 2026. – 32 с.

ISBN 978-985-591-310-9.

Методические указания разработаны в соответствии с учебной программой по дисциплине «Биофизика» для студентов высших сельскохозяйственных учебных заведений, обучающихся по специальности 7-07-0841-01 «Ветеринарная медицина».

В методических указаниях рассмотрены теоретические вопросы биологической физики по темам «Молекулярная физика» и «Термодинамика биологических систем», изучение которых необходимо для подготовки к практическим занятиям и к экзамену по дисциплине «Биофизика».

УДК 577.3
ББК 28.07

ISBN 978-985-591-310-9

© УО «Витебская ордена «Знак Почета» государственная академия ветеринарной медицины», 2026

СОДЕРЖАНИЕ

Введение 4

1. Молекулярная физика 5
   1.1. Идеальный и реальный газ 5
   1.2. Явления переноса 8
   1.3. Влажность воздуха 11
   1.4. Молекулярные явления в жидкостях 13
2. Термодинамика биологических систем 19
   2.1. Основные положения термодинамики 19
   2.2. Первое начало термодинамики в биологии 25
   2.3. Второе начало термодинамики для биосистем 28

Литература 31

ВВЕДЕНИЕ

Молекулярная физика изучает физические свойства, строение и агрегатные состояния вещества на основе молекулярно-кинетических представлений.

В основе этих представлений лежат следующие положения: любое тело (твердое, жидкое, газообразное) состоит из большого числа частиц – молекул или атомов; молекулы находятся в непрерывном хаотическом движении, интенсивность и характер которого зависят от температуры; взаимодействие между молекулами (притяжение и отталкивание) зависит от вида молекул и расстояний между ними (разные агрегатные состояния). Обоснованность этих положений в настоящее время является полностью доказанной.

Круг вопросов, охватываемых молекулярной физикой, очень широк. В ней рассматриваются: строение вещества и его изменение под влиянием внешних факторов, явления переноса, фазовое равновесие и процессы фазовых переходов, критическое состояние вещества, поверхностные явления на границах раздела фаз.

Термодинамика рассматривает макроскопические системы без учета их молекулярного строения, изучает процессы превращения энергии и направление протекания термодинамических процессов. Термодинамика не дает ответа на вопрос, какова природа или механизм того или иного явления. Она может только показать, реален ли он сточки зрения баланса энергии и энтропии.

В молекулярной физике и термодинамике используются два метода изучения свойств вещества: молекулярно-кинетический (статистический) и термодинамический.

В молекулярно-кинетическом методе законы протекания различных процессов в макротелах устанавливаются в зависимости от механизма взаимодействия отдельных молекул между собой. Физические характеристики отдельных молекул – масса, скорость, концентрация, энергия и другие – после статистической обработки увязываются с параметрами тел – давлением, температурой, объемом и др.

Термодинамический метод, не рассматривая микрочастицы, позволяет описывать макроскопические свойства тел и протекающие в них процессы посредством измерения этих параметров.

Молекулярная физика и термодинамика, которым посвящены данные методические рекомендации, изучают явления, которые связаны с колоссальным количеством содержащихся в телах атомов и молекул. Понятия и законы термодинамики широко используются в химических и биологических дисциплинах, особенно в биохимии и молекулярной биофизике. Таким образом, эти два раздела взаимно дополняют друг друга.

1. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

Молекулярная физика – *раздел физики, изучающий зависимость строения и физических свойств тел от характера движения и взаимодействия между частицами, из которых состоят тела.*

1.1. Идеальный и реальный газ

Газообразное состояние вещества характеризуется относительно большим расстоянием между молекулами, малыми силами притяжения и более значительными силами отталкивания. Соударяясь и взаимно отталкиваясь, молекулы газа стремятся распределиться равномерно по всему предоставленному им объему.

Для изучения основных свойств газов сначала будем считать газ идеальным.

Идеальный газ *– газ, у которого размерами молекул и силами взаимодействия между ними можно пренебречь.*

При условиях, близких к нормальным *($t = 0°C$, $p = 1{,}03 \cdot 10^5 Па$)*, любой газ можно считать идеальным. Например, окружающий нас воздух можно считать идеальным газом в любое время года.

Состояние идеального газа описывается следующими параметрами:

- объемом V, который измеряется в кубических метрах: $[V]=м^3$;
- давлением p, которое измеряется в Паскалях: $[p]=Па$;
-термодинамической температурой T, измеряемой по шкале Кельвина: $[T]=К$.

Она связана с температурой по шкале Цельсия формулой:

$$T = t°C + 273$$

Для описания состояния идеального газа используется уравнение Менделеева-Клапейрона.

Для одного моля идеального газа:

$$p \cdot V_M = R \cdot T, \qquad (1.1)$$

где p – давление;

V_M – молярный объем газа;

R= 8,31 Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная;

Т – термодинамическая температура.

При нормальных условиях молярный объем любого газа равен:

$$V_M = 22{,}41 \cdot 10^{-3} м^3/моль$$

Для любой массы газа ***уравнение Менделеева-Клапейрона*** *имеет следующий вид:*

$$p \cdot V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T, \qquad (1.2)$$

где m – масса газа;

М – молярная масса.

Уравнение Менделеева-Клапейрона справедливо только для достаточно разреженных газов при высоких температурах и низких давлениях.

При понижении температуры и увеличении давления, когда молекулы газа находятся близко друг к другу, пренебрегать размерами молекул и взаимо-

действием между ними уже недопустимо. При таких условиях воздух необходимо считать реальным газом.

Реальный газ *– газ, молекулы которого имеют собственный объем и взаимодействуют друг с другом.*

Для получения уравнения состояния реального газа голландский физик И. Ван-дер-Ваальс ввел в уравнение Менделеева-Клапейрона две поправки к объему и давлению.

Поправка к давлению учитывает силы притяжения между молекулами, когда они находятся близко друг от друга. Действие сил притяжения между молекулами реального газа вызывает добавочное сжатие газа, создавая тем самым внутреннее давление. Поэтому фактическое давление реального газа увеличивается.

Поправка к объему связана с собственным объемом молекул и возникающими силами отталкивания, когда молекулы находятся вплотную друг к другу. Для одного моля реального газа эта поправка равна учетверенному собственному объему молекул. В результате свободный объем, в котором могут двигаться молекулы реального газа, уменьшается.

С учетом этих поправок *уравнение Ван-дер-Ваальса для одного моля реального газа:*

$$\left(p + \frac{a}{V_M^2}\right) \cdot (V_M - b) = R \cdot T, \qquad (1.3)$$

где a и b – постоянные Ван-дер-Ваальса, зависящие от природы газа.

Постоянные a и b для каждого газа имеют конкретные значения, определяемые опытным путем.

Для любой массы газа уравнение Ван-дер-Ваальса:

$$\left(p + \frac{m^2}{M^2} \cdot \frac{a}{V_M^2}\right) \cdot \left(V_M - \frac{m}{M} b\right) = \frac{m}{M} R \cdot T \qquad (1.4)$$

Из уравнения Ван-дер-Ваальса (1.4) можно построить изотермы реального газа при различных температурах (рисунок 1).

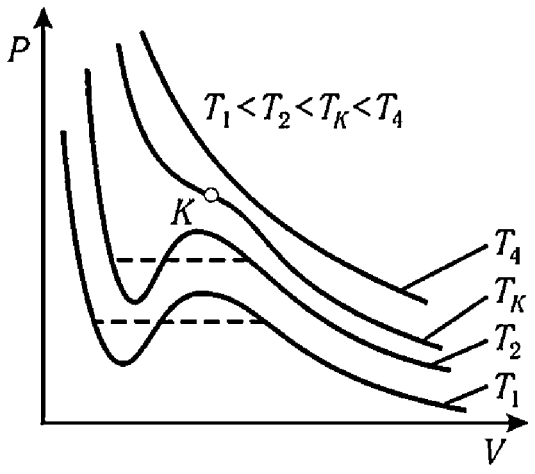


Рисунок 1 –
Изотермы Ван-дер-Ваальса

Как видно из графика вид изотерм зависит от температуры, при которой протекает процесс. При высоких температурах изотермы реального газа практически совпадают с изотермами идеального газа. Это означает, что *при высоких температурах реальный газ при любых изменениях его параметров остается газом.*

При понижении температуры на изотерме возникает точка перегиба K, которую назвали *критической точкой.* Критическая точка характеризует критическое состояние газа с параметрами $p_к$, $V_к$, $T_к$. У каждого газа своя критическая точка, определенная опытным путем.

При приближении к критическому состоянию исчезает различие между газом и жидкостью. *В* ***критической точке*** *реальный газ одновременно находится в трех фазовых состояниях: газ-жидкость-пар.*

При дальнейшем охлаждении газа на изотерме появляется волнообразный участок, который соответствует переходу газа в состояние жидкость-пар. Участок изотермы до волнообразной части соответствует жидкой фазе, а после него – парообразной.

Из графика следует, что газ можно перевести в жидкое состояние только охладив его ниже критической температуры.

Критическая температура $T_к$ *– температура, выше которой газ нельзя превратить в жидкость никаким давлением, а ниже которой можно при некотором давлении.*

Вещество в газообразном состоянии при температуре ниже критической называется ***паром***, а пар, находящийся в равновесии с жидкостью – ***насыщенным паром***.

Следовательно, любой газ можно превратить в жидкость путем сжатия с предварительным охлаждением до температуры ниже критической.

Сжиженные газы используются в медицине и ветеринарии для различных целей: обезболивания, диагностики, лечения и профилактики заболеваний, сохранения органов в процессе трансплантации, стерилизации как ран, так и инструментов. Наибольшее применение они нашли в анестезиологии, пульмонологии, эндоскопии, криотерапиии криохирургии.

Жидкий кислород ($T_к$ = ***-118°C)*** обеспечивает восстановление нормального уровня оксигенации тканей (насыщение кислородом),используется при лечении гипоксии, в условиях интенсивной терапии, при хронических заболеваниях легких, для анестезии, для устранения последствий отравлений, в борьбе с гельминтами и анаэробными инфекциями.

Жидкий углекислый газ ($T_к$***=31°C)*** является эффективным обеззараживающим средством, с помощью которого очищают раневые поверхности, применяют для анестезии, при лапароскопии для создания рабочего пространства внутри брюшной полости, используют для повышения артериального давления, а также в комбинации с кислородом для стимуляции дыхания.

Жидкий азот ($T_к$ = ***-147°C)*** используется при температуре -196°С в криотерапии (для лечения ревматических и воспалительных заболеваний, травм суставов и сухожилий у лошадей, при ламините у КРС), в криохирургии (для лечения наружных и внутренних опухолей, которые могут быть достигнуты криозондами, чаще используется для лечения опухолей кожи и ротовой полости животного) и криоконсервации (для сохранения клеток, тканей, эмбрионов, генетического материала, биопрепаратов).

Ксенон ($T_к$***=17°C)*** обладает антиоксидантными свойствами и используется при температуре -80°С для криоконсервации различных органов, включая сердце, печень, почки и легкие, показывает высокую эффективность для их сохраненияпри трансплантации, сводя к минимуму риск окислительного повреждения клеток.

Криотерапевтические методы обладают рядом преимуществ: локальным замораживанием патологически измененных клеток без повреждения здоровых клеток; минимальными болевыми ощущениями (холод замораживает и нервные окончания); отсутствием потребности в анестезии; отсутствием кровотечения (холодовое воздействие блокирует мелкие и средние артериальные и венозные сосуды); быстрым заживлением операционной раны без образования грубых рубцов и спаек.

1.2. Явления переноса

В результате хаотического движения молекул и соударений между ними происходят непрерывные изменения их скоростей и энергий в веществе. Если в веществе существует неоднородность физических параметров (температуры, плотности, скорости), то на беспорядочное тепловое движение молекул вещества накладывается упорядоченное движение, которое ведет к выравниванию этих неоднородностей. Эти явления называются *явлениями переноса*.

Явления переноса *– это группа явлений, обусловленных хаотическим тепловым движением молекул и приводящих к направленному переносу энергии (теплопроводность), импульса (внутреннее трение) или массы (диффузия).*

Во всех трех явлениях имеется много общего, а именно в веществе происходит направленный перенос какой-либо физической величины из одной части вещества в другую до тех пор, пока она не распределиться равномерно по всему объему.

Диффузия *– перенос массы вещества под влиянием неоднородности плотности.*

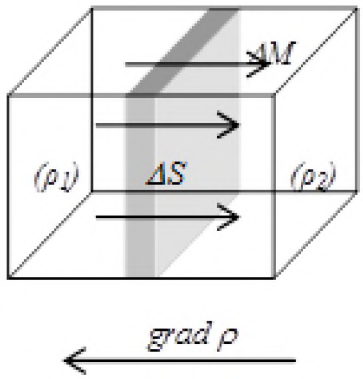


Рисунок 2 – Процесс диффузии

В результате диффузии происходит выравнивание плотности вещества вследствие переноса массы в направлении уменьшения плотности (рисунок 2).

Диффузия происходит во всех агрегатных состояниях (газообразных, жидких и твердых) вещества, но с разной скоростью.

Явление диффузии описывается ***законом Фика:*** *масса вещества, переносимая в результате диффузии через ΔS за время Δt, пропорциональна площади этой площадки, градиенту плотности и времени переноса:*

$$\Delta M = -D \cdot \frac{\Delta \rho}{\Delta x} \cdot \Delta S \cdot \Delta t \,, \qquad (1.5)$$

где D – коэффициент диффузии;

$\Delta\rho/\Delta x$–градиент плотности;

ΔS – площадь поверхности, через которую происходит перенос массы;

Δt – промежуток времени.

Знак «–» показывает, что масса вещества переносится в направлении, противоположном градиенту плотности (рисунок 2).

Повышение температуры ускоряет диффузию, а повышение давления ее замедляет.

Диффузия играет важную роль в процессах жизнедеятельности клеток и тканей животных. Например, диффузия кислорода из легких в кровь и из крови в ткани, всасывание продуктов пищеварения из кишечника, поглощение элементов минерального питания клетками корневых волосков, диффузия ионов при генерировании биоэлектрических импульсов нервными и мышечными клетками.

Особую роль играет диффузия в обмене веществ между клетками и тканевыми жидкостями. За счет диффузии происходит поддержание жизненно важных процессов клетки: непрерывное поступление в нее питательных веществ и одновременное выведение из клетки продуктов метаболизма. Проникновение растворённого вещества в клетку может быть выражено законом Фика, в котором значение коэффициента диффузии заменено коэффициентом проницаемости мембраны, а градиент плотности – разностью концентраций вещества по обе стороны мембраны. Диффузионное проникновение в клетку газов и воды также описывается законом Фика, но при этом значения разности концентраций заменяются значениями разности давлений газов и осмотических давлений внутри и вне клетки.

Теплопроводность *– это перенос тепла под влиянием разности температур.*

Если в различных частях объема вещества была разная температура и эта разница перестала поддерживаться, то в результате теплопроводности происходит постепенное выравнивание температуры за счет переноса молекулами своей кинетической энергии. Теплопроводностью обладают и газы, и жидкости, и твердые тела.

Закон теплопроводности был сформулирован ***Фурье:***

Теплота ΔQ, переносимая в результате теплопроводности через некоторую площадку, пропорциональна градиенту температуры ΔT/Δx, площади ΔS и промежутку времени Δt, в течение которого происходит перенос:

$$\Delta Q = -\chi \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \cdot \Delta S \cdot \Delta t, \qquad (1.6)$$

где χ – коэффициент теплопроводности;

ΔS – площадь поверхности, через которую происходит перенос тепла;

$\Delta T/\Delta x$ – градиент температуры;

Δt – промежуток времени.

Знак «–» показывает, что теплота переносится в направлении, противоположном градиенту температуры.

Сельскохозяйственные животные относятся к теплокровным животным, соответственно для протекания нормального обмена веществ им необходимо поддерживать температуру тела в показателях, соответствующих физиологической норме, несмотря на изменения температуры окружающей среды. Температура тела в норме у взрослых животных составляет: у крупного рогатого скота – 37,5-39,5°С, свиней – 38-40°С, овец – 38,5-40,0°С, коз – 38,5-40,5°С, лошадей – 37,5-38,5°С. Снижение температуры тела ниже 24°С и повышение более 44°С влекут за собой гибель животных.

Одним из способов терморегуляции организма, который предохраняет его от перегрева или переохлаждения, является теплопроводность. Она способствует выравниванию температур в различных его частях, оставляя небольшой градиент между поверхностью кожи и внутренними органами и тканями. Значительная теплопроводность мышечной ткани, в которой находится много кровеносных сосудов, позволяет быстро переносить тепло от внутренних органов к наружным, предохраняя их от перегрева. Кожа и подкожная жировая клетчатка имеют низкую теплопроводность и являются для организма теплоизолирующим слоем, который препятствует потере тепла организмом при низких температурах. Аналогичную роль у животных играет волосяной покров и слой воздуха между волосами.

Внутреннее трение (вязкость) *– явление возникновения силы внутреннего трения при движении слоев газа или жидкости относительно друг друга.*

Слой, имеющий большую скорость и, следовательно, больший импульс, будет передавать его слою, имеющему меньшую скорость и меньший импульс. В результате этого более быстрый слой будет замедляться, а более медленный – ускоряться. Следовательно, импульс переносится от более быстрого слоя к более медленному слою, что приводит к выравниванию скоростей.

Между соприкасающимися слоями возникает сила внутреннего трения, которая определяется по ***закону Ньютона***:

$$F = -\eta \cdot \frac{\Delta v}{\Delta x} \cdot S, \qquad (1.7)$$

где η– коэффициент динамической вязкости;

S – площадь соприкасающихся слоев;

$\Delta v/\Delta x$ – градиент скорости.

Знак «–»указывает на то, что сила внутреннего трения направлена в сторону, противоположную градиенту скорости.

Внутреннее трение присуще всем биологическим жидкостям в организме животных и оказывает значительное влияние на работу всех органов и систем.

Например, вязкость крови влияет на кровообращение. Повышенная вязкость крови приводит к тому, что сердечной мышце приходится затрачивать больше усилий на продвижение крови по сосудам. Также существенно увеличивается нагрузка на печень, почки и селезенку. В результате возможно развитие патологии сердца, печени и почек.

Кроме этого, более вязкая кровь медленнее движется по сосудам, следовательно, медленнее доставляет кислород к клеткам. Как следствие возникает кислородное голодание (гипоксия) органов и тканей. Длительная острая гипоксия может приводить к необратимым процессам в системах и органах организма (сердце, головной мозг). Одним из наиболее характерных симптомов хронической гипоксии является одышка (затруднённое дыхание на вдохе или выдохе), а также синюшность кожи и слизистых оболочек.

1.3. Влажность воздуха

С поверхностей океанов, морей, озер и рек происходит непрерывное испарение воды, поэтому в атмосфере Земли всегда содержится водяной пар.

Величина, характеризующая содержание водяных паров в атмосфере, называется ***влажностью воздуха.***

Влажность воздуха является одной из наиболее существенных характеристик погоды и климата.

Для количественной оценки влажности воздуха используют ***абсолютную*** и ***относительную влажность.***

Абсолютной влажностью f *называется масса водяных паров, содержащихся в 1 м^3 воздуха при данной температуре:*

$$f = \frac{m}{V} \qquad (1.8)$$

Значение абсолютной влажности оценивается по плотности водяного пара в воздухе. Для удобства вычислений плотность выражают не в единицах системы СИ, а в граммах на кубический метр: $[f] = \text{г/м}^3$.

В животноводческих помещениях абсолютная влажность колеблется от 4 до 12г/м^3 воздуха.

Максимального значения абсолютная влажность достигает тогда, когда водяные пары, содержащиеся в воздухе, становятся насыщающими.

Максимальная влажность f_m *– это наибольшее количество водяных паров, которое может содержаться в 1 м^3 воздуха, насыщающих воздух при данной температуре.*

Дефицитом насыщения *называют разность между максимальной и абсолютной влажностью при данной температуре.* Чем больше дефицит насыщения, тем суше воздух и наоборот. Этот показатель в помещениях для сельскохозяйственных животных колеблется от 0,2 до 7,2 г/м^3.

Максимальную влажность можно определить по точке росы.

Точка росы *– температура, при которой водяные пары, находящиеся в воздухе достигают насыщения и переходят в жидкое состояние.*

Она соответствует началу конденсации водяного пара. При конденсации водяного пара в атмосфере образуются облака, на поверхности земли – роса, а в приземном слое воздуха – туман.

Абсолютная, максимальная влажность, дефицит насыщения и точка росы прямо пропорциональны температуре.

Для определения,в какой степени влажность воздуха близка к насыщению, используется относительная влажность.

Относительной влажностью *называется отношение абсолютной влажности к максимальной, выраженное в процентах:*

$$B = \frac{f}{f_m} \cdot 100\% \qquad (1.9)$$

Рассчитать относительную влажность можно и по давлению:

$$B = \frac{\text{p}}{\text{p}_\text{н}} \cdot 100\%, \qquad (1.10)$$

где p – давление водяного пара, содержащегося в воздухе;

$\text{p}_\text{н}$ – давление насыщенного пара при данной температуре.

Относительная влажность имеет обратную зависимость от температуры: чем выше температура воздуха, тем ниже относительная влажность и наоборот.

В животноводческих помещениях относительная влажность должна быть в коровниках – 40-85%, в секциях для молодняка – 40-75%, в свинарниках – 40-75%, в птичниках – 60-70%.

Точку росы определяют с помощью *гигрометров* (от греческого «гигрос» – влажный). Зная точку росы и температуру воздуха, по таблице давления насыщенного водяного пара при различных температурах можно определить относительную влажность воздуха.

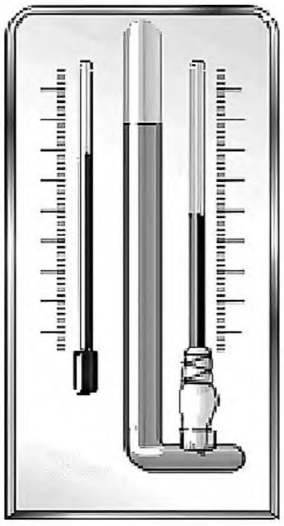


Рисунок 3 – Устройство психрометра

Однако чаще относительную влажность определяют с помощью *психрометров* (от греческого «психрия»– холод).

Психрометр состоит из двух термометров: сухого и влажного (рисунок 3). Сухой термометр регистрирует температуру воздуха, а влажный – температуру испаряющейся воды. По разности температур сухого и влажного термометров, используя психометрическую таблицу, определяют относительную влажность воздуха. Очевидно, чем суше воздух, тем больше разность показаний сухого и влажного термометров и наоборот. При относительной влажности равной 100% показания термометров будут совпадать.

Влажность воздуха имеет большое значение для жизнедеятельности живого организма. Ночью влажность воздуха обычно больше, чем днем, так как ночью холоднее, а с понижением температуры понижается давление насыщенного пара.

Наиболее благоприятным для жизнедеятельности млекопитающих в умеренных климатических условиях считается атмосферный воздух с относительной влажностью 40-60%.

Повышенная влажность (более 85%) в сочетании с высокой температурой воздуха затрудняет отдачу тепла из организма вследствие замедления испарения влаги. Это может привести к перегреванию организма (гипертермии) и тепловому удару. В условиях высокой влажности воздуха животные плохо переносят и холод, так как влажный воздух имеет большую теплопроводность. В результате наблюдается переохлаждение (гипотермия). Переохлаждение приводит к снижению иммунитета и может вызвать простудные (ринит, бронхит, пневмония) и желудочно-кишечные (гастрит, абомазоэнтерит, цистит) заболевания. В сырых помещениях снижается молочная продуктивность коров и прирост живой массы молодняка. Таким образом, повышенная влажность оказывает негативное воздействие на клиническое состояние и сохранность поголовья, как при высокой, так и при низкой температуре воздуха.

Низкая влажность воздуха (менее 40%) при повышенной температуре также неблагоприятно отражается на состоянии животных, особенно

молодняка, вызывая сухость слизистых оболочек, кожи, шерсти, копытного рога, усиленную жажду, потоотделение, снижение сопротивляемости организма к инфекциям и, как следствие, возникновение респираторных заболеваний и заболеваний кожи.

Таким образом, относительная влажность воздуха, соответствующая физиологическому состоянию организма, является важным условием его нормальной жизнедеятельности.



Рисунок 4 –
Термогигрометр ИВТМ-7

В норме влажность в животноводческих помещениях должна соответствовать оптимальному уровню 50-70%. Для снижения влажности в помещениях используют обогреватели. Для повышения влажности распыляют воду, используют кондиционеры.

В ветеринарной практике для определения влажности используются термогигрометры, например, ИВТМ-7 (рисунок 4), ИВА-6А, термометр – влагомер CENTER–315, психрометр статистический ВИТ-1, ПС-14, психрометр аспирационный МВ-4М и др.

В настоящее время используются в промышленном животноводстве измерители влажности воздуха на принципах молекулярной электроники. Точность новых датчиков гораздо выше, а диапазон измеряемых величин практически от 0 до 100%. Чувствительный элемент такого датчика – это пористый ионообменный полимер, помещенный между двумя электродами. Такие полимеры имеют специфическую особенность к поглощению (сорбции) молекул воды с последующей диссоциацией поверхностных ионных групп. При сорбции воды появляются свободные носители заряда – ионы, и на поверхности пор полимера образуется пленка раствора электролита. С ростом влажности толщина пленки увеличивается, усиливается диссоциация поверхностных ионных групп, число свободных ионов в растворе возрастает, и соответственно увеличивается проводимость системы.

1.4. Молекулярные явления в жидкостях

По физическим свойствам жидкости занимают промежуточное положение между газами и твердыми телами. Молекулы жидкости находятся очень близко друг к другу, поэтому жидкости практически не сжимаемы и их плотность близка к плотности твердых тел. Между молекулами жидкости действуют значительные силы взаимодействия, поэтому жидкости, подобно твердым телам, сохраняют свой объем, однако, как и газы, принимают форму сосуда, в котором находятся.

В жидкостях имеется «ближний порядок» в расположении соседних молекул, но поддерживается он лишь на расстояниях в несколько молекулярных диаметров, а «дальнего порядка», в отличие от твердых тел, в них нет.

Обычные жидкости изотропны, то есть их свойства одинаковы по всем направлениям. Рентгеновские исследования показали, что микроструктура жидкости значительно ближе к твердым телам, чем к газам.

По теории Я. И. Френкеля молекулы жидкости, подобно частицам твердого тела, колеблются около положений равновесия, однако эти положения равновесия не являются постоянными. По истечении некоторого времени, называемого временем «оседлой жизни», молекула скачком переходит в новое положение равновесия на расстояние, равное среднему расстоянию между соседними молекулами. Каждый скачок происходит при сообщении молекуле энергии активации $E_{акт}$, достаточной для разрыва связей с окружающими молекулами и перехода в окружение других молекул. Источником энергии активации является тепловое движение соседних молекул, поэтому частота скачков резко возрастает с увеличением температуры, что влечет за собой значительное уменьшение вязкости жидкости. Таким образом, в жидкостях происходит самодиффузия, описываемая законом Фика.

Наиболее характерным свойством жидкости является наличие свободной поверхности на границе с газом, что приводит к возникновению явлений особого рода, называемых *поверхностными.* Они обусловлены особыми физическими условиями, в которых находятся молекулы свободной поверхности жидкости.

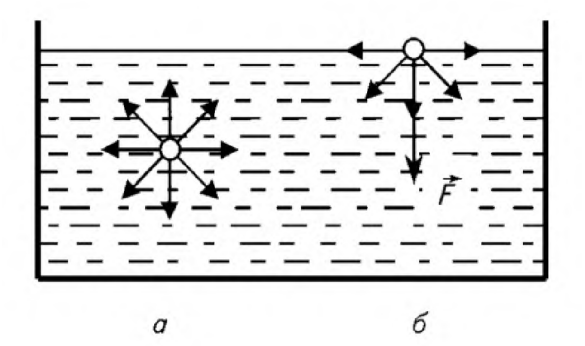


Рисунок 5 –
***а* – молекула внутри жидкости,**
***б* – молекула на поверхности**

Рассмотрим силы, действующие на молекулу внутри объема жидкости и на ее поверхности. На молекулу, расположенную внутри жидкости (рисунок 5а), действуют примерно одинаковые силы со стороны окружающих ее молекул, поэтому их равнодействующая близка к нулю.

На молекулы поверхностного слоя действует сила, направленная внутрь жидкости, перпендикулярно ее поверхности (рисунок 5б). Объясняется это тем, что концентрация молекул жидкости над ее поверхностью (в паре или газе, с которым граничит жидкость) мала. Эта равнодействующая стремится втянуть данную молекулу во внутренние слои жидкости. Следовательно, весь поверхностный слой жидкости оказывает на жидкость давление, называемое *внутренним или молекулярным.*

Внутреннее, или молекулярное, давление *– давление, оказываемое молекулами поверхностного слоя на молекулы, лежащие в глубине жидкости.*

Молекулярное давление не действует на тела, погруженные в жидкость, так как оно обусловлено только межмолекулярными силами. Из-за большого молекулярного давления 10^5–10^6 атм. жидкости практически не сжимаемы.

Силы, действующие на молекулу в горизонтальной плоскости и удерживающие ее в поверхностном слое, называются *силами поверхностного натяжения.* Под действием сил поверхностного натяжения возникает напря-

женное состояние молекул поверхностного слоя, которое стремится сократить свободную поверхность жидкости до минимума.

Напряженное состояние молекул поверхностного слоя жидкости называется явлением ***поверхностного натяжения.***

Сила поверхностного натяжения направлена по касательной к поверхности жидкости и определяется по формуле:

$$F_{\text{н}} = \sigma l \ , \qquad (1.11)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения;

l – длина контура, ограничивающая свободную поверхность жидкости.

Коэффициентом поверхностного натяжения (σ) *называется величина, численно равная силе поверхностного натяжения $F_н$, действующей на единицу длины l границы свободной поверхности жидкости:*

$$\sigma = \frac{F_{\text{н}}}{l} \qquad (1.12)$$

Единицы измерения в СИ ***Ньютон на метр***: $[\sigma] = \frac{\text{Н}}{\text{м}}$

При повышении температуры силы притяжения между молекулами уменьшаются, соответственно снижается и коэффициент поверхностного натяжения.

Поверхностное натяжение биологических жидкостей всегда меньше, чем у чистой воды. Это обусловлено наличием в организме *поверхностно-активных веществ (ПАВ)*, снижающих поверхностное натяжение (белки, фосфолипиды и др.). Недостаток ПАВ в организме приводит к тяжелым патологиям, например, к *асфиксии* (удушью) – невозможности растянуть легкие для первого вдоха у новорожденных из-за повышенного поверхностного натяжения, сжимающего поверхность альвеол.

На границе раздела жидкости с твердым телом возникают явления смачивания или несмачивания, обусловленные взаимодействиями молекул жидкости с молекулами твердого тела.

Явление смачивания *наблюдается тогда, когда силы взаимодействия между молекулами жидкости и твердого тела больше, чем силы взаимодействия между молекулами жидкости друг с другом.*

В этом случае жидкость будет стремиться увеличить поверхность соприкосновения и растечется по твердому телу. Такая жидкость называется *смачивающей.*

Явление несмачивания *наблюдается тогда, когда силы взаимодействия между молекулами жидкости и твердого тела меньше, чем силы взаимодействия между молекулами жидкости друг с другом.*

В этом случае жидкость будет стремиться сократить поверхность соприкосновения с твердым телом, собираясь в каплю. Такая жидкость называется *несмачивающей.*

Одна и та же жидкость смачивает одни твердые тела и не смачивает другие. Например, вода смачивает стекло и не смачивает парафин. Ртуть не смачивает стекло, но смачивает чистую поверхность меди и цинка. Водяной клоп водомерка свободно передвигается по поверхности воды благодаря тому,

что его лапки тоже покрыты липидным слоем и не смачиваются. Листья и плоды многих растений не смачиваются водой, так как покрыты восковым налетом, который предохраняет их от загнивания в дождливые периоды. Жировые выделения расположенной у основания хвоста копчиковой железы, наносимые клювом на перья, у водоплавающих птиц создают водоотталкивающую (несмачивающуюся) поверхность.

Поверхности, смачиваемые водой, называют *гидрофильными,* а несмачиваемые ею — *гидрофобными.*

Количественной мерой смачивания служит *краевой угол* θ (рисунок 6).

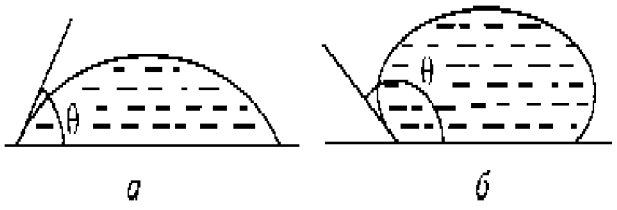


Рисунок 6 –
***а* – смачивание, *б* – несмачивание**

Краевой угол θ – *это угол, образуемый поверхностью твердого тела и касательной, проведенной к поверхности жидкости в точке их соприкосновения.*

Жидкость всегда находится внутри этого угла.

Для смачивающих жидкостей краевой угол острый, т.е. изменяется в пределах $0 \leq \theta < 90^{o}$ (рисунок 6а).

Если $\theta = 0$, то наблюдается явление ***полного смачивания.*** В этом случае капля будет растекаться по поверхности твердого тела, покрывая ее тонкой пленкой.

Для несмачивающих жидкостей краевой угол тупой, т.е. изменяется в пределах $90 < \theta \leq 180^{o}$ (рисунок 6б).

Если $\theta = 180^{o}$,то имеет место ***полное несмачивание.*** В этом случае капля жидкости приобретает форму приплюснутой сферы.

Смачивание или несмачивание жидкостью стенок сосуда, в котором она находится, влияет на форму свободной поверхности жидкости в этом сосуде.

Особенно отчетливо это видно в узких трубках – *капиллярах*, где искривляется вся поверхность жидкости.

Искривленная поверхность жидкости называется ***мениском.***

У смачивающей жидкости образуется *вогнутый мениск* (рисунок 7а), а у несмачивающей – *выпуклый* (рисунок 7б).

Под искривленной поверхностью жидкости возникает дополнительное давление, которое зависит от коэффициента поверхностного натяжения и радиуса кривизны мениска.

Дополнительное давление – *это давление, стремящееся выровнять искривленную поверхность жидкости.*

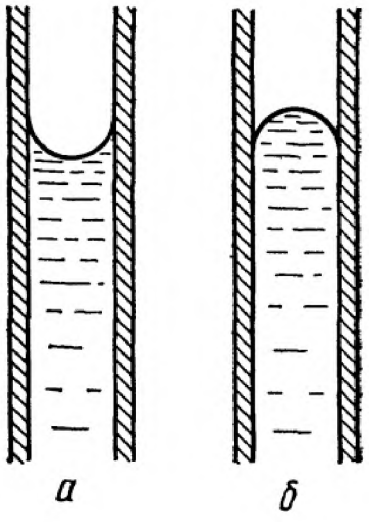


Рисунок 7 –
***а* – вогнутый мениск,**
***б* – выпуклый мениск**

При выпуклом мениске дополнительное давление направлено внутрь жидкости (рисунок 8а*)* и складывается с атмосферным давлением: $p_м = p + \Delta p$

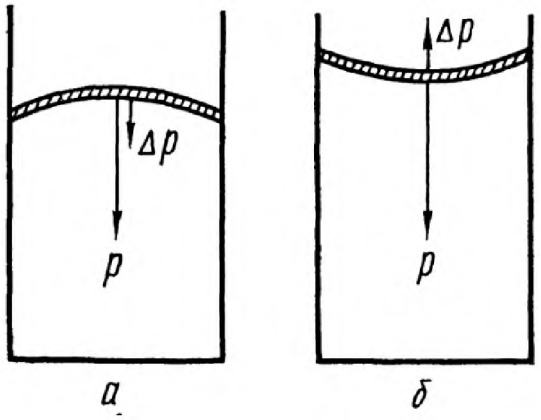


Рисунок 8 –
***а* – несмачивающая жидкость,**
***б* – смачивающая жидкость**

При вогнутом мениске оно направлено наружу (рисунок 4б) и вычитается из атмосферного:

$$p_м = p - \Delta p$$

Формулу дополнительного давления под искривленной поверхностью теоретически вывел в 1805 г. французский ученый П.С. Лаплас:

$$\Delta p = \pm\sigma\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}\right), \qquad (1.13)$$

где R_1 и R_2– радиусы кривизны двух нормальных взаимно-перпендикулярных сечений поверхности жидкости.

Знак «-» соответствует вогнутому мениску, а знак «+» – выпуклому.

В случае сферической поверхности $R_1 = R_2 = R$, тогда дополнительное давление под искривленной поверхностью жидкости будет определяться по ***формуле Лапласа***:

$$\Delta p = \pm\frac{2\sigma}{R}, \qquad (1.14)$$

где R – радиус мениска; σ – коэффициент поверхностного натяжения.

Наличие дополнительного давления у искривленной поверхности объясняет опасность попадания пузырьков воздуха в кровеносные сосуды. Может возникнуть явление *газовой эмболии*, при котором пузырек газа способен затруднить и даже остановить кровоток в мелких сосудах и лишить кровоснабжения какой-либо орган, что приведет к серьезному функциональному расстройству и даже к летальному исходу.

Газовая эмболия – *закупорка кровеносного сосуда пузырьком газа* (пузырек как бы прилипает к стенкам сосуда и перекрывает его).

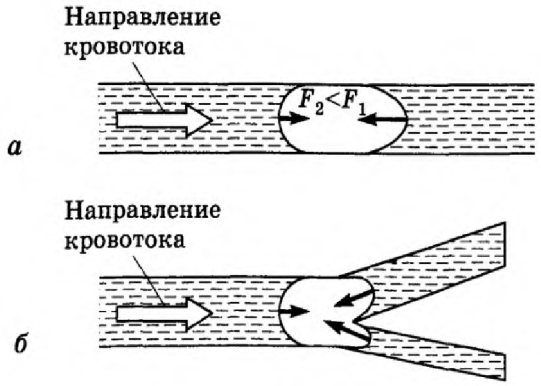


Рисунок 9 –
***а* –газовый пузырекв мелком сосуде,**
***б* – газовый пузырек на разветвлении сосудов**

Рассмотрим поведение пузырька воздуха, находящегося в кровеносном сосуде (рисунок 9). Пока диаметр газового пузырька меньше диаметра сосуда, он имеет сферическую форму и движется вместе с током крови. Если он попадает в мелкий сосуд, диаметр которого меньше диаметра пузырька, его мениски деформируются под давлением текущей крови: передний по току крови мениск вытягивается, его радиус кривизны уменьшается, а задний мениск под напором крови уплощается, его радиус кривизны увеличивается.

Соответственно, дополнительные давления, действующие на эти мениски, будут не одинаковы и направлены навстречу, а их результирующая сила, приложенная к пузырьку, будет направлена против тока крови, противодействуя ему (рисунок 9а), вплоть до возможной остановки кровотока. Еще более сложная ситуация возникает, когда газовый пузырек попадает на разветвление (бифуркацию) сосудистого русла и полностью останавливает кровоток в дистально расположенных сосудах (рисунок 9б).

Газовая эмболия может возникнуть при повреждении крупных вен, где давление крови ниже атмосферного, при неправильно проведенных внутривенных инъекциях, при быстром подъеме с большой глубины на поверхность (кессонная болезнь), при разгерметизации кабины самолета или скафандра космонавта на большой высоте.

Дополнительное давление, складываясь с атмосферным давлением, приводит к возникновению *капиллярных явлений.*

Капиллярными явлениями *называют явления изменения высоты уровня жидкости в капиллярах по сравнению с уровнем жидкости в широком сосуде.*

В случае смачивания суммарное давление меньше атмосферного, следовательно жидкость будет подниматься вверх по капилляру на высоту h (рисунок 10а).

В случае несмачивания, суммарное давление больше атмосферного, следовательно жидкость будет опускаться в капилляре (рисунок 10б).

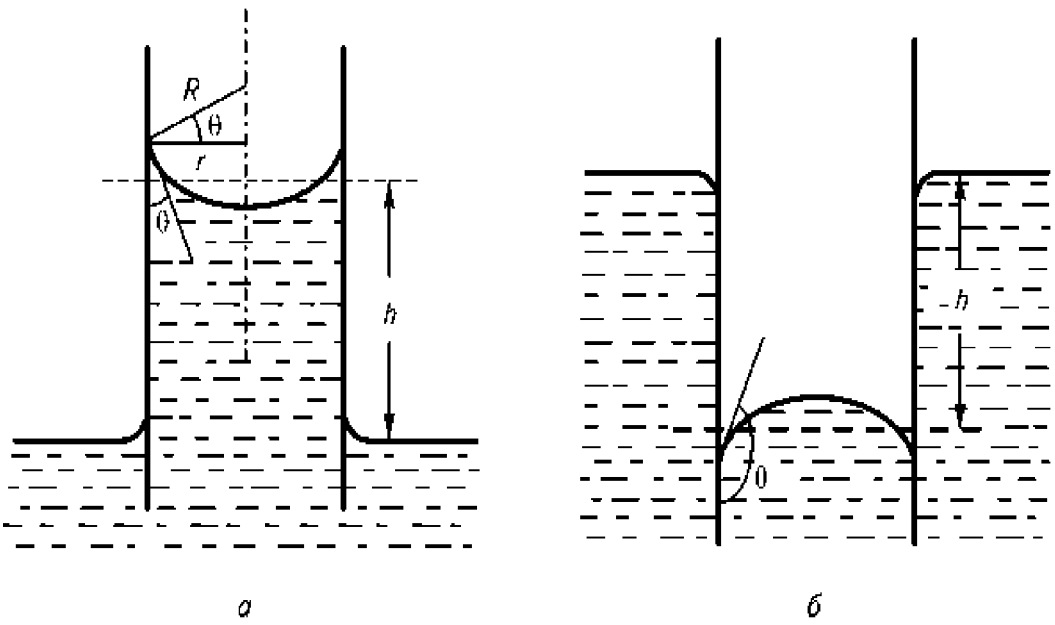


Рисунок 10 –
***а* – подъем жидкости в случае смачивания,**
***б* – опускание в случае несмачивания**

Жидкость будет подниматься (опускаться) до тех пор, пока гидростатическое давление столба жидкости $\Delta p=\rho gh$ не скомпенсирует дополнительное давлениеΔp, определяемое по формуле Лапласа.

Радиус мениска R связан с радиусом капилляра r формулой (рисунок 10а):

$$R = \frac{r}{\cos\theta}, \qquad (1.15)$$

где $\cos\theta$ – косинус краевого угла.

Высота подъема (опускания) жидкости в капиллярах определяется по ***формуле Жюрена-Борелли:***

$$h = \pm\frac{2\sigma}{\rho g r}\cdot\cos\theta, \qquad (1.16)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения;

ρ – плотность жидкости;

g – ускорение свободного падения;

r – радиус капилляра;

θ – краевой угол.

Знак «+» соответственно для смачивающей жидкости и знак «-» – для несмачивающей.

Капиллярные явления играют большую роль в самых разнообразных процессах, происходящих в природе. Например, проникновение влаги и питательных растворов по стеблю или стволу растения происходит благодаря капиллярным явлениям. По капиллярам вода поднимается из глубинных в поверхностные слои почвы. Пчелы извлекают нектар из цветка посредством очень тонкой капиллярной трубки, находящейся внутри пчелиного хоботка.

2. ТЕРМОДИНАМИКА БИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Термодинамикой *называется раздел физики, изучающий процессы перехода теплоты в другие виды энергии.*

В основе термодинамики лежат два фундаментальных закона, полученных из многовекового опыта человеческой деятельности, называемых началами. Первое начало описывает количественную закономерность процессов превращения энергии, а второе позволяет судить о направлении этих процессов.

2.1. Основные положения термодинамики

Основными понятиями термодинамики являются термодинамическая система и термодинамический процесс.

Термодинамическим процессом *называется процесс перехода системы из одного состояния в другое.*

Термодинамические процессы бывают *обратимые* и *необратимые.*

Обратимым *называется процесс, который может протекать как в прямом, так и в обратном направлении, при этом ни в самой системе, ни в окружающей среде не происходит никаких изменений.*

Если это условие не выполняется, то процесс будет ***необратимым.***

Механические процессы служат примером обратимого процесса, если бы оно происходило без трения, например, колебания маятника. Однако трение неустранимо, поэтому часть механической энергии системы всегда переходит в

теплоту и безвозвратно рассеивается в окружающую среду. Следовательно, в природе нет обратимых процессов. ***Все реально протекающие процессы являются необратимыми.***

Обратимый процесс есть идеализированная модель реальных процессов, необходимая для их изучения.

Термодинамическая система *– это тело или группа тел, условно выделенные из окружающей среды, с которыми происходят термодинамические процессы.*

Различают три вида термодинамических систем:

- ***изолированные*** *– это системы, которые не обмениваются с окружающей средой ни энергией, ни веществом*;
- ***закрытые*** *– это системы, которые обмениваются с окружающей средой энергией, но не обмениваются веществом*;
- ***открытые*** *– это системы обмениваются с окружающей средой и энергией, и веществом.*

Изолированную систему можно рассматривать как удобную термодинамическую модель. Примером изолированной термодинамической системы может служить газ, заключенный в сосуде под поршнем. Естественно, что любая реальная термодинамическая система не будет изолированной хотя бы потому, что ее невозможно окружить оболочкой, не проводящей теплоту.

Состояние термодинамической системы *определяется совокупностью ее параметров.* К важнейшим параметрам относятся: давление p, термодинамическая температура T, объем V, энтропия S.

Различают ***экстенсивные*** параметры состояния, пропорциональные массе системы (внутренняя энергия, энтропия), и ***интенсивные,*** не зависящие от массы (давление, температура).

Если параметры системы при взаимодействии ее с окружающими телами не изменяются с течением времени, то состояние системы называют ***стационарным.*** Примерами таких состояний в течение небольшого отрезка времени являются состояние тела человека и животных, состояние воздуха в отапливаемом помещении, состояние внутренней части работающего домашнего холодильника.

В разных частях системы, находящейся в стационарном состоянии, значения параметров обычно различаются: температура в разных участках тела живого организма, концентрация диффундирующих молекул в разных частях биологической мембраны. В системе, таким образом, поддерживаются постоянные градиенты некоторых параметров, благодаря чему с постоянной скоростью могут протекать химические реакции.

Тела, участвующие в термодинамических процессах, обмениваются между собой энергией. Обмен энергией между ними может осуществляться двумя способами: при совершении работы и при теплообмене. Теплота и работа являются не видом энергии, а формой ее передачи.

Процесс передачи внутренней энергии без совершения работы называется ***теплообменом.*** Мерой передачи энергии при теплообмене является количество теплоты.

Теплота (количество теплоты) *– энергия, которую получает или отдает система в процессе теплообмена с окружающей средой.*

Связь между количеством теплоты, изменением внутренней энергии и работой термодинамической системы устанавливает *первое начало термодинамики,* представляющее собой закон сохранения и превращения энергии для тепловых процессов.

Первое начало термодинамики: *количество теплоты, переданное термодинамической системе, идет на изменение ее внутренней энергии и на совершение работы системой против внешних сил (рисунок 11):*

$$Q = \Delta U + A \qquad (2.1)$$

Количество теплоты Q, как и работа A, характеризуют переход между двумя состояниями системы. Значит, их нельзя выразить в виде разности двух значений в конечном и начальном состояниях. В связи с этим Q и A записаны без знака Δ.

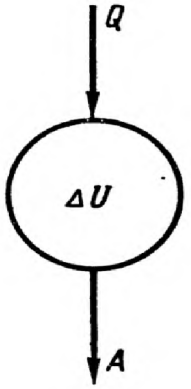


Рисунок 11 – Первое начало

Учитывая, что теплота и работа эквивалентны энергии, можно сформулировать первое начало так: *будучи несозидаемой и неуничтожимой, энергия может только преобразоваться из одной формы в другую.*

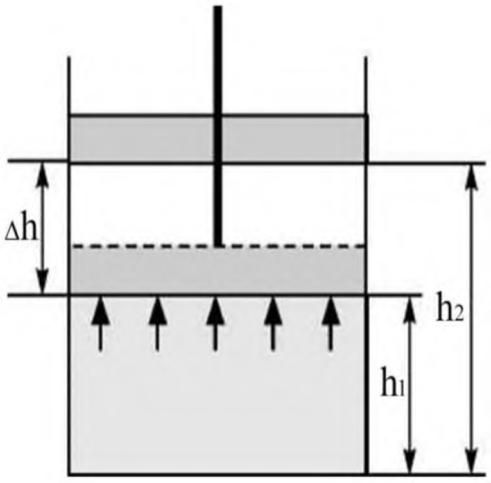


Рисунок 12 – Работа газа при изменении объема

Вычислим работу, совершаемую газом при изменении его объема. Пусть газ, находящийся под поршнем (рисунок 12), изобарически (при постоянном давлении) расширяется от объема V_1 до V_2.

Газ действует на поршень с силой:

$F = p \cdot S$, где p – давление, оказываемое газом на поршень площадью S, и перемещает его на расстояние $\Delta h = h_2 - h_1$.

Тогда ***работа, совершаемая газом:***

$$A = p \square \Delta V, \qquad (2.2)$$

где $\Delta V = V_2 - V_1$ – изменение объема газа при нагревании.

При расширении газа $\Delta V > 0$ и A>0, следовательно газ совершает работу против внешних сил.

Если газ сжимается, то $\Delta V < 0$ и работа $A < 0$. В этом случае работу над газом совершают внешние силы.

Под ***внутренней энергией системы*** *понимают сумму кинетической и потенциальной энергий частиц, из которых состоит система.*

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

Изменение внутренней энергии ΔU *есть разность двух значений внутренней энергии, соответствующих конечному и начальному состояниям системы:* $\Delta U = U_2 - U_1$.

Внутренняя энергия в общем случае может зависеть от многих термодинамических параметров, например: $U = f(p, V, T)$.

Для идеальных газов внутренняя энергия зависит только от температуры, то есть $U = f(T)$.

Внутренней энергией идеального газа *называется сумма кинетических энергий всех молекул газа.*

Для любого количества молей *внутренняя энергия идеального газа* определяется по формуле:

$$U = \frac{i}{2} \cdot \frac{m}{M} \cdot RT, \qquad (2.3)$$

где i– число степеней свободы, т.е. число независимых координат, описывающих положение молекулы в пространстве.

Для одноатомной молекулы число степеней свободы $i = 3$,

для двухатомной – $i = 5$,

для трех- и более атомной молекулы – $i = 6$.

Если в результате теплообмена телу передается некоторое количество теплоты, то его температура и внутренняя энергия увеличиваются.

Способность тела изменять свою температуру при сообщении ему количества теплоты называется ***теплоемкостью.***

Чем больше теплоемкость, тем медленнее вещество нагревается и медленнее остывает. Например, в холодную погоду водоемы охлаждаются медленнее окружающего воздуха и вблизи них теплее (в холодную погоду водоплавающие птицы сидят на воде). А в жару, наоборот, вода нагревается медленнее окружающего воздуха, и вблизи водоемов прохладнее. Это обусловлено тем, что теплоемкость воды гораздо больше теплоемкости воздуха.

На практике пользуются понятиями удельной и молярной теплоемкости вещества.

Удельной теплоемкостью *называется количество теплоты, необходимое для нагревания 1кг вещества на 1К:*

$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta T}, \qquad (2.4)$$

где Q – количество теплоты, полученное веществом при нагреве (или выделившееся при охлаждении);

m – масса нагреваемого (охлаждающегося) вещества;

ΔT– разность конечной и начальной температур вещества.

В СИ измеряется в ***джоулях на килограмм на кельвин****:*

$$[c] = Дж/кг \cdot К$$

Молярной теплоемкостью *называется количество теплоты, необходимое для нагревания 1 моля вещества на 1К:*

$$C = \frac{M \cdot Q}{m \cdot \Delta T} \qquad (2.5)$$

В СИ измеряется в ***джоулях на моль на кельвин***:

$$[C] = Дж/моль \cdot К$$

Удельная и молярная теплоемкости связаны соотношением:

$$C = M \cdot c \qquad (2.6)$$

Для газов, как правило, пользуются молярной теплоемкостью, а для жидкостей и твердых тел – удельной.

При различных процессах молярные теплоемкости газов будут различны.

Молярные теплоемкости при изобарическом C_p и изохорическом C_V нагревании оказываются связанными простым соотношением, называемым ***уравнением Майера***:

$$C_P = C_V + R, \qquad (2.7)$$

где R – универсальная газовая постоянная.

Каждый реальный процесс, происходящий в термодинамической системе, может осуществляться только в одном направлении. Направление протекания термодинамических процессов определяет *второе начало термодинамики.*

Существует несколько формулировок второго закона термодинамики.

Формулировка Клаузиуса: *невозможен процесс, при котором теплота самопроизвольно переходила бы от менее нагретого тела к более нагретому.*

Формулировка Томсона: *невозможен такой периодический процесс, единственным результатом которого было бы превращение теплоты в работу вследствие охлаждения тела.*

Таким образом, второе начало термодинамики утверждает невозможность построения ***вечного двигателя*** *– двигателя, работающего за счет охлаждения какого-либо одного тела.*

Подтверждением этого является принцип работы тепловой машины.

Тепловой машиной *называется периодически действующий механизм, который преобразует внутреннюю энергию топлива в механическую работу.*

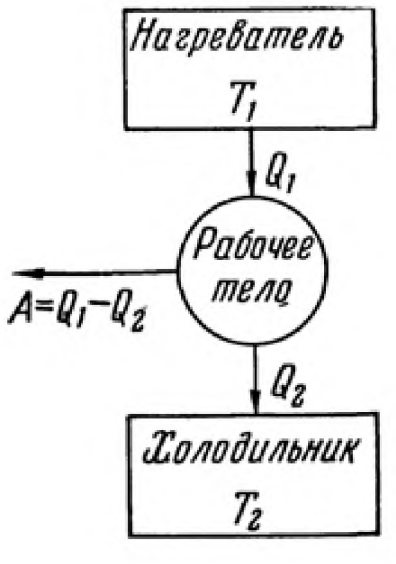


Рисунок 13 –
Устройство тепловой машины

Тепловая машина состоит из трех основных частей (рисунок 13): *нагревателя (источник энергии), рабочего тела (газ) и холодильника (окружающая среда).*

Цикл работы теплового двигателя состоит из трех этапов:

1 - нагреватель передает газу количество теплоты Q_1, при этом температура нагревателя T_1остается постоянной за счет сгорания топлива;

2 - газ, расширяясь, совершает работу A;

3 - для возвращения газа в исходное состояние холодильнику передается теплота Q_2, температура которого $T_2<T_1$.

Работа, совершенная системой, определяется разностью между полученным и отданным количеством теплоты:

$$A = Q_1 - Q_2 \qquad (2.8)$$

Коэффициентом полезного действия η тепловой машины (КПД) *называется отношение работы A к количеству теплоты Q_1, полученному рабочим телом за цикл от нагревателя:*

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \quad (2.9)$$

Коэффициент полезного действия указывает, какая часть тепловой энергии, полученной рабочим телом от нагревателя, превратилась в полезную работу. Остальная часть была «бесполезно» передана холодильнику.

Из всех периодически действующих тепловых машин наибольшим КПД обладают машины, работающие по циклу Карно (идеальные тепловые машины). Их КПД может достигать 50%.

КПД идеальной тепловой машины *определяется по формуле:*

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad (2.10)$$

У реальных тепловых машин из-за трения и неизбежных тепловых потерь КПД значительно меньше: поршневая паровая машина – до 20%, паровая турбина – до 30%, двигатель внутреннего сгорания – до 45%.

Из формул видно, что коэффициент полезного действия тепловой машины всегда меньше единицы $\eta < 1$, то есть вся теплота, полученная от нагревателя, не может превратиться в работу. Таким образом, *направление термодинамических процессов в природе соответствует рассеянию полезной энергии и превращению ее в энергию хаотического движения частиц.*

К функциям состояния термодинамической системы, помимо внутренней энергии, относятся *энтропия и свободная энергия.*

Понятие энтропии впервые введено Р. Клаузиусом в 1865 году.

Энтропия (S) *– функция состояния термодинамической системы, характеризующая направление протекания самопроизвольных процессов в этой системе и являющаяся мерой их необратимости.*

Каждому состоянию системы соответствует только одно определенное значение энтропии.

Энтропия *– это мера беспорядка в системе*. Каждая система стремится перейти к состоянию максимального молекулярного беспорядка или хаоса. Таким образом, чем меньше порядка в системе, тем больше ее энтропия.

Энтропия *– это мера обесценивания энергии*, учитывающая ту часть энергии, которую нельзя превратить в работу. Чем больше увеличивается энтропия при каком-либо процессе, тем больше рассеяние энергии и тем более необратим данный процесс.

Для исследования термодинамических процессов интерес представляет изменение энтропии ΔS.

Изменение энтропии равно отношению количества теплоты, полученной или отданной системой, к термодинамической температуре системы:

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T} \quad (2.11)$$

В СИ измеряется в ***джоуль на кельвин****: [ΔS] = Дж/К*

Для обратимых процессов энтропия остается постоянной, следовательно, изменение энтропии $\Delta S_{\text{обр.}} = 0$.

Для необратимых процессов энтропия возрастает, следовательно, $\Delta S_{\text{необр.}} > 0$.

В результате, ***второе начало термодинамики*** можно сформулировать так: *все реальные процессы протекают с увеличением энтропии.*

Внутренняя энергия системы U равна сумме свободной F и связанной энергии TS:

$$U = F + T \cdot S \tag{2.12}$$

Связанная энергия TS *– это часть внутренней энергии, которая не может быть превращена в работу, то есть это обесцененная часть внутренней энергии.* Величина этой энергии зависит от энтропии *S*. При одной и той же температуре связанная энергия тем больше, чем больше энтропия.

Свободная энергия F *– это та часть внутренней энергии U, которую система может превратить в работу.*

Таким образом, *все процессы в природе протекают в направлении уменьшения свободной энергии и увеличения энтропии.*

2.2. Первое начало термодинамики в биологии

Каждая клетка и весь живой организм в целом являются открытыми системами, и лишь в отдельных частях клетки имеются условия для существования закрытых и изолированных систем. Процессы, протекающие в биосистемах, как и в любых других системах, необратимы (не равновесны), то есть при переходе системы из одного состояния в другое обратный переход в начальное состояние невозможен без дополнительного притока энергии извне.

Животные в качестве источника энергии используют пищу, точнее химическую энергию, которая высвобождается при окислении веществ, что сопровождается потреблением кислорода и выделением углекислого газа.

В 1780 году Антуан Лавуазье и Пьер Лаплас доказали справедливость первого закона термодинамики для биологических объектов. Они измеряли количество теплоты (по скорости таяния льда) и углекислого газа, выделяемых морской свинкой в процессе жизнедеятельности, и сравнивали эти величины с тепловым эффектом реакции сжигания потребленных продуктов. Полученные результаты показали примерное равенство внутренней энергии продуктов питания и выделяемой теплоты. Это доказывает, что живые организмы не являются независимым источником энергии, а только осуществляют превращение одних видов энергии в другие.

Первый закон термодинамики для живого организма: *все виды работ в организме совершаются за счет эквивалентного количества энергии, выделяющейся при окислении питательных веществ.*

$$W_{пищи} = Q + A + \Delta U \tag{2.13}$$

Можно считать, что организм теплокровных животных имеет постоянную температуру и неизменный химический состав, поэтому можно принять $\Delta U = 0$. Тогда уравнение первого начала термодинамики для живого организма примет окончательный вид:

$$W_{пищи} = Q + A \tag{2.14}$$

Теплопродукция *– это выработка тепловой энергии в организме в результате энергетических превращений в живых клетках.* Измерение теплопродукции проводится для оценки интенсивности обменных процессов в организме.

Калориметрия *– совокупность методов измерения количества теплоты, выделяющейся или поглощаемой при протекании различных физических или химических процессов.*

Методы калориметрии используются и для оценки теплопродукции организма животных. Различают метод *непрямой калориметрии*, при котором измеряют количество потребляемого кислорода или выделяемого углекислого газа животными и затем оценивают теплопродукцию. Более точные показания дает *метод прямой калориметрии* – метод определения количества продуцируемой организмом энергии с помощью специальных калориметрических камер, позволяющих измерить теплопродукцию человека или животного, находящегося в камере.

Аккумулирование энергии в живых организмах происходит в виде сложных биохимических соединений, важнейшим из которых является аденозинтрифосфорная кислота (АТФ). Живой организм выделяет теплоту в окружающую среду и, кроме этого, выполняет различные виды работ: механическую, электрическую, химическую, осмотическую. Механическая работа выполняется мышцами при их сокращении. Химическая работа совершается клеткой при синтезе высокомолекулярных веществ (белков, нуклеиновых кислот) из низкомолекулярных и других химических реакций в организме. Электрическая работа совершается в клеточных мембранах и органеллах при генерировании биопотенциалов. Осмотическая работа совершается при активном транспорте веществ через клеточные мембраны из области с меньшей концентрацией в область с большей концентрацией (рисунок 14).

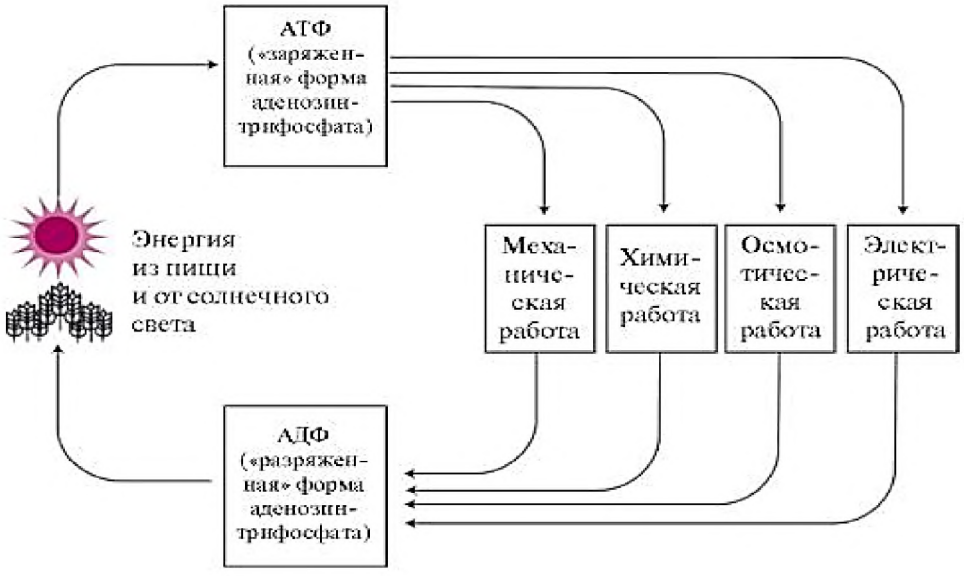


Рисунок 14 –
Схема использования энергии АТФ в живой клетке

Для количественной характеристики выделения организмом теплоты используют удельную теплопродукцию.

Удельная теплопродукция q – *количество теплоты* Q, *выделяемое единицей массы животного m в единицу времени t:*

$$q = \frac{Q}{m \cdot t} \qquad (2.15)$$

Удельная теплопродукция уменьшается с увеличением массы животного. Это объясняется тем, что с уменьшением размеров и массы тела увеличивается отношение его поверхности к объему. Благодаря теплопродукции температура тела животных обладает постоянством в определенном диапазоне температур внешней среды.

В живых организмах осуществляется несколько видов теплопередачи, которые обеспечивают постоянную температуру тела.

Контактная теплопроводность – *передача тепла при непосредственном соприкосновении от более нагретых частей системы к менее нагретым.*

В живом организме наибольшую теплопроводность имеет мышечная ткань, в которой находится много кровеносных сосудов, что позволяет переносить тепло от внутренних органов к внешним, предохраняя внутренние органы от перегрева. Кожа и подкожная жировая клетчатка имеют низкую теплопроводность и являются для организма теплоизолирующим слоем.

Конвекция – *явление переноса теплоты в жидкостях или газах путем перемешивания теплых и холодных слоев.*

Естественная конвекция обусловлена тем, что нагретые слои, имея меньшую плотность, поднимаются вверх, а холодные слои опускаются. Например, за счет конвекции происходит обогрев помещений печами или радиаторами центрального отопления. Вынужденная конвекция происходит при перемешивании газа или жидкости мешалками, насосами. В организме конвекция осуществляется в основном за счет движения крови в сердечно-сосудистой системе.

Тепловое излучение – *излучение атомами электромагнитных волн, испускаемое нагретыми телами за счет их внутренней энергии.*

Атомы и молекулы любого вещества излучают электромагнитные волны, которые уносят с собой часть внутренней энергии. Интенсивность излучения повышается при увеличении температуры тела. Тепловое излучение присуще всем телам при любых температурах, отличных от абсолютного нуля.

Испарение – *процесс перехода вещества из жидкого состояния в газообразное.*

Ворганизмепроисходитвыведениетеплотывпроцессепотоотделениясповерхности кожи и легочных альвеол в процессе дыхания. Человек с выдыхаемым воздухом выделяет примерно 0,35 кг влаги в сутки, а при нормальном потоотделении – примерно 0,5 кг пота в сутки. Корова с суточным удоем 25 литров выделяет около 0,29 кг пота с 1м^2 поверхности тела. При увеличении физической нагрузки и стрессах эти показатели увеличиваются.

При нарушении теплового баланса между организмом и окружающей средой у животных и человека может наблюдаться гипертермия и гипотермия.

Гипертермия – повышение температуры тела выше предельно допустимого уровня.

Гипотермия – понижение температуры тела ниже минимального значения нормы.

Контроль температуры тела имеет важное диагностическое значение. Термометрию проводят при обследовании больных животных, при проведении вакцинации, туберкулинизации, перед убоем животных.

Методы измерения температуры делят на ***контактные***, основанные на передаче тепла прибору, измеряющему температуру путем непосредственного контакта; и ***бесконтактные,*** когда передача тепла прибору осуществляется путем излучения, обычно через воздух.

В ветеринарной практике при лечении болезней животных может применяться теплолечение.

Теплолечение – метод физиотерапии, заключающийся в дозированном воздействии тепла на живой организм. Для теплолечения используют нагретые озокерит, парафин, соль, песок, водные или электрические грелки, электролампы. Тепло усиливает микроциркуляцию крови, ускоряет обмен веществ в тканях, увеличивает проницаемость кожи для лечебных веществ, обладает рассасывающим и противовоспалительным действием, усиливает потоотделение и способствует выведению из организма продуктов метаболизма и токсинов.

2.3. Второе начало термодинамики для биосистем

Фундаментальным понятием классической термодинамики является равновесное состояние системы, в котором термодинамические параметры (объем, давление, температура и другие) имеют одинаковое значение во всех точках системы и не могут меняться самопроизвольно во времени. Равновесное состояние для живого организма недопустимо, так как в этом случае невозможно прохождение никаких направленных процессов, кроме случайных отклонений от положения равновесия. Поэтому в термодинамике биологических процессов основным понятием является *стационарное состояние* системы. В стационарном состоянии параметры также не меняются с течением времени, но могут отличаться в различных частях системы, то есть в таких системах существуют и постоянно поддерживаются градиенты параметров. Это возможно только за счет поступления энергии или вещества из окружающей среды. Живой организм не может быть изолирован от окружающей среды и является открытой термодинамической системой, которая постоянно обменивается веществом и энергией. Таким образом, в стационарном состоянии могут находиться только открытые и закрытые системы.

Для изолированной системы второе начало термодинамики гласит, что все необратимые процессы протекают в направлении, при котором энтропия системы возрастает.

Стационарное состояние осуществляется за счет постоянства скоростей физических и химических процессов в живых организмах.

Полное изменение энтропии ΔS биологической системы условно можно представить в виде суммы двух частей:

$$\Delta S = \Delta S_i + \Delta S_e, \quad (2.16)$$

где ΔS_i – изменение энтропии, связанное с необратимыми процессами, протекающими внутри биологической системы;

ΔS_e – изменение энтропии вследствие обмена системы с окружающей средой (получение извне необходимых веществ и выделение продуктов жизнедеятельности), в результате чего в организм поступает свободная энергия.

Условие стационарного состояния живого организма: *живой организм находится в стационарном состоянии, если изменение его энтропии равно нулю:*

$$\Delta S = 0 \quad (2.17)$$

В процессе жизнедеятельности организма, при различных отклонениях от физиологической нормы, энтропия биологической системы со временем может меняться в определенных допустимых пределах, поэтому характерным параметром термодинамической системы в этом случае будет *скорость изменения энтропии* $\Delta S/\Delta t$.

Скорость изменения энтропии открытой термодинамической системы будет определяться по формуле:

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{\Delta S_i}{\Delta t} + \frac{\Delta S_e}{\Delta t} \quad (2.18)$$

Скорость изменения энтропии открытой системы равна сумме скорости изменения энтропии за счет взаимодействия системы с внешней средой и скорости изменения энтропии, вызванного необратимыми процессами.

Необратимые процессы, протекающие внутри системы, вызывают повышение энтропии, поэтому всегда $\frac{\Delta S_i}{\Delta t} > 0$.

Однако общая энтропия системы может как возрастать, так и убывать:

1. Энтропия увеличивается, если $\frac{\Delta S_e}{\Delta t} > 0$, что соответствует патологическому состоянию организма, так как при этом уменьшается степень упорядоченности системы. Это наблюдается, например, при некрозе тканей, наличии онкологических заболеваний (происходит неконтролируемый неупорядоченный рост клеток).

2. Энтропия уменьшается, если $\frac{\Delta S_e}{\Delta t} < 0$ и $\left|\frac{\Delta S_e}{\Delta t}\right| > \frac{\Delta S_i}{\Delta t}$, что соответствует повышению уровня организации организма (рост, формирование органов, тканей и систем).

3. Энтропия не изменяется, если $\frac{\Delta S_e}{\Delta t} < 0$, что соответствует стационарному состоянию системы.

При этом $$\left|\frac{\Delta S_e}{\Delta t}\right| = \frac{\Delta S_i}{\Delta t} \quad (2.19)$$

Равенство (2.19) является ***условием стационарного состояния открытой системы***. Его смысл заключается в том, что для обеспечения стационарного состояния открытая система должна обмениваться с окружающей средой энергией и веществом в таком количестве, которые обеспечивали бы такую же скорость уменьшения ее положительной энтропии ΔS_i или увеличения отрицательной энтропии ΔS_e.

В организме преобладают необратимые процессы. Вследствие этого скорость увеличения энтропии в организме больше нуля:

$$\frac{\Delta S_i}{\Delta t} > 0 \qquad (2.20)$$

Бельгийский химик И. Р. Пригожин на основе изучения открытых систем сформулировал основное ***свойство стационарного состояния***: *в стационарном состоянии скорость возрастания энтропии, обусловленного протеканием необратимых процессов, имеет положительное и минимальное из возможных значений.* Это положение получило название ***теоремы Пригожина***.

Стационарное состояние живого организма характеризуется постоянством параметров во времени, которое называется ***гомеостазом.***

Однако в организме могут проходить процессы, которые нарушают стационарное состояние, например, повышение температуры тела или повышение концентрации глюкозы в крови. Если эти значения не превышают определенного предела, то стационарное состояние рано или поздно восстановится. Это означает, что небольшое отклонение от стационарного состояния не приводит к необратимым изменениям, а служит признаком устойчивости системы.

Таким образом, биологические системы обладают способностью ***аутостабилизации***, *т.е. могут самостоятельно возвращаться в исходное состояние при небольших отклонениях от него, вызванных внешним воздействием.*

Однако в процессе роста и старения организма уровни стационарного состояния меняются (содержание кальция в костях, величины клеточных биопотенциалов) и система переходит в новое стационарное состояние, но уже с другими параметрами. Если же изменения велики, то это может привести к выходу из стационарного состояния и гибели организма. Состояние термодинамического равновесия достигается лишь после прекращения жизни и распада составляющих организм клеточных структур и биологических макромолекул.

Литература

1. Аганов, А. В. Медицинская физика. Ч. 1. Механика. Молекулярная физика : учебное пособие для вузов / А. В. Аганов. – 4-е изд., испр. и доп. – Санкт-Петербург : Лань, 2024. – 220 с.
2. Антонов, В.Ф. Физика и биофизика : учебник / В.Ф. Антонов, Е.К. Козлова, А.М. Черныш. – 2-е издание, испр. и доп. – Москва : ГЭОТАР-Медиа, 2023. – 472 с.
3. Баранов, А.Ю. Низкотемпературные установки медицинского назначения. Ч. 1. Аппараты для общего криотерапевтического воздействия: учебное пособие / А.Б. Баранов. – СПб.: Университет ИТМО, 2016. – 178 с.
4. Белановский, А. С. Основы биофизики в ветеринарии : учебное пособие для вузов / А. С. Белановский. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Дрофа, 2007. – 332 с.
5. Дырнаева, Е. В. Физика с основами биофизики : курс лекций. Ч. 1/ Е. В. Дырнаева, Р. Г. Кирсанов. – Самара : РИЦ СГСХА, 2013. – 224 с.
6. Иванов, И.В. Основы физики и биофизики: учебное пособие / И.В. Иванов.– 2-е издание, испр. и доп. – СПб.: Лань, 2012. – 208 с.
7. Лещенко, В. Г. Медицинская и биологическая физика : учебное пособие / В. Г. Лещенко, Г. К. Ильич. – Минск : Новое знание ; Москва : ИНФРА-М, 2012. – 552 с.
8. Ливенцев, Н. М. Курс физики : учебник / Н. М. Ливенцев. – 7-е изд., стер. – СПб. : Лань, 2021. – 672 с.
9. Ремизов, А. Н. Медицинская и биологическая физика / А. Н. Ремизов, А. Г. Максина, А. Я. Потапенко. – 4-е изд., перераб. и дополн. – Москва : Дрофа, 2003. – 560 с.
10. Тиманюк, В. А. Биофизика : учебник для студентов фармацевтических и медицинских вузов / В. А. Тиманюк, Е. Н. Животова. – Харьков : Издательство НФАУ : Золотые страницы, 2003. – 704 с.
11. Федотова, А.С. Гигиена воздушной среды животноводческих помещений / А. С. Федотова. – Красноярск : Красноярский государственный аграрный университет, 2011. – 186 с.
12. Физика и биофизика : учебно-методическое пособие для студентов учреждений высшего образования, обучающихся по специальностям: «Ветеринарная медицина», «Ветеринарная санитария и экспертиза», «Ветеринарная фармация» / И. О. Петроченко, А. Н. Толкач, Н. П. Коваленок, Е. В. Толкач ; Витебская государственная академия ветеринарной медицины, Кафедра радиологии и биофизики. – Витебск : ВГАВМ, 2019. – 207 с.

Учебное издание

Петроченко Ирина Олеговна,
Курилович Александр Михайлович,
Толкач Алексей Николаевич

БИОФИЗИКА. ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕРМОДИНАМИКИ

Методические указания

Ответственный за выпуск А. М. Курилович
Технический редактор Е. А. Алисейко
Компьютерный набор И. О. Петроченко
Компьютерная верстка Т. А. Никитенко
Корректор О. А. Никитина

Подписано в печать21.07.2026. Формат 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 2,0. Уч.-изд. л.1,67. Тираж 150 экз. Заказ 2652.

Издатель: учреждение образования «Витебская ордена «Знак Почета» государственная академия ветеринарной медицины».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/ 362 от 13.06.2014.
Ул. 1-я Доватора, 7/11, 210026, г. Витебск.
Тел.: (0212) 48-17-70.
E-mail: rio@vsavm.by
http://www.vsavm.by

ISBN 978-985-591-310-9