

УДК 577.3+53(07)

Белановский А. С. **Биологическая физика: Методические указания.** – 4-е изд., стереотипное – М.: ФГБОУ ВПО МГАВМиБ, 2011, 84 с.

Приведены контрольные задачи по всем разделам курса «Биологическая физика» в соответствии с утвержденной программой, а также методические указания к решению задач, примеры вычислений и вопросы для самоконтроля.

Предназначены для студентов очно-заочного и заочного факультетов ветеринарной медицины.

Рецензенты: зав. каф. неорганической химии проф. В.В. Егоров; доцент каф. радиобиологии и рентгенологии Л.В. Рогожина.

Утверждены учебно-методической комиссией ветеринарно-биологического факультета (протокол № 6 от 21 февраля 2011 г.).

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Физика получила свое наименование от греческого слова "физис" – природа. Физические явления происходят в космосе и микромире, в неорганических и органических веществах, в неживой и живой природе. В настоящее время физику можно определить как науку о свойствах и строении материи, о простейших и вместе с тем наиболее общих формах движения материи и об их взаимных превращениях. Поэтому понятия и законы физики лежат в основе всего естествознания.

Животные и растения представляют собой самоуправляющиеся биологические системы, в которых протекают разнообразные физические процессы – механические, тепловые, электрические, оптические, а также сложнейшие биохимические реакции. Поэтому на стыке биологии, физики и химии возникла новая наука – биофизика, изучающая физические и физико-химические процессы в биологических системах на всех уровнях их организации, а также влияние различных физических факторов на живые организмы.

Биофизика успешно объясняет многие биологические явления. Сегодня эта наука тесно связана с электрофизиологией, офтальмологией, фармакологией, зоогигиеной и пр. Комплексные исследования физиков, биофизиков, биохимиков и физиологов позволили получить представление о строении и свойствах биологических молекул, механизмах действия клеточных мембран и клеточных структур. Успешно разрабатываются физико-математические модели биологических процессов. В зооветеринарной практике применяется большое количество приборов – диагностических, терапевтических, хирургических, действие которых основано на самых разнообразных физических законах. Использование современных физических методов в клинической ветеринарии и зоотехнии позволяет усовершенствовать диагностику, профилактику и лечение сельскохозяйственных животных и птицы и тем самым способствовать повышению их продуктивности. Ветеринарный врач и зоинженер должны быть хорошо знакомы как с биофизическими процессами,

протекающими в организме животных, так и с возможностями физической и электронной аппаратуры, с которой он может встретиться на производстве, в лаборатории и в клинике. Поэтому в учебные планы ветеринарных факультетов введена дисциплина «Биологическая физика», являющаяся базовой по отношению ко многим специальным дисциплинам, таким как: «Физиология сельскохозяйственных животных», «Радиобиология» и др. Задача ее заключается в изучении основных положений современной физики, в физической интерпретации ряда биологических явлений, а также описании некоторых физических и биофизических методов и приборов, широко используемых в сельскохозяйственной практике и в научных исследованиях.

Целью настоящих методических указаний является оказание помощи студентам заочных факультетов в изучении основ физики и биофизики. В них приведены общие методические указания, пояснения к некоторым разделам курса, требования, предъявляемые к студентам в отношении контрольных работ, методы решения некоторых наиболее характерных задач, вопросы и задачи для самоконтроля, указания к каждому из разделов. В конце каждого раздела приведены контрольные задания, а в конце указаний дается справочный материал.

#### **ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

Учебная работа студента заочного отделения при изучении курса «Физика и биофизика» складывается из самостоятельной работы и очных занятий.

Самостоятельная работа включает в себя изучение дисциплины по рекомендованным учебным пособиям, решение рекомендованных задач и выполнение контрольных работ.

Во время лабораторно-экзаменационной сессии студент слушает лекции, выполняет лабораторные работы и сдает по ним зачеты, а затем экзамен.

Если при самостоятельной работе студенту встречаются трудности, то ему следует обратиться за консультацией на кафедру физики своего института. Консультация может осуществляться или путем личной беседы с преподавателем, или в письменном виде.

#### **Самостоятельная работа с учебными пособиями**

Самостоятельная работа с учебными пособиями является основным видом работы студента-заочника, и на нее следует обратить особое внимание. Студенту рекомендуется:

1. Изучать курс систематически в течение всего учебного года. Как показывает опыт работы со студентами-заочниками, попытка изучить курс физики в сжатые сроки, во время приезда на экзаменационную сессию, никогда не приводит к положительным результатам. Поэтому необходимо в самом начале изучения курса составить для себя график работы, т.е., ознакомившись с программой и согласовав с ней материал учебного пособия, распределить его во времени по месяцам и работать регулярно, стараясь жестко придерживаться графика.

2. Курс «Биологическая физика» базируется на прочных знаниях школьного курса физики. Поэтому студенты, которые забыли те или иные разделы школьного курса, должны перед началом работы с вузовским учебным пособием повторить эти разделы по школьному учебнику. Это сократит затраты времени на изучение курса и позволит прочнее усвоить изучаемый материал.

3. Ни в коем случае нельзя изучать физику, только «читая» учебник. Как показывает педагогика, физические закономерности, а в особенности математические выкладки при этом не запоминаются, даже если при таком «чтении» все кажется ясным. Рекомендуется вести краткий конспект по каждому разделу изучаемого материала. Конспект должен быть именно кратким, не надо пытаться записывать в него целые главы учебника. В него следует записывать формулировки основных законов, математический вывод формул (обязательно!), наиболее важные чертежи, определения физических величин и единиц измерения этих величин. В конспект следует также записывать те вопросы, которые остались невыясненными при самостоятельном изучении, чтобы быстро вспомнить об этих вопросах при встрече с преподавателем.

4. Следует учсть, что студент не должен ограничиваться лишь запоминанием физических формул. Те формулы, которые приводятся в учебном пособии с выводом, студент обязан уметь выводить. Для того чтобы запомнить выводы формул, их необходимо два или три раза вывести самостоятельно, не заглядывая в учебник.

5. Рекомендуется обратить внимание на вопросы и задачи для самоконтроля, помещенные в конце каждого раздела пособия, так как аналогичные вопросы и задачи могут быть заданы студенту на зачете или на экзамене.

6. Все измерения физических величин в настоящее время производятся как правило, в международной системе единиц (СИ), и лишь в некоторых случаях, когда это удобно, можно пользоваться внесистемными единицами. Соотношения между единицами СИ и внесистемными единицами приводятся в таблице, прилагаемой к контрольным заданиям. Необходимо запомнить, что без твердого знания единиц измерения физических величин и без умения ими пользоваться невозможно усвоить курс физики и тем более применять свои знания на практике и решать задачи.

#### Требования, предъявляемые к решению задач

Прежде чем приступить к решению задач, ознакомьтесь с таблицами, приведенными в конце настоящих методических указаний.

Задачи по биофизике могут на первый взгляд показаться трудными, но когда выглядитесь в условия задачи, то увидите, что они сводятся к известным вам физическим законам.

Решение задач необходимо проводить в определенной последовательности, соблюдая ряд указанных ниже требований.

1. Выписать данные задачи в колонку в принятом стандартном буквенном обозначении. Если необходимо обозначить несколько сходных величин, можно ввести большие и малые буквы или индексы (например, различные сопротивления в электрической цепи можно обозначить  $R_1, R_2, R_3$  и т.д.).

2. Величины, приведенные в условиях задачи, выразить в одной системе единиц, наиболее подходящей для данной задачи (предпочтительно в СИ).

3. Вспомнить физические законы, на основании которых следует производить решение задачи. Дать формулировку этих законов. Написать соответствующие им формулы.

4. Если это необходимо, сделать схематический чертеж (рисунок, график, схему), поясняющий содержание задачи. Например, изобразить тело с приложенными к нему силами, график

изменения объема газа при нагревании, схему электрической цепи, ход лучей в оптических системах и т.д.

5. Решение задачи сопровождать краткими пояснениями.

6. Решение большинства задач сводится к составлению алгебраических уравнений, отражающих заданный физический процесс. Поэтому задачи необходимо доводить до конца не в числовом, а в буквенном виде. При таком способе ответ получается в виде формулы, которая позволяет проверить полученный результат, а промежуточные выкладки дают возможность проверять любую часть решения и исключить ошибки. Ответ, полученный в общем виде, позволяет сделать анализ решения, тогда как числовой ответ сделать это не дает возможности.

7. Получив ответ в виде алгебраической формулы, следует проверить его на основании правила размерностей, т.е. убедиться, что размерности правой и левой частей равенства совпадают.

8. Проверив совпадение размерностей, следует провести анализ полученного ответа и выяснить, удовлетворяет ли он условиям задачи. Так, при решении квадратного уравнения получаются два ответа, один из которых может не удовлетворять данным задачи, и его следует отбросить.

9. Проведя проверку, можно подставить в полученную формулу числовые значения величин, приведенных в условиях задачи. При арифметических подсчетах следует использовать правила приближенных вычислений и производить расчеты лишь с тем количеством значащих цифр, которое определяется условиями задачи или до трех значащих цифр. Если правило размерностей было проверено, то подставлять наименования в расчетную формулу не следует, так как это лишь загромождает расчеты. В окончательном результате наименование полученной величины записывается в СИ.

10. При решении следует пользоваться таблицами, которые приводятся в приложениях к контрольным заданиям.

При выполнении контрольных работ рекомендуется пользоваться таблицами основных формул, приводимых в каждом разделе пособия.

К разделам программы

Разделы программы	Литература (номера по библиографическому списку)
Введение	1, 2: Введение
Кинематика и динамика материальной точки. Законы сохранения	1, часть I, § 4, 5, 7–13, 16–18, 23
Колебания и волны	1, часть I, § 27, 28, 30–35
Основы акустики	2, гл. II
Гидродинамика и основы гемодинамики	1, часть I, § 24–26, 52, 60 2, гл. I
Основы молекулярно-кинетической теории	1, часть I, § 37–52
Реальные газы	1, часть I, § 65–68
Молекулярные явления в жидкостях	1, часть I, § 61–63; 6
Свойства твердых тел	1, часть I, § 10, 53, 54
Физические основы термодинамики. Термодинамика биологических систем	1, часть I, § 71–75 2, гл. III
Электростатика	1, часть II, § 1–10
Законы постоянного тока	1, часть II, § 11, 12, 14–16
Полупроводники	1, часть II, § 16, 19
Электромагнетизм	1, часть II, § 24–35
Переменный ток	1, часть II, § 36–38
Элементы электроники	1, часть II, § 18–20
Электромагнитные колебания и волны	1, часть II, § 40–42 2, гл. IV
Электрические явления в биологических системах	1, часть II, § 44–49
Геометрическая оптика	2, гл. V
Фотометрия	2, гл. V
Волновая оптика	1, часть II, § 51, 53–55, 58–60
Квантово-оптические явления	1, часть II, § 61, 62, 68, 69
Строение атома. рентгеновские лучи. Волновые свойства микрочастиц	1, часть II, § 66, 57, 63, 64
Взаимодействие света с веществом. Биологическое действие оптических излучений. Физические основы зрения	2, гл. V
Строение атомного ядра. радиоактивность. Свойства ионизирующих излучений и их применение в ветеринарии и зоотехнии	7 1, часть II, § 70–74, 78

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К РАЗДЕЛАМ  
ПРОГРАММЫ И КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

В приведенных ниже методических указаниях рассмотрены методы решения некоторых задач, аналогичных тем, которые предлагаются студентам в контрольных заданиях. Перед каждым разделом приведены основные законы и формулы, с которыми необходимо ознакомиться, прежде чем приступить к решению контрольной работы. Задачи, рекомендуемые для самостоятельного решения, указаны по задачникам, номера которых соответствуют их номерам в вышеприведенном списке литературы.

Правила приближенных вычислений

Числовые значения физических величин, с которыми приходится иметь дело при решении задач, в большинстве случаев являются приближенными, причем степень приближения зависит как от точности приборов, которыми измерялась данная физическая величина, так и от тех требований, которые выдвигаются условиями задачи.

Так, например, ускорение силы тяжести обычно принимается равным  $9,81 \text{ м/с}^2$ . Однако более точные измерения этой величины могут дать значение  $9,80665 \text{ м/с}^2$ . При решении же некоторых задач в целях упрощения расчетов можно принять значение этой величины равным  $10 \text{ м/с}^2$ .

Необходимо помнить, что точность конечного результата вычислений зависит только от точности измерений и ее невозможно повысить за счет точности вычислений, высчитывая много десятичных знаков после запятой. Рассмотрим это на примере следующей задачи.

За сколько времени падающее тело достигнет скорости  $58 \text{ м/с}$ ?

**Решение.** в соответствии с законами свободного падения

$$v = gt, a = \frac{58}{9,81}.$$

Проводя деление с помощью калькулятора, получим число 5,9123343 сек. Можно получить и большее количество десятичных знаков, но смысла это иметь не будет, так как вполне достаточно остановиться на числе 5,91, имеющем столько же значащих цифр, сколько их имеет исходное данное – 9,81.

Излишнее количество цифр при вычислениях не только не приносит пользы, но является грубой ошибкой, так как говорит о том,

что вычислитель не имеет представления о точности своих измерений и вычислений и бесполезно затрачивает свой труд и время.

Чтобы избежать вычисления ненужных цифр, необходимо соблюдать правила действия над приближенными числами:

1. Следует правильно записывать приближенные числа. Так, например, числа 5,6; 5,60; 5,600 – отнюдь не одно и то же число. В первой записи указано, что верны лишь цифры целых и десятых долей. Во втором числе верны сотые доли, а в третьем – также и тысячные, и, следовательно, измерения, в которых получено это число, оказались наиболее точными из всех трех измерений.

2. При сложении и вычитании приближенных чисел в результате надо отбрасывать по правилам округления цифры тех разрядов справа, которых нет хотя бы в одном из слагаемых. Так, например:

$$28 = 3,2 + 31,2 \approx 31.$$

Десятые доли отброшены, так как десятичные знаки первого слагаемого неизвестны.

3. При умножении и делении приближенных чисел в результате необходимо оставлять столько значащих цифр, сколько их имеется в числе с наименьшим количеством значащих цифр. Прочие цифры заменяют нулями или отбрасывают по правилам округления. Например:

$$\begin{aligned} 253 \cdot 13 &= 3289 \approx 3300, \\ 2,79 : 13 &= 0,2146 \approx 0,21. \end{aligned}$$

4. При возведении в степень или извлечении корня в результате надо оставлять столько значащих цифр, сколько их в исходном числе, с которым производится действие. Например:

$$2,5^2 = 6,25 \approx 6,3 \quad \sqrt{26,5} \approx 5,15.$$

5. При вычислении сложных выражений следует применять указанные правила в соответствии с видом производимых действий. Например:

$$\frac{(5,3 + 12,036\sqrt{4,88})}{2,7 \cdot 3,025}$$

Числа 5,3 и 2,7 имеют наименьшее количество значащих цифр, а именно две.

Произведя вычисления, округляем ответ до двух значащих цифр, т.е. до 4,7.

6. Табличные величины (число  $\pi$ ,  $\sqrt{2}$  заряд электрона и т.п.) следует брать с таким количеством значащих цифр, которое равно количеству значащих цифр в наименее точном из данных по условиям задачи.

## I. ВРАЩАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ ТВЕРДОГО ТЕЛА

### Основные законы и формулы

Наименование величины или физический закон	Формула
1	2
Угловая скорость $\omega$ и вычисление углового перемещения $\varphi$ по угловой скорости	$\omega = \frac{d\varphi}{dt}; \varphi = \int \omega dt$
Угловое ускорение $\epsilon$ и вычисление угловой скорости по угловому ускорению	$\epsilon = \frac{d\omega}{dt}; \omega = \int \epsilon dt$
Связь между линейными ( $v$ и $a_t$ ) и угловыми ( $\omega$ и $\epsilon$ ) величинами при вращательном движении	$v = \omega R; a_t = \epsilon R$
Угловая скорость при равнопеременном вращении	$\omega = \omega_0 + \epsilon t$
Угол поворота при равнопеременном вращении	$\varphi = \varphi_0 + \omega_0 t + \frac{\epsilon t^2}{2}$
Связь между угловой скоростью $\omega$ , частотой вращения $v$ и периодом вращения $T$ при равномерном вращении	$\omega = 2\pi v = \frac{2\pi}{T}$
Связь между углом поворота и числом оборотов $N$	$\omega = 2\pi N$
Основное уравнение динамики вращательного движения (связь между угловым ускорением, моментом силы $M$ и моментом инерции $J$ вращающегося тела)	$\epsilon = \frac{M}{J}$

1	2
Моменты инерции некоторых тел	
а) материальной точки массой $m$ на расстоянии $r$ от оси вращения	$J = mr^2$
б) полого цилиндра радиусом $R$	$J = mR^2$
в) сплошного цилиндра или диска радиусом $R$	$J = \frac{mR^2}{2}$
г) однородного тонкого стержня длиной $l$ относительно оси проходящей через его конец	$J = \frac{ml^2}{3}$
Момент импульса $L$	$L = J\omega$
Закон сохранения момента импульса	$J_1\omega_1 = J_2\omega_2$
Кинетическая энергия вращающегося тела	$E_k = \frac{J\omega^2}{2}$

#### Вопросы для самоконтроля

1. Дайте определение угловой скорости. Углового ускорения. Напишите соответствующие формулы. В каких единицах измеряются эти величины?
2. Выведите формулу для вычисления угловой скорости при равнопеременном вращении
3. Выведите формулу для вычисления угла поворота при равнопеременном вращении.
4. Дайте определение момента силы. В каких единицах измеряется момент силы?
5. Выведите основной закон динамики вращательного движения твердого тела
6. Дайте определение момента инерции. В каких единицах измеряется эта величина? Каков ее физический смысл?
7. Дайте определение момента импульса. Выведите закон сохранения момента импульса замкнутой системы вращающихся тел. Приведите примеры применения этого закона.
8. Выведите формулу кинетической энергии вращающегося тела.

#### Примеры решения задач

##### Задача 1.

Цилиндрический барабан ультрацентрифуги, применяющийся для разделения высокомолекулярных соединений, имеет диаметр 20 см и массу 5 кг. Для остановки барабана, вращающегося с частотой 9000 об/мин, к нему, после выключения электродвигателя, прижали тормозную колодку. Какую силу трения нужно приложить к боковой поверхности барабана, чтобы остановить его за 20 секунд? Сколько оборотов он сделает до полной остановки? Какова будет работа силы трения?

##### Решение.

$$2R = 20 \text{ см} = 0.2 \text{ м}$$

$$T = 5 \text{ кг}$$

$$\nu = 9000 \text{ об/мин} = 150 \text{ с}^{-1}$$

$$t = 20 \text{ с}$$

Момент силы трения, приложенной к поверхности барабана,  $M = FR$ . Считая барабан сплошным цилиндром, можно написать, что его момент инерции равен

$$N = ? F = ? A = ? \quad J = \frac{mR^2}{2}$$

Из основного уравнения динамики вращательного движения следует, что  $M = \epsilon J$ , где  $\epsilon$  – угловое ускорение. Следовательно,

$$FR = \epsilon \frac{mR^2}{2} \quad \text{и} \quad F = \frac{\epsilon mR}{2}. \quad (1)$$

Угловая скорость тела, вращающегося с угловым ускорением  $\epsilon$  и с начальной скоростью  $\omega_0$  по прошествии времени  $t$  от начала движения будет равна  $\omega = \omega_0 + \epsilon t$ . Так как барабан по условию задачи останавливается, то  $\omega = 0$ . Поэтому  $0 = \omega_0 + \epsilon t$ . Отсюда

$$\epsilon = -\frac{\omega_0}{t} = -\frac{2\pi\nu_0}{t}$$

Подставляя это выражение в формулу (1), получим:

$$F = -\frac{\pi m\nu_0 R}{t} \quad (2)$$

(знак минус означает, что сила замедляет вращение барабана).

Считая вращение барабана равнозамедленным, можно написать, что величина угла поворота

$$\varphi = \frac{\omega_0 + \omega}{2} t$$

Но так как  $\omega = 0$ , то

$$\alpha = \frac{\omega_0 t}{2} - \frac{2\pi v_0 t}{2} = \pi v_0 t. \quad (3)$$

С другой стороны, угол поворота связан с полным числом оборотов барабана соотношением

$$\varphi = 2\pi N. \quad (4)$$

Приравнивая правые части выражений (3) и (4), получаем:

$$2\pi N = \pi v_0 t. \text{ Откуда } N = \frac{v_0 t}{2}. \quad (5)$$

Работа силы трения, необходимая для полной остановки барабана, будет равна его кинетической энергии, т.е.

$$A = \frac{J\omega_0^2}{2} = \frac{mR^2 \cdot 4\pi^2 v_0^2}{2 \cdot 2} = \pi^2 mR^2 v_0^2, A = \pi^2 mR^2 v_0^2 \quad (6)$$

Проверим размерности формул (2) и (6):

$$[F] = \frac{\text{кг} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}}{\text{с}} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2} = \text{Н}.$$

$$[A] = \text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1} = \text{Дж}.$$

Таким образом, полученные формулы дают правильные размерности силы и работы.

Сделаем подстановку числовых значений заданных величин:

$$N = \frac{150 \cdot 20}{2} = 1500 \text{ оборотов.}$$

$$F = \frac{3,14 \cdot 5 \cdot 150 \cdot 0,1}{20} = -11,8 \text{ (Н)}$$

$$A = 3,14^2 \cdot 5 \cdot 0,1^2 \cdot 150^2 = 1,11 \cdot 10^4 \text{ (Дж)}$$

### ЗАДАЧА 2.

Горизонтальная платформа массой 150 кг вращается вокруг вертикальной оси, проходящей через центр платформы, делая 6 об/мин. Человек массой 60 кг стоит при этом на краю платформы. С каким числом оборотов будет вращаться платформа, если человек перейдет от края платформы к ее центру? Считать платформу круглым однородным диском, а человека – точечной массой

### Решение.

$$m_1 = 150 \text{ кг}$$

$$m_2 = 60 \text{ кг}$$

$$v_1 = 6 \text{ об/мин} = 0,1 \text{ с}^{-1}$$

$$v_2 = ?$$

На основании закона сохранения момента импульса можно записать:

$$J_1\omega_1 = J_2\omega_2,$$

где  $J_1$  – момент инерции платформы с человеком, стоящим на ее крае, а  $J_2$  – момент инерции платформы с человеком в ее центре.

Считая платформу однородным диском и человека точечной массой, можно написать:

$$J_1 = \frac{m_1 R^2}{2} + m_2 R^2.$$

Так как момент инерции точечной массы, находящейся в центре вращения платформы, равен 0, то

$$J_2 = \frac{m_1 R^2}{2}.$$

Таким образом, так как  $\omega \sim 2\pi v$ ,

$$\left( \frac{m_1 R^2}{2} + m_2 R^2 \right) 2\pi v_1 = \frac{m_1 R^2}{2} 2\pi v_2.$$

Отсюда

$$v_2 = v_1 \cdot \frac{m_1 + 2m_2}{m_2}.$$

Подставим числовые значения:

$$v_2 = 0,1 \cdot \frac{150 + 120}{60} = 0,45 \text{ (с}^{-1}\text{)}.$$

Итак, число оборотов платформы возрастет и станет  $0,45 \text{ с}^{-1}$ .

### ЗАДАЧА 3.

Косилка-измельчитель предназначена для скашивания травы и одновременного измельчения кормов для скота. Зависимость угла поворота барабана косилки КС-1 от времени дается уравнением:

$$\varphi = A + Bt + Ct^2, \text{ где } B = 0,6 \text{ рад/с} \text{ и } C = 0,25 \text{ рад/с}^2$$

Найти угловую скорость вращения барабана и линейную скорость точек на его поверхности через 10 с от начала вращения. Диаметр барабана 0,5 м.

*Решение.*

$$\varphi = A + Bt + Ct^2$$

$$B = 0.6 \text{ с}^{-1}$$

$$C = 0.25 \text{ с}^{-2}$$

$$t = 10 \text{ с}$$

$$D = 0.5 \text{ м}$$

$$\omega_0 = 2 \text{ рад/с}$$

Угловая скорость есть производная углового перемещения во времени:

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt} = B + 2Ct.$$

Подставляя числовые данные, получим:

$$\begin{aligned}\omega &= 0.6 \text{ с}^{-1} + 2 \cdot 0.25 \text{ с}^{-2} \cdot 10 \text{ с} = \\ &= 0.6 \text{ с}^{-1} + 5 \text{ с}^{-1} = 5.6 \text{ с}^{-1}.\end{aligned}$$

Линейная скорость  $v = \omega R = \omega \frac{D}{2}$ ,

$$v = 5.6 \text{ с}^{-1} \cdot 0.25 \text{ м} = 1.4 \text{ м/с}.$$

Ответ: Угловая скорость равна 5,6 рад/с, и линейная скорость равна 1,4 м/с.

*(Контрольные задачи)*

1.0. Диаметр барабана зерноуборочного комбайна «Дон-1200» равен 800 мм. Угол поворота барабана после его включения изменяется по закону  $\varphi = A\sqrt{t} + Ce^{kt}$ . Найти частоту вращения барабана через 0,5 мин после его включения, а также линейную скорость точек на его поверхности.  $A = 3400 \text{ рад с}^{-1/2}$ ,  $B = 0.01 \text{ с}^{-1}$ ,  $C = 32700 \text{ рад}$ .

1.1. Частота вращения коленчатого вала трактора Т-130 задана уравнением:  $v = A + B\sqrt{t} + C\sqrt[3]{t}$ , где  $A = 3 \text{ с}^{-1}$ ,  $B = 3.79 \text{ с}^{-3/2}$ ,  $C = -2.79 \text{ с}^{-4/3}$ . Сколько оборотов сделает коленчатый вал через 10 с от начала вращения?

1.2. Диаметр барабана зерноуборочного комбайна «Колос» равен 600 мм и масса его 50 кг. С каким угловым ускорением должен вращаться барабан, чтобы через 20 с от начала вращения он приобрел кинетическую энергию 850 кДж? Считать барабан полым цилиндром.

1.3. Барабан сепаратора «Урал», момент инерции которого равен  $2.63 \cdot 10^4 \text{ кгм}^2$ , вращается с частотой 8200 об/мин. Какой тормозящий момент надо приложить к поверхности барабана, чтобы остановить его за 5,5 мин?

1.4. Для отделения клеточных органелл от протоплазмы необходимы перегрузки, достигающие  $2 \cdot 10^6 g$ . С какой частотой

должна вращаться при этом пробирка с клеточной супензией, которая находится на дне пробирки на расстоянии 10 см от оси вращения? С каким угловым ускорением должна вращаться пробирка, чтобы достичь рабочей частоты через 2 мин от начала вращения?

1.5. Человек стоит на скамье Жуковского и ловит рукой мяч массой 35 г, летящий горизонтально со скоростью 25 м/с. Ладонь человека расположена на расстоянии 0,8 м от оси вращения скамьи. С какой угловой скоростью начнет вращаться скамья с человеком, поймавшим мяч, если суммарный момент инерции человека и скамьи равен 6,2 кг·м<sup>2</sup>?

1.6. На скамье Жуковского стоит человек и держит над головой стержень длиной 1,5 м и массой 6 кг, расположенный вертикально по оси вращения скамьи, которая вращается с частотой 48 об/мин. С какой частотой будет вращаться скамья с человеком, если он повернет стержень в горизонтальное положение, держа его за середину? Суммарный момент инерции человека и скамьи равен 6,5 кг·м<sup>2</sup>.

1.7. Ротор вакуумного насоса в доильной установке вращается так, что угол поворота его изменяется по закону  $\varphi = A(1 - e^{-kt})$ , где  $A = 1,24 \text{ рад}$  и  $k = 0,032 \text{ с}^{-1}$ . Считая ротор сплошным цилиндром массой 8,4 кг и диаметром 22 см, вычислить кинетическую энергию ротора через 10 с от начала вращения.

1.8. Для исследования воздействия вращения на вестибулярный аппарат человека массой 70 кг и ростом 180 см кладывают на вращающуюся скамью так, что ось вращения проходит через его центр. Какую силу надо приложить к ступням человека, чтобы за 30 с сообщить ему угловую скорость 3 рад/с? Момент инерции скамьи 2,5 кг·м<sup>2</sup>. Вычисление момента инерции человека провести как для однородного стержня. Сила направлена по касательной к окружности вращения.

1.9. Для выделения макромолекул белка из раствора его помещают в центрифугу, которая начинает вращаться с угловым ускорением  $0,8 \text{ с}^{-2}$ . Вычислить тангенциальное и нормальное ускорения макромолекулы белка, находящейся на дне пробирки на расстоянии 15 см от центра вращения, через 10 с от начала движения. Вычислить величину центростремительной силы действующей на молекулу, если ее относительная молекулярная масса равна 350 000.

## II. АКУСТИКА

### Основные законы и формулы

Наименование величины или физический закон	Формула
Длина волны - $\lambda$ . Скорость звука - $u$ . Частота звука - $v$ .	$\lambda = \frac{u}{v}$
Интенсивность звука $J$ . Акустическое давление -- $p_0$ , плотность вещества - $\rho$	$J = \frac{p_0^2}{2\rho u} = \frac{1}{2} \rho u A^2 v^2$
Удельное акустическое сопротивление вещества	$\rho u$
Уровень интенсивности звука в децибелах (дБ). $J_0$ – интенсивность звука на пороге слышимости	$L = 10 \lg \left( \frac{J}{J_0} \right)$
Коэффициент отражения звука $r$ на границе раздела двух сред (формула Рэлея)	$r = \left( \frac{\rho_1 u_1 + \rho_2 u_2}{\rho_1 u_1 + \rho_2 u_2} \right)^2$
Коэффициенты отражения ( $r$ ) и пропускания ( $t$ ):	$r = \frac{J_{\text{отв}}}{J_{\text{зап}}}; t = \frac{J_{\text{пр}}}{J_{\text{зап}}}; r + t = 1.$

Закон поглощения звука в веществе толщиной  $L$ :

$$J = J_0 e^{-kL}$$

$k$  – показатель поглощения.

### Вопросы для самоконтроля

- Каковы источники звуковых колебаний? Приведите примеры.
- От чего зависит скорость звука в различных средах?
- Дайте определение интенсивности звука, акустического давления и удельного акустического сопротивления вещества. В каких единицах измеряют эти величины?
- От чего зависит коэффициент отражения звука на границе раздела между двумя средами? Что надо сделать, чтобы добиться максимального проникновения звука из одной среды в другую?
- Объясните сущность эффекта Доплера. Что называют доплеровской частотой и чему она равна?
- На сколько децибел возрастет уровень интенсивности звука, если его интенсивность возрастет в 100 раз? в 1000 раз?

7. Сформулируйте закон Вебера – Фехнера.

8. Расскажите, каков механизм восприятия звука ухом млекопитающего. Почему теория звукового восприятия Гельмгольца получила название резонансной?

9. Что называют акустическим шумом? К каким физиологическим нарушениям приводит действие шума на животных?

10. Каковы методы получения ультразвука? Расскажите о преимуществах и недостатках каждого из этих методов.

11. Каков механизм взаимодействия ультразвука с веществом? Что представляет собой явление кавитации?

12. Расскажите о применении ультразвука в ветеринарной терапевтической и хирургической практике.

13. Расскажите о различных видах диагностики на основе эффекта Доплера.

### Примеры решения задач

#### ЗАДАЧА 4.

В лабораторном помещении, находящемся в здании птичника, уровень интенсивности шума достигал 80 дБ. С целью уменьшения шума было решено обить стены лаборатории звукоизолирующими материалом, уменьшающим интенсивность звука в 1500 раз. Какой уровень интенсивности шума станет после этого в лаборатории?

#### Решение.

$$L = 80 \text{ дБ}$$

$$\frac{J_2}{J_1} = \frac{1}{1500}$$

Уровень интенсивности звука в децибелах:

$$L = 10 \lg \frac{J}{J_0}$$

$$L_2 = ?$$

где  $J_0$  – условный нулевой уровень интенсивности звука ( $J_0 = 1 \text{ лВт/м}^2$ ).

При изменении интенсивности звука изменение уровня интенсивности звука будет равно:

$$\Delta L = L_2 - L_1 = 10 \lg \frac{J_2}{J_0} - 10 \lg \frac{J_1}{J_0} = 10 \left( \lg \frac{J_2}{J_0} - \lg \frac{J_1}{J_0} \right)$$

$$= 10(\lg J_2 - \lg J_0 - \lg J_1 + \lg J_0) = 10(\lg J_2 - \lg J_1) - 10 \lg \frac{J_2}{J_1}$$

$$\text{Отсюда } L_2 = L_1 + 10 \lg \frac{J_2}{J_1}.$$

Подставляя числовые значения, получим:

$$\begin{aligned} L_2 &\sim 80 + 10 \lg \frac{1}{1500} = 80 - 10 \lg 1500 = 80 - 10(\lg 1,5 + 3) = \\ &= 80 - 10 \cdot 3,176 = 48,24 \text{ (дБ)} \end{aligned}$$

Ответ уровень интенсивности шума 48,24 дБ.

#### Задача 5.

На границу раздела между водой и воздухом падает плоская звуковая волна с интенсивностью  $0,5 \text{ Вт}/\text{м}^2$ . Какова будет интенсивность звука, прошедшего в воду?

Решение.

$$J_1 = 0,5 \text{ Вт}/\text{м}^2$$

$$u_1 = 331 \text{ м/с}$$

$$u_2 = 1497 \text{ м/с}$$

$$\rho_1 = 1,29 \text{ кг}/\text{м}^3$$

$$\rho_2 = 1 \cdot 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$$

$$J_2 = ?$$

Интенсивность звука в воде будет равна интенсивности звука в воздухе, умноженной на коэффициент проникновения звука  $\tau$  из воздуха в воду, который равен  $\tau = 1 - r$ , где  $r$  – коэффициент отражения на границе раздела двух сред, вычисляемый по формуле Рэлея:

$$r = \left( \frac{\rho_2 u_2 - \rho_1 u_1}{\rho_2 u_2 + \rho_1 u_1} \right)^2 = \left( \frac{1 - \frac{\rho_1 u_1}{\rho_2 u_2}}{1 + \frac{\rho_1 u_1}{\rho_2 u_2}} \right)^2,$$

где  $\rho$  и  $u$  – соответственно плотность среды и скорости звука в этой среде, а произведение  $\rho u$  есть акустическое сопротивление среды. Значения  $\rho$  и  $u$  для воздуха и воды приведены в условиях задачи

Подставим числовые значения:

$$r = \left( \frac{1 - \frac{1,29 \cdot 331}{1497 \cdot 10^3}}{1 + \frac{1,29 \cdot 331}{1497 \cdot 10^3}} \right)^2 = \left( \frac{1 - 0,285 \cdot 10^{-3}}{1 + 0,285 \cdot 10^{-3}} \right)^2 = 0,9988$$

Коэффициент проникновения:  $\tau = 1 - r = 1 - 0,9988 = 1,2 \cdot 10^{-3}$ .

$$J_2 = J_1 \tau = 0,5 \cdot 1,2 \cdot 10^{-3} = 0,6 \cdot 10^{-3} \text{ мВт}/\text{м}^2.$$

Ответ интенсивность звука в воде  $0,6 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}/\text{м}^2 = 0,6 \text{ мВт}/\text{м}^2$

#### Контрольные задачи

2.0 Для лечения синовита у крупного рогатого скота применяют ультразвук с интенсивностью  $0,65 \text{ Вт}/\text{см}^2$ . Энергия ультразвука, которую надо сообщить за одну процедуру, должна быть равна 1,8 кДж. Сколько времени должна длиться одна процедура облучения, если площадь головки излучателя  $8 \text{ см}^2$ ? Коэффициент проникновения ультразвука в ткань равен 0,85.

2.1 Установленная на высоком столбе сирена создает на расстоянии 50 м от нее уровень интенсивности звука в 110 дБ. На каком расстоянии от сирены уровень интенсивности звука снизится до 60 дБ?

2.2 Какая доля интенсивности звука проходит из воздуха через барабанную перепонку в среднее ухо? Плотность воздуха  $1,295 \text{ кг}/\text{м}^3$ , скорость звука в воздухе 331 м/с. Плотность барабанной перепонки  $1060 \text{ кг}/\text{м}^3$ , скорость звука в ней 1540 м/с. Поглощением звука в перепонке пренебречь.

2.3 Вычислить коэффициент отражения ультразвука при переходе его из кварцевого излучателя в оргстекло. Плотности кварца и оргстекла соответственно равны  $2500$  и  $1180 \text{ кг}/\text{м}^3$ , модули упругости кварца и оргстекла соответственно равны  $68 \text{ ГПа}$  и  $3,5 \text{ ГПа}$ .

2.4 Какое звуковое давление создает ультразвук с уровнем интенсивности 100 дБ, распространяющийся в печени со скоростью 1,5 км/с? Плотность печени  $1100 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

2.5 Разрыв барабанной перепонки наступает при уровне интенсивности звука в 150 дБ. Определить интенсивность звука и амплитуду смещения частиц в волне для звука с частотой 2 кГц, при которых наступает разрыв барабанной перепонки. Скорость звука в воздухе 330 м/с. Плотность воздуха  $1,29 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

2.6 Определить среднюю силу, действующую на барабанную перепонку человека при разговоре, когда уровень интенсивности звука достигает 60 дБ. Считать площадь барабанной перепонки  $66 \text{ мм}^2$ . Плотность воздуха  $1,29 \text{ кг}/\text{м}^3$ , скорость звука в воздухе 330 м/с.

2.7 Показатели поглощения ультразвука с частотами 800 Гц и 2,4 МГц в мышцах соответственно равны  $0,192 \text{ см}^{-1}$  и  $0,576 \text{ см}^{-1}$ . Вычислить для этих частот толщину мышечной ткани, в которой интенсивность ультразвука уменьшается в 2 раза. Во сколько

раз уменьшится толщина слоя поглощения для высокочастотного ультразвука?

2.8. Доильная машина «Майга» создает вблизи от нее шум в 95 дБ. Какова интенсивность этого шума? Какова будет интенсивность шума в коровнике, если стены его снижают уровень шума на 30 %?

2.9. Уровень интенсивности звука при мычании коровы составляет 75 дБ. Каков будет уровень интенсивности звука при одновременном мычании 12 коров?

### III. ГИДРОДИНАМИКА

#### Основные законы и формулы

Наименование величины или физический закон	Формула
Объемный расход жидкости в потоке $S$ – площадь сечения потока, $v$ – скорость жидкости	$Q = Sv$
Уравнение неразрывности потока	$v_1 S_1 = v_2 S_2$
Уравнение Бернулли ( $\rho$ – плотность жидкости)	$p_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} + \rho g h_1 = p_2 + \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho g h_2$
Закон Стокса	$F_C = 6\pi\eta rv$
Работа перемещения объема жидкости $V$ со скоростью $v$ под действием разности давлений $\Delta p$	$A = \Delta p \cdot V + \frac{\rho v^2 V}{2}$
Объемный расход вязкой жидкости в трубе длиной $L$ и радиусом $R$	$Q = \frac{\pi R^4 \Delta p}{8\eta L}$

#### Вопросы для самоконтроля

1. Какую жидкость называют идеальной? Приведите примеры. Можно ли считать кровь идеальной жидкостью?
2. Что называют объемным расходом жидкости? В каких единицах он измеряется?
3. Выведите уравнение неразрывности потока жидкости.
4. Запишите уравнение Бернулли. Каков физический смысл этого уравнения? Каждого члена этого уравнения?
5. Объясните принцип действия приборов, применяемых в ветеринарии и основанных на законе Бернулли.

6. Сформулируйте закон Ньютона для вязкой жидкости. Дайте определение динамического коэффициента вязкости.

7. Сформулируйте закон Стокса. Как определяют коэффициент вязкости на основе закона Стокса?

8. От чего зависит скорость оседания эритроцитов? Каким методом ее определяют?

9. Объясните, почему скорость жидкости в капиллярах меньше, чем в артериях.

10. Выведите формулу для вычисления работы сердца на основе уравнения Бернулли. Почему этот расчет носит приближенный характер?

#### Примеры решения задач

##### Задача 6.

В дождевальной установке вода подается сначала по трубе диаметром 40 мм, а затем по трубе диаметром 24 мм. Статические давления в широкой и узкой частях трубы равны соответственно 150 кПа и 60 кПа. Определите скорость течения воды в узкой части трубы.

##### Решение.

$$2R = 40 \text{ мм} = 0,44 \text{ м}$$

$$2R_2 = 24 \text{ мм} = 0,024 \text{ м}$$

$$p_1 = 150 \cdot 10^3 \text{ Па}$$

$$p_2 = 60 \cdot 10^3 \text{ Па}$$

$$\rho = 10 \text{ кг/м}^3$$

Скорость движения жидкости в горизонтальной трубе переменного сечения (если не принимать во внимание трения) изменяется в соответствии с уравнением Бернулли:

$$v_2 = ?$$

$$p_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = p_2 + \frac{\rho v_2^2}{2}$$

Кроме того, как следует из уравнения неразрывности потока жидкости,  $v_1 S_1 = v_2 S_2$ , где  $S_1$  и  $S_2$  – сечения трубы. Таким образом, неизвестная скорость  $v_1$  может быть выражена через исходную скорость  $v_2$  т.е.

$$v_1 = v_2 \frac{S_2}{S_1} = v_2 \frac{\pi R_2^2}{\pi R_1^2} = v_2 \left( \frac{R_2}{R_1} \right)^2$$

Подставим это значение  $v_1$  в уравнение Бернулли:

$$p_1 + \frac{\rho v_2^2 \left( \frac{R_2}{R_1} \right)^4}{2} = p_2 + \frac{\rho v_2^2}{2}$$

$$\text{Отсюда: } p_1 - p_2 = \frac{\rho}{2} v_2^2 \left[ 1 - \left( \frac{R_2}{R_1} \right)^4 \right].$$

$$\text{Следовательно, } v_2 = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho \left[ 1 - \left( \frac{R_2}{R_1} \right)^4 \right]}}.$$

Проверим размерность полученного выражения. Член, стоящий в квадратных скобках, безразмерный, поэтому

$$|v| = \sqrt{\frac{\text{Па}}{\text{кг} \cdot \text{м}^3}} = \sqrt{\frac{\text{Н} \cdot \text{м}^3}{\text{м}^2 \cdot \text{кг}}} = \sqrt{\frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{кг} \cdot \text{с}^2}} = \text{м/с}$$

Таким образом, размерность правой части полученного выражения совпадает с размерностью скорости.

Подставим числовые значения заданных величин:

$$v_2 = \sqrt{\frac{2(150 - 60) \cdot 10^3}{10^3 \left[ 1 - \left( \frac{0.012}{0.02} \right)^4 \right]}} = \sqrt{\frac{180}{1 - 0.06}} = 14.4 \text{ (м/с).}$$

Ответ: скорость течения воды в узкой части трубы равна 14,4 м/с.

### ЗАДАЧА 7.

В касторовое масло опустили стальной шарик диаметром 1 мм и определили, что расстояние в 5 см он падал 14,2 с. Считая движение шарика равномерным, определить вязкость касторового масла, если его плотность равна  $960 \text{ кг/м}^3$ , а плотность стали —  $7860 \text{ кг/м}^3$ .

Решение

$$2R = 1 \text{ мм} = 10^{-3} \text{ м}$$

$$\rho_c = 786 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$$

$$\rho_o = 786 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$$

$$\rho_m = 0.96 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$$

$$t = 14.2 \text{ с}$$

$$S = 0.05 \text{ м}$$

$$\eta = ?$$

На шарик, движущийся в вязкой жидкости, действуют три силы:

1) сила тяжести (вниз)

$$mg = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho_{o,g} g$$

2) выталкивающая, архимедова, сила (вверх)

$$F_A = \rho_m Vg = \frac{4}{3} \rho_m \pi R^3 g$$

3) сила трения, определяемая по закону Стокса (вверх)

$$F = 6\pi\eta Rv$$

При равномерном движении шарика алгебраическая сумма этих сил должна равняться нулю, т.е.

$$mg - F_A - F_v = 0, \text{ или} \\ \frac{4}{3} \pi R^3 \rho_{o,g} g - \frac{4}{3} \pi R^3 \rho_m g - 6\pi\eta Rv = 0.$$

После несложных преобразований получаем:

$$\eta = \frac{2gR^2(\rho_{o,g} - \rho_m)}{9v}$$

Поскольку скорость равномерного движения шарика

$$v = \frac{S}{t}, \text{ то}$$

$$\eta = \frac{2gR^2(\rho_{o,g} - \rho_m)}{9S} t$$

Проверим размерность полученного выражения:

$$[\eta] = \frac{\text{м} \cdot \text{с}^2 \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{кг}/\text{м}^3}{\text{м} \cdot \text{м} \cdot \text{с}} = \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}^2} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с}}{\text{с}^2 \cdot \text{м}^2} = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \cdot \text{с} = \text{Па} \cdot \text{с}.$$

Таким образом, размерность правой части полученного выражения совпадает с размерностью коэффициента внутренней трения.

Подставляем числовые значения:

$$\eta = \frac{2 \cdot 9.8 \cdot (0.5 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 14.2 (7.86 - 0.96) \cdot 10^3}{9 \cdot 0.05} = 1.0711 \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

Ответ: коэффициент вязкости касторового масла равен 1,07 Па·с.

### ЗАДАЧА 8.

Определить время протекания крови через капилляр вискозиметра, если вода протекает через него за 10 с.

Объемы воды и крови одинаковы.

Решение.

Эта задача решается с применением закона Гагена-Пуазейля, согласно которому объемный расход жидкости при ламинарном течении в трубе пропорционален четвертой степени радиуса трубы и градиенту давления и обратно пропорционален коэффициенту вязкости:

$$Q = \frac{\pi R^4 \Delta p}{8\eta L}$$

где  $Q = \frac{V}{t}$  – объемный расход жидкости, т.е. объем жидкости, протекающей через сечение трубы в единицу времени,  $r$  – радиус трубы,  $\Delta p$  – градиент давления,  $L$  – длина трубы,  $\eta$  – динамический коэффициент вязкости.

Из этой формулы следует, что объем жидкости, протекающей через сечение трубы за время  $t$ , равен (с учетом  $\Delta p = \rho gh$ , где  $\rho$  – плотность жидкости)

$$V = \frac{\pi r^4 \rho g h t}{8 \eta L}$$

Пусть через одну и ту же трубу за одно и то же время протекает одинаковое количество жидкостей, одна из которых – исследуемая, а другая – эталонная, т.е. обладающая известным коэффициентом вязкости. Так как при этом  $V = V_2$ , то, очевидно, можно написать:

$$\frac{\pi r^4 \rho_1 g h L}{8 \eta_1 L} = \frac{\pi r^4 \rho_2 g h L_2}{8 \eta_2 L_2}$$

После сокращения на одинаковые множители получим:

$$\frac{\rho_1 t}{\eta_1} = \frac{\rho_2 t_2}{\eta_2}$$

Отсюда время протекания исследуемой жидкости будет равно.

$$t = \frac{\rho_2 t_2}{\rho_1 \eta_2}$$

(в этих формулах мы обозначили индексом «2» величины, относящиеся к эталонной жидкости).

Коэффициенты вязкости воды и крови соответственно равны:  $1.0 \cdot 10^{-3}$  Па·с и  $4.0 \cdot 10^{-3}$  Па·с, плотности воды и крови соответственно равны:  $1.0 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> и  $1.06 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

Проведем вычисления:

$$t = \frac{20 \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 4 \cdot 10^{-3}}{106 \cdot 10^3 \cdot 10^{-3}} = \frac{800}{1.06} = 755 \text{ с.}$$

Ответ: кровь будет протекать через капилляр вискозиметра 755 с, т.е. 12,6 мин.

#### Контрольные задачи

3.0. Скорость потока крови в капиллярах равна примерно 30 мм/мин., а скорость потока крови в аорте 45 см/с. Во сколько раз площадь сечения всех капилляров больше сечения аорты? Во сколько раз динамическое давление крови в аорте больше, чем в капилляре?

3.1. Лекарственный раствор вводят в мышцу животного с помощью шприца, внутренний диаметр которого 10 мм, а диаметр иглы равен 0,5 мм. Определить скорость истечения раствора из иглы, если скорость перемещения поршня шприца равна 2,3 см/с

3.2. В кипятильнике «Титан» уровень воды в баке достигает 85 см. С какой скоростью вытекает вода из крана, расположенного у дна кипятильника, если диаметр бака 50 см, а диаметр трубы крана 15 мм?

3.3. Для орошения полей используют брандспойт, расположенный горизонтально на высоте 2,5 м над землей. Струя воды с площадью поперечного сечения 6 см<sup>2</sup> вытекает из трубы брандспойта и падает на землю на расстоянии 10 м от него. Найти избыточное давление воды в рукаве брандспойта, если площадь поперечного сечения рукава равна 45 см<sup>2</sup>.

3.4. При каждом сокращении человеческого сердца левый желудочек выталкивает в аорту 70 г крови под давлением 200 мм рт. ст. За минуту происходит 75 сокращений сердца. Определить работу, совершаемую сердцем в течение часа. Плотность крови  $1060 \text{ кг/м}^3$ . Какая часть этой работы переходит в кинетическую энергию потока крови, если скорость крови в аорте  $0.5 \text{ м/с}$ ?

3.5. Через кровеносный сосуд длиной 55 мм и диаметром 3 мм проходит в минуту 175 мл крови. Определить разность давлений на концах сосуда в мм р. ст. Коэффициент вязкости крови  $4.5 \text{ мПа}\cdot\text{с}$ .

3.6. Определить диаметр эритроцитов у коровы, если скорость их оседания (СОЭ) равна 0,7 мм/ч. Плотность эритроцитов  $1.25 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ , плотность крови  $1.055 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ , коэффициент вязкости плазмы крови  $5 \text{ мПа}\cdot\text{с}$ .

3.7. В цилиндрическую автолюпилку льется вода так, что за минуту в нее наливается 6,3 л. Для поддерживания уровня воды в поилке в ее дне сделано отверстие. Каков должен быть диаметр отверстия, чтобы уровень воды в поилке был 40 см?

3.8. Для непосредственного измерения давления крови хвостовую артерию коровы прокалывают и вставляют в нее шприцевую иглу, конец которой изогнут в виде трубки Пито навстречу потоку крови. Игла соединена с вертикальной трубкой, в которой можно измерить высоту поднятия крови. Определить высоту поднятия крови в трубке, если статическое давление в хвостовой артерии равно 95 мм рт. ст. и скорость потока крови равна 0,15 м/с. Плотность крови 1060 кг/м<sup>3</sup>.

3.9. Компрессор в опрыскивателе садовых деревьев создает давление в 0,75 МПа. На какое расстояние от опрыскивателя струя раствора падет на землю, если она направлена горизонтально, а высота отверстия опрыскивателя над уровнем земли равна 2,5 м? Плотность раствора равна 1250 кг/м<sup>3</sup>.

#### IV. БИОМЕХАНИКА

##### Основные законы и формулы

Наименование величины или физический закон	Формула
1	2
Напряжения нормальное ( $\sigma$ ) и тангенциальное ( $\tau$ ). $F_n$ – сила, нормальная к поверхности тела. $F_t$ – сила, направленная по касательной к поверхности.	$\sigma = \frac{F_n}{S}$ ; $\tau = \frac{F_t}{S}$
Относительная деформация при растяжении (сжатии). $\Delta L$ – абсолютные деформации.	$\varepsilon_L = \frac{\Delta L}{L}$ ; $\varepsilon_D = \frac{\Delta D}{D}$
Закон Гука при растяжении (сжатии) и при сдвиге. $E$ – модуль Юнга, $G$ – модуль сдвига. $\gamma$ – относительный угол сдвига	$\sigma = E\varepsilon$ ; $\tau = G\gamma$ $\gamma \approx G\gamma$
Закон Гука при кручении ( $\varphi = \Delta\varphi/L$ – относительный угол закручивания), $r$ – радиус нити. $\Delta\varphi$ – абсолютный угол закручивания	$\tau = Gr\varphi$
Соотношение между модулем Юнга и модулем сдвига ( $\mu$ – коэффициент Пуассона; $\mu = \varepsilon_0/\varepsilon_L$ ).	$G = \frac{E}{2(1+\mu)}$
Потенциальная энергия при деформации кручения ( $C$ – параметр, зависящий от формы скручиваемого тела).	$W_\varphi = \frac{C\varphi^2}{2}$

1	2
Момент пары сил, необходимый для закручивания тела на угол $\varphi$ ( $C$ – постоянная кручения).	$M = C\varphi$
Постоянная кручения для однородного стержня или нити длиной $L$ и диаметром $D$ .	$C = \frac{\pi G D^4}{32 L}$
Стрела прогиба ( $h$ ) трубы с внешним и внутренним диаметрами соответственно $D$ и $d$ и длиной $L$ , если к ее середине приложена сила $F$ перпендикулярно ее оси.	$h = \frac{2FL^3}{3\pi(D^4 - d^4)}E$
Объемная плотность энергии тела при деформации растяжения (сжатия)	$w_\sigma = \frac{E\varepsilon^2}{2} = \frac{\sigma^2}{2E}$

##### Вопросы для самоконтроля

- Приведите примеры механических явлений, происходящих в живом организме в процессе жизнедеятельности.
- Какие агрегатные состояния вещества рассматривают в биофизике? Почему термин «биоплазма» лишен физического содержания?
- Что представляют собой биологические кристаллы и чем отличаются от обычных кристаллов?
- Что представляют собой жидкие кристаллы (ЖК)? При каких условиях они существуют?
- Приведите примеры использования ЖК. Где встречаются ЖК в живых организмах?
- В каких состояниях могут находиться полимеры? Чем эти состояния отличаются друг от друга?
- Какие биологические ткани относятся к типу полимеров?
- Каковы свойства коллагена, эластина и резилина? С какими механическими явлениями в живых тканях связаны эти биополимеры?
- Сформулируйте закон Гука и выведите формулу для объемной плотности энергии при деформации растяжения (сжатия).
- Как проводят статические испытания материалов? Какие диаграммы получают при этом для различных материалов?
- Каковы методы определения модуля Юнга? Как измеряют модуль Юнга для высокозластичных материалов?
- Каковы механические свойства биологических тканей (костей, мышц, кожи, кровеносных сосудов)?

13. Какую роль играют упругие деформации в живых организмах?  
 14. Какие модели используют для описания высокоэластичных свойств биологических тканей?

#### Примеры решения задач

##### Задача 9.

Бедренная кость собаки имеет длину 25 см и сечение 3 см<sup>2</sup>. Какая работа совершается при сжатии кости на 0,5 мм, если модуль упругости кости 20 ГПа?

**Решение.**

$$E = 20 \text{ ГПа} = 2 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$$

$$L = 25 \text{ см} = 0,25 \text{ м}$$

$$\Delta L = 0,5 \text{ мм} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$$

$$S = 3 \text{ см}^2 = 3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

$$A = ?$$

Работа сжатия кости расходуется на увеличение ее потенциальной энергии, которая может быть вычислена по формуле:

$$A = \frac{\sigma^2}{2E} V,$$

где  $\sigma$  – напряжение упруго сжатого тела;  $E$  – модуль упругости и  $V = SL$  – объем тела.

По этой же формуле может быть вычислена и работа сжатия кости.

Следовательно,

$$A = \frac{\sigma^2 \cdot SL}{2E}.$$

Величина напряжения может быть вычислена по закону Гука:

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{1}{E} \sigma.$$

Следовательно,

$$\sigma = E \frac{\Delta L}{L}.$$

Подставляя это выражение в формулу работы, получим:

$$A = \frac{ES(\Delta L)^2}{2L}.$$

Проверим размерность полученной формулы.

$$[A] = \frac{(\text{Н} \cdot \text{м}^2) \cdot \text{м}^2 \cdot \text{м}^2}{\text{м}} = \text{Н} \cdot \text{м} = \text{Дж}.$$

Подставим числовые данные:

$$A = \frac{2 \cdot 10^{10} \cdot 3 \cdot 10^{-4} \cdot 25 \cdot 10^{-8}}{2 \cdot 0,25} = 3 \text{ Дж}$$

Ответ: работа сжатия кости равна 3 Дж.

##### Задача 10.

Мышечное волокно длиной 8 см и диаметром 2 мм растянуто силой 150 Н. На сколько изменится при этом боковая поверхность волокна? Коэффициент Пуассона равен 0,5. Модуль Юнга 0,9 ГПа.

**Решение.**

$$\mu = 0,5$$

$$L = 0,08 \text{ м}$$

$$D = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$F = 0,05 \text{ Н}$$

$$E = 0,9 \cdot 10^9 \text{ Па}$$

$$\Delta S = ?$$

Закон Гука при растяжении

$$\sigma = E \epsilon$$

Нормальное напряжение

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{4F}{\pi D^2}$$

Относительное удлинение

$$\epsilon_L = \frac{\Delta L}{L}$$

Подставим эти выражения в закон Гука:

$$\frac{4F}{\pi D^2} = E \frac{\Delta L}{L}$$

Отсюда абсолютное удлинение волокна:

$$\Delta L = \frac{4FL}{E\pi D^2}.$$

Обозначим относительное изменение диаметра волокна через  $\epsilon_D$ .

$$\text{Тогда } \epsilon_L = \mu \epsilon_D \text{ и } \epsilon_D = \frac{\epsilon_L}{\mu} = \frac{\Delta D}{D}.$$

$$\text{Отсюда } \Delta D = \frac{\epsilon_D L}{\mu} = \frac{4FD}{E\pi D^2 \mu} = \frac{4F}{E\pi D \mu}.$$

Площадь боковой поверхности волокна до растяжения:

$$S_1 = \pi D L.$$

Площадь боковой поверхности после растяжения:

$$S_2 = \pi(D - \Delta D)(L + \Delta L) = \pi(DL + DAL - LAD - \Delta D \Delta L) =$$

$$= \pi(DL + DAL - LAD)$$

(произведением двух малых величин  $\Delta L$  и  $\Delta D$  пренебрегаем).

Таким образом:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \pi(D\Delta L - L\Delta D) = \pi \left( \frac{4FL}{E\pi D} - \frac{4FL}{E\pi D\mu} \right) = \frac{4FL}{ED} \left( 1 - \frac{1}{\mu} \right)$$

Проверим размерность полученного выражения:

$$[\Delta S] = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{Н}} = \text{м}^2.$$

Подставим в формулу числовые данные

$$\Delta S = \frac{4 \cdot 0.15 \cdot 0.08}{9 \cdot 10^5 \cdot 2 \cdot 10^{-3}} \left( 1 - \frac{1}{0.5} \right) = -2.6 \cdot 10^{-5} (\text{м}^2).$$

Ответ: изменение площади поверхности волокна  $\Delta S = -2.6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 = -26 \text{ мм}^2$  (т.е. площадь поверхности уменьшилась).

#### Контрольные задачи

4.0 Тонкий стержень одним концом закреплен, а к другому концу приложен момент силы 3,5 Н·м. Определить угол закручивания, если постоянная кручения равна 125 Н·м/рад. Определить потенциальную энергию закрученного стержня.

4.1. Сухожилие собаки одним концом подвешено к штативу, а к другому концу прикреплен груз массой 1,25 кг. Вычислить удлинение сухожилия и уменьшение его диаметра, если его начальная длина была 7 см и диаметр 6 мм. Модуль Юнга для сухожилия 1,35 ГПа, коэффициент Пуассона 0,45.

4.2 Коллагеновое волокно диаметром 500 мкм растягивают силой 150 мН. Какова объемная плотность энергии в этом волокне, если модуль Юнга для него равен 4,35 ГПа?

4.3. Большеберцовую кость собаки положили на упоры, находящиеся на расстоянии 30 см друг от друга, и посередине между ними к ней приложили силу 280 Н. При этом стрела прогиба оказалась равной 34 мкм. Определить модуль Юнга для этой кости, считая ее цилиндром с внешним диаметром 3 см и внутренним диаметром 2,5 см.

4.4. Для определения модуля сдвига мышечного волокна его закрепляют одним концом, а к другому концу прикладывают врачающий момент 0,016 мкН·м. Длина волокна 15 см, диаметр 850 мкм. Определить модуль сдвига, если угол закручивания оказался 3°.

4.5. Сухожилие длиной 85 мм и площадью поперечного сечения 125 мм<sup>2</sup> при нагрузке 6,8 Н удлиняется на 17 мм. Вычислить модуль сдвига для этого сухожилия, если для него коэффициент Пуассона 0,68.

4.6. Внешний диаметр трубчатой кости свиньи равен 22 мм и толщина ее стенки равна 4,5 мм. К кости приложили осевую нагрузку в 12 кН. Произойдет ли разрыв кости, если предел прочности ее на разрыв равен 315 МАа?

4.7. С какой силой надо растягивать кость диаметром 12 мм, чтобы объемная плотность энергии в ней стала 18 кДж/м<sup>3</sup>? Модуль Юнга для кости равен 42 ГПа.

4.8. Мышцу длиной 15 см растянули так, что ее длина стала 18 см, при этом ее диаметр уменьшился с 23 мм до 10,5 мм. Определить коэффициент Пуассона для мышцы. Определить напряжение в мышце, если модуль Юнга для нее равен 0,85 МПа.

4.9. При исследовании упругих напряжений нижнее основание цилиндрического образца кости закреплено, а к ее верхнему основанию приложена сила 150 кН. Диаметр оснований 25 мм. Найти тангенциальное напряжение в образце и относительную деформацию (угол сдвига). Модуль Юнга для кости 15 ГПа, коэффициент Пуассона 0,65.

#### V. СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ. ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА

##### Основные законы и формулы

Наименование физической величины или физический закон	Формула
1	2
Коэффициент поверхностного натяжения $\sigma$ ( $F_H$ – сила поверхностного натяжения; $W$ – поверхностная энергия).	$\sigma = \frac{F_H}{L} = \frac{\Delta W}{AS}$
Высота $h$ поднятия жидкости в капилляре (формула Жюренса); $\Theta$ – угол смачивания, $\rho$ – плотность жидкости	$h = \frac{2\sigma}{\rho g \cos \Theta}$
Давление внутри сферического пузырька в жидкости (формула Лапласа)	$p_{ji} = \frac{2\sigma}{r}$
Уравнение диффузии (закон Фика)	$\Delta m = DS \frac{ \Delta p }{ Ax } \Delta t$

1	2
Уравнение теплопроводности (закон Фурье)  Закон Вант Гоффа для осмоса ( $\pi$ – осмотическое давление, $i$ – изотонический коэффициент, $R$ – универсальная газовая постоянная). Изотонический коэффициент $i = 1 + \alpha$ , где $\alpha$ – степень диссоциации	$\Delta Q = \Delta S \left  \frac{\Delta T}{\Delta x} \right  \Delta t$  $\pi V = i \frac{m}{\mu} RT$

#### Вопросы для самоконтроля

1. Объясните причины возникновения поверхностного натяжения
2. Дайте определение коэффициента поверхностного натяжения (КПН). Каковы единицы его измерения?
3. Каковы причины смачивания и несмачивания жидкостями поверхностей твердых тел?
4. Что называют краевым углом? Каковы величины краевых углов при смачивании и несмачивании?
5. Объясните поведение смачивающей и несмачивающей жидкостей в капиллярах.
6. Выведите формулу Жюрене.
7. Какую роль играют капиллярные явления в биофизике живого организма?
8. Какие явления относятся к явлениям переноса? Какие физические величины переносятся в этих явлениях?
9. Расскажите о явлении диффузии. Приведите примеры диффузии в живых организмах.
10. Каков физический смысл коэффициента диффузии? Какова его размерность?
11. Как происходит «облегченная диффузия» в клеточных мембранах?
12. Какой физический смысл имеет коэффициент теплопроводности? Какова его размерность?
13. Какова теплопроводность различных тканей живого организма? Каково биологическое значение различия теплопроводностей у разных тканей?
14. Что представляет собой явление осмоса? Сформулируйте закон Вант Гоффа.

15. Какова роль осмоса в биологических явлениях? Какие растворы называют изотоническими, гипертоническими, гипотоническими?

#### Примеры решения задач

##### ЗАДАЧА 11.

Определить радиус капилляра, в котором спирт поднимается на высоту 8 см. Плотность и КПН спирта приведены в таблицах.

##### Решение.

$$h = 8 \text{ см} = 8 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$\sigma = 22 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$\rho = 0,8 \cdot 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$$

$$R = ?$$

Высота поднятия жидкости (смачивающей) в капилляре определяется по формуле Жюрене:

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g R} \cos \theta$$

Считая, что имеет место полное смачивание стенок капилляра спиртом, можно написать, что величина краевого угла  $\theta = 0$  и  $\cos \theta = 1$ . Отсюда радиус капилляра

$$R = \frac{2\sigma}{\rho g h}$$

Проверим размерность полученной формулы:

$$[R] = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{(\text{м} \cdot \text{с}^2) \cdot (\text{кг}/\text{м}^3) \cdot \text{м}} = \frac{\text{Н}}{(\text{м}^2 \cdot \text{с}^2) \cdot (\text{кг} \cdot \text{м}^2)} = \frac{\text{Н} \cdot \text{с}^2}{\text{кг}} \\ = \frac{(\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2) \cdot \text{с}^2}{\text{кг}} = \text{м}$$

Произведем вычисления:

$$R = \frac{2 \cdot 22 \cdot 10^{-3}}{9,81 \cdot 0,8 \cdot 10^3 \cdot 8 \cdot 10^{-2}} = 7 \cdot 10^{-6} \text{ (м)}.$$

Ответ: радиус капилляра равен 70 мкм.

##### ЗАДАЧА 12.

В сосуде находится сыворотка крови, плотность которой  $1026 \text{ кг}/\text{м}^3$  и КПН которой равен  $6 \cdot 10^{-2} \text{ Н}/\text{м}$ . На глубине 25 см от поверхности жидкости образовался пузырек воздуха диаметром 20 мкм. Определить давление воздуха в пузырьке, если атмосферное давление равно 750 мм рт. ст.

*Решение.*

$$\begin{aligned} \rho &= 1026 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3 \\ \alpha &= 6 \cdot 10^{-4} \text{ Н/м} \\ h &= 25 \text{ см} = 0.25 \text{ м} \\ 2r &= 20 \cdot 10^{-3} \text{ м} \\ p_0 &= 750 \text{ мм рт. ст.} = \\ &= 750 \cdot 133 \text{ Па} \\ p &=? \end{aligned}$$

Давление воздуха внутри пузырька равно сумме трех давлений:  
 1. Атмосферное давление  $p_0$ .  
 2. Давление собственного веса жидкости на глубине  $h$ , равное  $p_h = \rho gh$ .

3. Давление, создаваемое изогнутой поверхностью жидкости, которая в случае сферической поверхности определяется по формуле (формула Лапласа):

$$p_2 = \frac{2\sigma}{r},$$

где  $r$  – радиус сферической поверхности.

Таким образом, давление внутри пузырька равно:

$$p = p_0 + \rho gh + \frac{2\sigma}{r}$$

Подставим в полученное выражение числовые данные.

$$p = 750 \cdot 133 + 1026 \cdot 10^3 \cdot 9,81 \cdot 0,25 + \frac{6 \cdot 2 \cdot 10^{-2}}{10^{-5}} =$$

$$= 114 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2 = 114 \cdot 10^4 \text{ (Па)} = \frac{114 \cdot 10^4}{133} = 857 \text{ (мм рт. ст.)}.$$

Ответ: давление воздуха в пузырьке равно 114 кПа (857 мм рт. ст.).

**Задача 13.**

Оsmотическое давление плазмы крови равно 0,73 МПа. Вычислить концентрацию белков в плазме, если известно, что создаваемое ими онкотическое давление в 220 раз меньше осмотического давления от растворенных в плазме солей. Степень диссоциации солей принять равной 0,75. Температура крови 37°C. (Об онкотическом давлении см. [2], гл. IV).

*Решение.*

$$\pi_{os} = 0,73 \text{ МПа} = 0,73 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

$$\alpha = 0,75, i = 1, \alpha_i = 0,75 = 1,75.$$

$$T = 310 \text{ К.}$$

$$\pi_{onk} = 1/220 \pi_{os}.$$

$$[C]_{onk} = ?$$

Оsmотическое давление вычисляют по закону Вант-Гоффа:

$$\pi V = i \frac{m}{\mu} RT$$

Отсюда

$$\pi = i \frac{m}{\mu V} RT$$

Величина  $\frac{m}{\mu V}$  есть концентрация солей  $[C]_{os}$ , определяющая осмотическое давление в молях на 1 м<sup>3</sup>. Следовательно,  $\pi_{os} = [C]_{os} RT$ . По этой же формуле можно вычислить и онкотическое давление, т.е.  $\pi_{onk} = [C]_{onk} RT$ . Так как онкотическое давление создается находящимися в плазме белками, то  $[C]_{onk} = [C]_b$ .

Таким образом,

$$[C]_b = \frac{\pi_{onk}}{i RT}$$

Проверим размерность полученного выражения.

$$[C]_b = \frac{\text{Па}}{\text{Дж} \cdot \text{К}} = \frac{\text{Па} \cdot \text{моль}}{\text{Дж} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{Н} \cdot \text{м}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{моль}}{\text{моль} \cdot \text{м}^2} = \text{моль/м}^3.$$

Подставим числовые значения.

$$[C]_b = \frac{0,73 \cdot 10^6}{220 \cdot 1,75 \cdot 8,31 \cdot 310} = 0,736 \text{ (моль/м}^3) = 0,736 \text{ (ммоль/л).}$$

Ответ: концентрация белков в плазме равна 0,736 ммоль/л.

**Задача 14.**

Определить коэффициент теплопроводности тазовой кости лошади, если через площадку этой кости размером 3×3 см и толщиной 5 мм за час проходит 68 Дж теплоты. Разность температур между внешней и внутренней поверхностями кости в теле лошади составляет 1°.

*Решение.*

$$Q = 68 \text{ Дж}$$

$$\Delta x = 5 \text{ мм} = 0,005 \text{ м}$$

$$\Delta T = 1 \text{ К}$$

$$t = 1 \text{ ч} = 3600 \text{ с}$$

$$S = 9 \text{ см}^2 = 9 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

$$\Lambda = ?$$

Считая (что не совсем точно), что для данного случая можно применить закон теплопроводности Фурье, напишем:

$$Q = \Lambda \left| \frac{\Delta T}{\Delta x} \right| S t. \quad \text{Отсюда}$$

$$\Lambda = \frac{Q\Delta x}{SAT} \left( \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{с}} \right)$$

Подставляем числовые значения

$$\Lambda = \frac{68 \cdot 0,005}{9 \cdot 10^{-4} \cdot 3600} = 0,105 \text{ (Вт/(м·К))}$$

Ответ: коэффициент теплопроводности кости  $\Lambda = 105 \text{ мВт/(м·К)}$ .

#### Контрольные задачи

5.0. Для приготовления лекарства получают масляную сuspензию дроблением масла в воде с помощью ультразвука. Капля масла, плотность которого  $900 \text{ кг/m}^3$ , дробится на капельки диаметром 2 мкм. Какая работа совершается при таком дроблении? Масса первичной капли 3,5 г. КПН на границе масло – вода 18 мН/м.

5.1. Вода из глубинных слоев почвы поднимается по капиллярам на высоту 53 см. Определить диаметр почвенных капилляров, считая их цилиндрическими, а смачивание полным. КПН воды 72 мН/м.

5.2 Вследствие небрежного внутривенного вливания лекарственного раствора внутри вены образовался воздушный пузырек диаметром 0,2 мм. Определить давление воздуха в пузырьке если давление крови в данном месте вены 10 мм рт. ст., а КПН крови на границе с воздухом 58 мН/м.

5.3. Из капилляра с внутренним диаметром 1 мм выпало 150 капель спирта общей массой 1065 мг. Определить КПН спирта, считая, что диаметр шейки капли равен диаметру капилляра, а смачивание полное.

5.4. Для определения КПН молока к центру покровного стеклышка прикрепляют легкую петельку, которую подвешивают к чувствительным весам. Пластиночку осторожно опускают на поверхность молока, а затем поднимают. В момент отрыва от пластиночки жидкости масса разновесков на противоположной чашке весов равна 204 мг. Определить КПН молока, если толщина пластиночки 0,5 мм, ее размеры  $10 \times 15$  мм и плотность стекла  $2450 \text{ кг/m}^3$ .

5.5. В кювету, в которой находится плазма крови, опущены две капиллярные трубки с внутренними диаметрами 1 мм и 0,7 мм. Разность высот поднятия жидкости в капиллярах оказалась,

равной 9,5 мм. Определить КПН плазмы крови, если ее плотность  $1045 \text{ кг/m}^3$ .

5.6. Определить коэффициент теплопроводности жировой ткани свиньи, если через ее жировой слой толщиной 25 мм за 1 мин проходит 10,9 Дж теплоты. Температура на внутренней поверхности слоя  $37^\circ\text{C}$ , а температура окружающего воздуха  $12^\circ\text{C}$ . Площадь исследуемой поверхности  $12 \times 12 \text{ см}^2$ .

5.7. Через слой зерна в элеваторе за час проходит 20,9 кДж тепла. Толщина слоя зерна 4 м и площадь его поверхности  $30 \text{ м}^2$ . Коэффициент теплопроводности зерна  $0,175 \text{ Вт/(м·К)}$ . Определить температуру в нижней части слоя зерна, если температура его поверхности  $10^\circ\text{C}$ .

5.8. За сутки в газообмене взрослого человека участвует 185 г кислорода, из которых 2% приходится на кожное дыхание. Вычислить градиент плотности кислорода в коже, если площадь поверхности тела принять равной  $1,9 \text{ м}^2$ , а коэффициент диффузии кислорода  $1,38 \text{ см}^2/\text{с}$ .

5.9. За сколько времени с поверхности почвы площадью  $600 \text{ м}^2$  проникает 10 кг углекислого газа, если коэффициент диффузии его в этой почве равен  $1,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ , а градиент его плотности в почве равен  $1,65 \cdot 10^{-5} \text{ г}/\text{см}^4$ ?

#### VI. ТЕРМОДИНАМИКА

##### Основные законы и формулы

Наименование величины или физический закон	Формула
1	2
Количество теплоты, необходимой для нагревания тела с удельной теплоемкостью с от температуры $T_1$ до температуры $T_2$ .	$Q = mc(T_2 - T_1)$
Теплота парообразования ( $r$ – удельная теплота парообразования)	$Q_n = mr$
Работа по переносу вещества при диффузии между поверхностями с концентрациями вещества $[C]_1$ и $[C]_2$	$A_d = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{[C]_1}{[C]_2}$

1	2
Оsmотическая работа ( $\pi_1$ и $\pi_2$ – осмотические давления).	$A_{osm} = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{\pi_1}{\pi_2}$
Изменение энтропии в изотермическом процессе	$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}$
Уравнение Менделеева-Клапейрона	$pV = \frac{m}{\mu} RT$
Уравнение Пуассона: $V$ – объем газа, $p$ – давление, $\gamma$ – коэффициент Пуассона. $C_p$ и $C_v$ – молярные теплоемкости газа при постоянном давлении и объеме, $i$ – число степеней свободы молекул газа	$pV^{\gamma} = \text{const}; TV^{\gamma-1} = \text{const}$ где $\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{i+2}{i}$
Теплота сгорания топлива, $q$ – удельная теплота сгорания	$Q_T = mq$
Коэффициент полезного действия (КПД)	$\eta = \frac{Q_{\text{п.действ}}}{Q_{\text{затрач}}}$

#### Вопросы для самоконтроля

1. Какие физические процессы изучают в разделе «Термодинамика»? В чем отличие термодинамического метода исследования тепловых процессов от метода исследования молекулярной физики?
2. Что называют термодинамическим процессом? Какие процессы называют обратимыми и какие необратимыми?
3. Дайте определения работы, количества теплоты, внутренней энергии.
4. Сформулируйте первое начало термодинамики. Приведите иллюстрирующие его примеры.
5. Чему равна работа, совершаемая газом при изохорическом, изобарическом и изотермическом процессах?
6. В чем сущность второго начала термодинамики?
7. Дайте определение энтропии. В каких процессах энтропия остается постоянной и в каких она возрастает?
8. Какие превращения энергии происходят в живом организме?
9. Сформулируйте закон Гесса и приведите примеры его применения в биологии.

10. От чего зависит теплопродукция живого организма? Как изменяется удельная теплопродукция с изменением массы животных?

11. Каковы физические механизмы терморегуляции живого организма?

12. Что называют термодинамическим потоком? С какими термодинамическими потоками приходится встречаться в живом организме?

13. Какое состояние термодинамической системы называют стационарным? Чем оно отличается от равновесного? Приведите примеры.

14. Почему живые организмы называют открытыми термодинамическими системами? Из чего складывается полное изменение энтропии в биологических системах?

15. Запишите уравнение Пригожина и объясните его биологический смысл

#### Примеры решения задач

##### ЗАДАЧА 15.

Какое количество эфира, находящегося при температуре кипения, должно испариться, чтобы энтропия увеличилась на 200 Дж/кг? Температура кипения эфира 34,8°C, удельная теплота парообразования эфира равна  $3,55 \cdot 10^5$  Дж/кг

**Решение.**

$$\tau = 3,55 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг.}$$

$$\Delta S = 200 \text{ Дж/кг.}$$

$$t = 34,8^\circ\text{C}; T = 307,8 \text{ K}$$

Изменение энтропии определяется по формуле:

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}$$

Поскольку в данной задаче происходит испарение при постоянной температуре, то  $\Delta Q = m\tau$ . Следовательно,

$$m = \frac{T\Delta S}{\tau}$$

$$m = \frac{307,8 \cdot 200}{3,55 \cdot 10^5} = 0,173 \text{ (кг).}$$

Ответ. масса испарившегося эфира 0,173 кг.

##### ЗАДАЧА 16.

Потенциал действия в гигантском аксоне кальмара обусловлен переносом 100 пг натрия из внеклеточной среды в аксо-

плазму. Считая, что этот процесс происходит за счет простой диффузии, вычислить работу диффузионных сил. Концентрации ионов натрия во внеклеточной среде и в аксоплазме соответственно равны 440 ммоль/л и 50 ммоль/л. Температура тела кальмаря 10°C.

**Решение.**

$$m = 100 \text{ нг} = 10^{-10} \text{ г}$$

$$\mu = 23 \text{ г/моль}$$

$$T = 283 \text{ К}$$

$$[C_1] = 440 \text{ мМ/л}$$

$$[C_2] = 50 \text{ мМ/л}$$

$$A_d = ?$$

Работу диффузионных сил вычислим по формуле:

$$A_d = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{[C_2]}{[C_1]}$$

Подставим числовые значения:

$$A_d = \frac{10^{-10}}{23 \text{ г/моль}} \cdot 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \cdot 283 \text{ К} \ln \frac{440}{50} = \\ = 222 \cdot 10^{-10} \text{ Дж} = 22,2 \text{ нДж}.$$

Ответ: работа диффузионных сил равна 22,2 нДж.

**Контрольные задачи**

6.0. Средняя теплопродукция у здорового человека равна примерно 4,2 кДж в 1 час за 1 кг массы тела. Потеря тепла на испарение равна около 30% всей теплопродукции организма. Определить количество влаги, выделяемой человеком массой 70 кг за сутки за счет испарения и потоотделения. Удельная теплота паробразования воды равна 2,42 МДж/кг.

6.1. Средний расход энергии на 1 кг массы человека в час во время сна равен 3,9 кДж, а во время бега по ровной дороге 25,2 кДж. Вычислить изменение энтропии в этих случаях за 1 ч человеком, масса которого 70 кг. Температуру человека принять равной 36,5°C.

6.2. Для прогревания крестцово-поясничной области коровы при ревматизме необходимо сообщить ей 650 кДж теплоты. Для этой цели накладывают торфяную аппликацию при температуре 70°C. Определить необходимую массу торфа, считая, что благодаря наружной теплоизоляции к телу коровы направлено 80% теплового потока от аппликации. Удельная теплоемкость торфа 3,35 кДж/(кг·К). Температуру поверхности тела коровы принять равной 37°C.

6.3. На поверхность грядки перпендикулярно к ней падают солнечные лучи, сообщающие каждому квадратному метру грунта 83 кДж в минуту тепла. На сколько градусов нагреется слой почвы толщиной 20 см за 1 час, если считать, что он прогревается равномерно? Удельная теплоемкость почвы 0,88 кДж/(кг·К), ее плотность 1600 кг/м<sup>3</sup>.

6.4. Суточный расход горячей воды в животноводческом хозяйстве составляет 950 л. Сколько тонн торфа надо заготовить на год для получения горячей воды, если его теплота сгорания 13,5 МДж/кг, КПД нагревателя 48%, а воду надо нагревать от 10°C до кипения? Удельная теплоемкость воды 4,18 кДж/(кг·К).

6.5. Во время летнего выпаса коров молоко после доения необходимо охлаждать до 5°C с целью его дальнейшего сохранения. Поэтому в местах выпаса заготавливают бурты со льдом. Какое количество льда необходимо заготовить на летний период, если предположительно будет получено 8000 т молока и его надо охлаждать от 37°C? Удельная теплота плавления льда 0,34 МДж/кг, его плотность 917 кг/м<sup>3</sup>, удельная теплоемкость молока 3900 Дж/(кг·К).

6.6. Обогрев помещения для стойлового содержания коров производят теплогенератором ТГП-1000, который потребляет 28 кг дизельного топлива за 1 ч работы при КПД 88%. За сколько времени прогреется воздух в помещении размером 85 × 25 × 10 м от 5°C до 15°C? Удельная теплоемкость воздуха 1005 кДж/(кг·К), плотность воздуха в этом диапазоне температур при нормальном атмосферном давлении 1,25 кг/м<sup>3</sup>. Теплота сгорания дизельного топлива 42 МДж/кг.

6.7. В операционной находится баллон с кислородом емкостью 20 л. Кислород в нем содержится при температуре 15°C. После израсходования части кислорода давление в баллоне понизилось до 7,6 МПа, а температура упала до 10°C. Определить массу израсходованного кислорода, если начальное давление было 10 МПа.

6.8. Птицефабрика, находящаяся в удаленном от центра районе, оборудована автономным электропитанием. В котельной электростанции за 20 ч работы сожжено 62 т каменного угля, имеющего теплоту сгорания 28,9 МДж/кг. Определить среднюю мощность электростанции, если в электроэнергию превращено 18% теплоты, полученной при сгорании угля.

6.9. В баллоне находится кислород под давлением 3 МПа и температуре 20°C. Давление воздуха в помещении 760 мм рт. ст. При открытии вентиля давление кислорода в баллоне быстро снижается до атмосферного. Найти температуру кислорода в баллоне при условии, что теплообменом между кислородом в баллоне и окружающим воздухом можно пренебречь.

## VII. ЭЛЕКТРОСТАТИКА. ПОСТОЯННЫЙ ТОК

### Основные законы и формулы

Наименование величины Или физический закон	Формула
1	2
Связь между напряжением ( $U$ ) и напряженностью ( $E$ ) однородного электрического поля ( $d$ – расстояние между двумя точками поля)	$E = \frac{U}{d}$
Электроемкость ( $C$ ) конденсатора, имеющего на обкладках заряд $q$	$C = \frac{q}{U}$
Электроемкость плоского конденсатора. $S$ – площадь пластины конденсатора, $d$ – расстояние между пластинами, $\epsilon_0$ – относительная диэлектрическая проницаемость	$C = \frac{\epsilon_0 S}{d}$
Общая электроемкость при параллельном соединении конденсаторов	$C_{\text{общ}} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots$
При последовательном соединении	$\frac{1}{C_{\text{общ}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots$
Энергия ( $W$ ) электрического поля внутри заряженного конденсатора	$W = \frac{CU^2}{2}$
Сила тока $J$	$J = \frac{\Delta q}{\Delta t}$
Плотность тока $j$	$j = \frac{J}{S}$
Закон Ома для участка цепи	$J = \frac{U}{R}$
Мощность тока $N$	$N = JU = J^2R = \frac{U^2}{R}$

1	2
Закон Джоуля–Ленца Соотношение между сопротивлениями в плечах моста Уитстона и соответствующими им длинами проволоки в реохорде	$Q = J^2Rt$ $\frac{R_1}{R_2} = \frac{L_1}{L_2}$

### Вопросы для самоконтроля

1. Напишите закон Кулона. Дайте определение электрической постоянной. Выведите ее размерность.
2. Дайте определение напряженности электрического поля. В каких единицах она измеряется?
3. Сформулируйте и докажите теорему Гаусса-Остроградского.
4. Пользуясь теоремой Гаусса-Остроградского, получите выражение для напряженности поля одной равномерно заряженной бесконечной плоскости.
5. Получите выражение для напряженности поля между двумя заряженными плоскостями.
6. Какие явления происходят при внесении диэлектрика в электрическое поле? Дайте определение относительной диэлектрической проницаемости.
7. Перечислите известные вам виды поляризации диэлектриков. Каким примерно временем релаксации характеризуется каждый из перечисленных нами видов поляризации?
8. От чего зависит работа перемещения заряда в электрическом поле? Зависит ли работа от формы траектории, по которой перемещают заряд?
9. Каков физический смысл потенциала? Разности потенциалов? В каких единицах они измеряются?
10. Какова связь между напряженностью и разностью потенциалов?
11. Каков физический смысл электроемкости проводника? От чего она зависит?
12. Выведите формулу электроемкости плоского конденсатора.
13. Почему клетки живых тканей обладают электроемкостью? Какие причины могут влиять на электроемкость клетки?
14. Какие условия необходимы для существования электрического тока?

15 Дайте определения силы тока, плотности тока, сопротивления и удельного сопротивления. Каковы определяющие их формулы? Каковы единицы измерения этих величин?

16 Сформулируйте законы Ома для участка цепи и для замкнутой цепи. Дайте определение электродвижущей силы источника тока.

17 Как вычисляется работа тока на участке цепи? Как вычисляется мощность тока?

18 Сформулируйте закон Джоуля–Ленца. Как используют тепловые действия тока в терапевтических целях и в сельскохозяйственном производстве?

#### Примеры решения задач

##### Задача 17.

Аппарат для гальванизации АГН-5 создает плотность тока  $0.12 \text{ mA/cm}^2 = 1.2 \text{ A/m}^2$ . Какое количество электричества проходит через тело коровы, если наложенные на поверхность кожи электроды имеют площадь  $15 \text{ dm}^2 = 1.5 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$  и процедура гальванизации длится 20 мин? Каково сопротивление участка тела коровы, если к электродам приложено напряжение 45 В?

##### Решение

$$j = 0.12 \text{ mA/cm}^2 = 1.2 \text{ A/m}^2$$

$$S = 15 \text{ dm}^2 = 1.5 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$$

$$t = 20 \text{ мин} = 1200 \text{ с}$$

$$U = 45 \text{ В}$$

$$\Delta q = ? \quad R = ?$$

$$\text{Плотность тока } j = \frac{J}{S}$$

$$\text{Сила тока } J = \frac{AU}{At}$$

$$\text{Закон Ома: } J = \frac{U}{R}$$

Отсюда находим:

$$\Delta q = JAt; \quad J = jS.$$

Следовательно  $\Delta q = jSAT$

$$\text{Из закона Ома: } R = \frac{U}{J} = \frac{U}{jS}$$

Проведем вычисления:

$$\Delta q = 1.2 \text{ A/m}^2 \cdot 1.5 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2 \cdot 1.2 \cdot 10^3 \text{ с} = 21.6 \text{ Кл.}$$

$$R = \frac{45 \text{ В}}{1.2 \text{ A/m}^2 \cdot 1.5 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2} = 25 \cdot 10^2 \text{ В/А} = 2,5 \text{ кОм}$$

##### Задача 18.

Средняя мощность разряда электрического сома примерно 8 Вт при напряжении 360 В. Время разряда 0,13 мс. Определить электроемкость электрических органов сома.

##### Решение.

$$N = 8 \text{ Вт}$$

$$U = 360 \text{ В}$$

$$t = 1.3 \cdot 10^{-4} \text{ с}$$

$$C = ?$$

Энергия электрического поля конденсатора

$$W = \frac{CU^2}{2}$$

$$\text{Мощность } N =$$

$$\frac{W}{t}$$

$$= \frac{CU^2}{2t}$$

$$\text{Отсюда } C = \frac{2Nt}{U^2}.$$

Проверим размерности:

$$[C] = \frac{\text{Дж}}{\text{В}^2} = \frac{\text{Дж}}{\text{В} \cdot \text{В}} = \frac{\text{Дж}}{\text{В} \cdot \text{Дж}} \cdot \frac{\text{Кл}}{\text{Кл}} = \frac{\text{Кл}}{\text{В}} = \Phi.$$

Проведем вычисления:

$$C = \frac{2 \cdot 8 \cdot 1.3 \cdot 10^{-4}}{360^2} = 1.6 \cdot 10^{-6} (\Phi).$$

Ответ: электроемкость электрических органов сома  $0.016 \text{ мКФ}$

#### Контрольные задачи .

7.0 Между двумя плоскими электродами, к которым приложено напряжение 24 В, находится образец живой ткани, который состоит из двух слоев сухой кожи и мышцы между ними, которую можно считать проводником. Толщина каждого слоя кожи 0,3 мм. Площадь электродов  $15 \text{ см}^2$ . Диэлектрическая проницаемость кожи 5,5. Вычислить величину заряда, находящегося между электродами в ткани.

7.1 Электроемкость перехвата Ранвье в аксоне лягушки равна 0,8 пФ. Электроемкость на единицу длины миелиновой оболочки аксона составляет 14 пФ. Длина миелиновой оболочки равна 2 мм. Считая, что электроемкости перехвата Ранвье и миелиновой оболочки соединены последовательно, вычислить емкость одного звена аксона и величину заряда на этом звене, если мембранный потенциал равен 75 мВ.

7.2 Метод бессетевого электролова основан на том, что рыбы чувствительны к электрическому полю. Если создать в воде

разность потенциалов, то рыба заходит в пространство между электродами и ее выграбают сачками. Напряженность поля, привлекающего тресковых и сельдевых рыб, составляет примерно 190 В/см. Отечественная установка для электролова ЭЛУ-1 размещается на двух лодках, расстояние между которыми 20 м. Какое напряжение должно быть подано на электроды этой установки? Какова плотность тока между электродами, если удельное сопротивление речной воды 35 Ом·м?

7.3. В одно из плеч моста Уитстона включено сопротивление 73 кОм, а в другое плечо – образец живой ткани коровы, вырезанный в виде столбика размерами  $2 \times 1 \times 0.4$  см. Стрелка гальванометра установилась на нулевом делении, когда плечи реохорда были равны 43 см и 57 см. Определить удельное сопротивление жировой ткани.

7.4. Плоский образец живой ткани площадью  $17 \text{ см}^2$  и толщиной 12 мм зажат между двумя электродами, напряжение между которыми 32 В. Вычислить силу тока в образце, если он состоит из двух слоев кожи толщиной по 250 мкм и мышечной ткани. Удельное сопротивление кожи 10 кОм·м и мышечной ткани – 2 Ом·м.

7.5 Для продления светового дня в зимний период в курятниках применяют искусственное освещение. Определить сопротивление реостата для курятника, в котором горят 8 ламп мощностью по 150 Вт каждая, если сопротивление реостата должно составлять 65% от общего сопротивления ламп. Напряжение в сети 220 В.

7.6 Входящий в комплект общефермерского оборудования электрический водонагреватель «ВЭТ-200» за 4 ч нагревает 200 л воды от  $10^\circ\text{C}$  до  $80^\circ\text{C}$ . Определить мощность тока, потребляемого нагревателем, если его КПД равен 90%.

7.7 К электродвигателю молотилки с полезной мощностью 3.68 кВт и КПД 85% энергия передается от колхозной электростанции на расстояние 150 м медными проводами с площадью поперечного сечения  $35 \text{ mm}^2$ . Определить, под каким напряжением работает мотор молотилки, если напряжение на клеммах генератора 220 В.

7.8. В двух стеклянных кюветах находятся плоские электроды. Кюветы соединены последовательно друг с другом и их зарядили от внешнего источника. Напряжение на обеих кюветах равно 65 В. Затем в одну из кювет налили растительное масло, после

чего напряжение на них стало равным 41 В. Определить диэлектрическую проницаемость растительного масла.

7.9. Для отопления крольчатника используют электрическую печь, включенную в сеть с напряжением 220 В. Помещение крольчатника теряет в сутки 315 МДж. Печь должна поддерживать температуру помещения постоянной. Вычислить длину никромовой проволоки диаметром 1 мм, необходимой для обмотки такой печи. Удельное сопротивление никрома  $100 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$ .

### VIII. БИОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

#### Основные законы и формулы

Наименование величины или физический закон	Формула
Закон Ома в электролитах при наличии ЭДС поляризации $E_p$	$J = \frac{U - E_p}{R}$
Закон Фараdea (закон электролиза) ( $m$ – масса выделенного вещества на электроде, $z$ – валентность, $A$ – атомная масса вещества, $F$ – число Фарадея).	$m = \frac{1}{Fz} \cdot Jt$
Сила порогового тока (закон Вейсса)	$J_0 = \frac{a}{t}$
Величина мембранных потенциала клетки $E_m [C_1]_i \text{ и } [C_2]_e$ – концентрации ионов по разные стороны клеточной мембраны	$E_m = \frac{RT}{zF} \ln \frac{[C_1]_i}{[C_2]_e}$
Уравнение Доннана	$\left[ \frac{K^+}{K^+} \right]_e = \left[ \frac{Cl^-}{Cl^-} \right]_i$
Затухание потенциала действия $E_d$ в аксоне на расстоянии $L$ от места возбуждения	$E = E_{d0} e^{-\frac{L}{Rd}}$
Константа затухания потенциала действия $K$ в аксоне диаметром $d$ .	$K = \sqrt{\frac{Rd}{4\rho}}$

*Вопросы для самоконтроля*

1. Какова структура и функции клеточных мембран?
2. Что называют электрохимическим градиентом клетки?
3. Выведите формулу для вычисления работы в поле электрохимического градиента.
4. Объясните, как возникает мембранный разность потенциалов. Выведите формулу для величины мембранныго потенциала.
5. Что представляет собой равновесие Доннана? Запишите уравнение Доннана.
6. Во сколько раз изменится мембранный потенциал, если концентрация ионов калия вне клетки увеличится в 2 раза?
7. Объясните механизм образования потенциала действия.
8. Как распространяется потенциал действия по нервному волокну? Можно ли считать аксон подобным электрическому кабелю?
9. Расскажите об электрических явлениях, происходящих на границе между твердым телом и электролитом. Запишите уравнение Нернста.
10. Что представляет собой явление электрофореза? Для каких целей он применяется в ветеринарии?
11. Какое физиологическое действие производит постоянный электрический ток? От чего зависит величина порогового электрического тока?
12. Запишите закон Вейсса. Что называют реобазой и хронаксией?
13. Расскажите о применении электрических явлений в терапевтических целях (гальванизация, электрофорез).
14. Какова природа электрического тока в электролитах? Сформулируйте закон Фарадея.

*Примеры решения задач*

**ЗАДАЧА 19.**

Вычислить величины потенциалов покоя клеток гигантского аксона кальмара в верхних слоях океана, где температура 25°C, и в глубине, где температура 6°C. Концентрация ионов калия в аксоне 410 мг·ион/кг, а концентрация ионов калия вне аксона 28 мг·ион/кг.

52

**Решение.**

$$\begin{aligned} [K]_n &= 28 \text{ мг·ион/кг} \\ [K]_o &= 410 \text{ мг·ион/кг} \\ t_1 &= 25^\circ\text{C}, T_1 = 298 \text{ K} \\ t_2 &= 6^\circ\text{C}, T_2 = 279 \text{ K} \\ E_M &=? E_{M2}=? \end{aligned}$$

Величина мембранныго потенциала клетки определяется разностью потенциалов между внутриклеточной и наружной по отношению к клетке средами. При соблюдении равновесия Доннана имеет место соотношение

$$E_M = \frac{RT}{F} \ln \frac{[K]_o}{[K]_n},$$

где  $[K]_o$  и  $[K]_n$  – соответственно концентрации калия внутри и снаружи клетки. R – универсальная газовая постоянная. F – число Фарадея.

Проверим размерность:

$$[E_M] = \frac{\text{Дж} \cdot \text{К} \cdot \text{моль}}{\text{К} \cdot \text{моль} \cdot \text{Кл}} = \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} = \text{В.}$$

$$E_{M1} = \frac{8,31 \cdot 298}{9,65 \cdot 10^4} \ln \left( \frac{410}{28} \right) = 688 \cdot 10^{-4} (\text{В});$$

$$E_{M2} = 644 \cdot 10^{-4} (\text{В}).$$

Ответ:  $E_{M1} = 688 \cdot 10^{-4} \text{ В} = 68,8 \text{ мВ};$

$$E_{M2} = 644 \cdot 10^{-4} \text{ В} = 64,4 \text{ мВ.}$$

**ЗАДАЧА 20.**

Электроды, наложенные на середину холки коровы, соединены с генератором прямоугольных импульсов (это означает, что создаваемое генератором напряжение резко возрастает до определенного значения, затем остается постоянным заданное время, по прошествии которого снова падает до нуля). Исследование пороговых реакций коровы показало, что величина хронаксии равна 0,82 мс и соответствующее ей значение раздражающего тока равно 21 мА. На основе этих данных написать выражение, дающее связь между величиной порогового тока и временем его действия.

**Решение.**

$$\begin{aligned} J_s &= 21 \text{ мА} = 21 \cdot 10^{-3} \text{ А} \\ t &= 0,82 \text{ мс} = 0,82 \cdot 10^{-3} \text{ с} \\ J(t) &=? \end{aligned}$$

Зависимость величины порогового тока от времени его действия дается законом Вейсса:

53

$$J_n = \frac{\alpha}{t} + b,$$

где  $b$  – реобаза, т.е. минимальная сила порогового тока при длительном его действии. Время  $t$ , необходимое для раздражения при силе тока, равной двум реобазам, называется хронаксией. Отсюда следует, что сила тока при хронаксии  $J_x = 2b$ . Это дает возможность вычислить значение константы  $b$ :  $b = J_x / 2 = 21/2 = 10,5 \text{ mA}$ .

Для нахождения константы Вейсса  $\alpha$  подставим в уравнение Вейсса значения  $J_x$  и  $b$ :

$$21 \cdot 10^{-3} \text{ A} = \frac{\alpha}{0,82 \cdot 10^{-3} \text{ c}} + 10,5 \cdot 10^{-3} \text{ A}.$$

Отсюда  $\alpha = 8,61 \cdot 10^{-6} \text{ A} \cdot \text{s}$ .

Таким образом, зависимость порогового тока от времени его действия будет выражена уравнением:

$$J_n = \frac{8,61 \cdot 10^{-6}}{t} + 10,5 \cdot 10^{-3} \text{ (ампер)}.$$

#### Контрольные задачи

8.0 Концентрация ионов натрия в межклеточной среде у каракатицы равна  $3,83 \text{ mM/l}$ . Определить концентрацию ионов натрия внутри аксона, если величина мембранных потенциала аксона равна  $-61 \text{ mV}$ . Температура тела каракатицы  $18^\circ\text{C}$ .

8.1 Мембранный потенциал мышечного волокна лягушки в 1,15 раза больше, чем мембранный потенциал гигантского аксона каракатицы, для которого отношение концентрации ионов калия внутри клетки к концентрации ионов калия в межклеточной среде равно  $340/10,4$ . Определить это отношение для мышечного волокна лягушки. Концентрации дачы в  $\text{mM/l}$ . Температуры тела лягушки и каракатицы считать одинаковыми.

8.2 Концентрация ионов хлора в нейроне собаки равна  $12 \text{ mM/l}$ , а величина мембранных потенциала равна  $75 \text{ mV}$ . Считая температуру тела собаки равной  $37^\circ\text{C}$ , определить концентрацию ионов хлора в межклеточной среде.

8.3 Концентрация ионов хлора в моторном нейроне кошки равна  $150 \text{ mM/l}$ , а во внеклеточной среде она равна  $125 \text{ mM/l}$ . Вычислить величину мембранных потенциала. Температуру тела кошки принять равной  $38^\circ\text{C}$ .

8.4 При заболевании щитовидной железы необходимо ввести в нее методом электрофореза  $5,8 \text{ g}$  йода через электрод площадью  $3 \times 15 \text{ cm}^2$ . Между электродом и кожей находится марлевая прокладка, смоченная раствором йодистого натрия. Процедура длится 10 мин. Какова должна быть плотность тока?

8.5 Сколько миллиграммов кальция и йода было введено в организм больного животного в процессе электрофореза, если в течение 20 мин в нем поддерживался ток в  $15 \text{ mA}$ ? Прокладка под положительным электродом была смочена раствором хлористого кальция, а под отрицательным электродом – раствором йодистого калия.

8.6 Измерения, проведенные методом радиоактивных индикаторов, показали, что в мышцах амфибии отношение концентрации ионов калия внутри клеток к концентрации этих же ионов во внеклеточной среде равно 50. Определить температуру клетки, если измеренная величина мембранных потенциала равна  $99 \text{ mV}$ .

8.7 В немилиенизированном волокне аксона кальмара из расстояния  $9,25 \text{ mm}$  от места возбуждения потенциал действия уменьшился от значения  $135 \text{ mV}$  до  $142 \text{ mV}$ . Вычислить константу затухания и поверхностное сопротивление мембраны, если удельное сопротивление аксоноплазмы равно  $0,66 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ , а диаметр аксона равен  $120 \text{ мкм}$ .

8.8 Диаметр волокна поперечнополосатой мышцы равен  $130 \text{ мкм}$ , удельное сопротивление цитоплазмы  $0,72 \text{ Ом} \cdot \text{м}$  и поверхностное сопротивление мембраны  $0,11 \text{ Ом на } 1\text{м}^2$ . В волокне возникает потенциал действия  $118 \text{ mV}$ . Какова будет величина этого потенциала на расстоянии  $8 \text{ mm}$  от места возбуждения?

8.9 Вычислить величину хронаксии для основания хвоста коровы при раздражении его прямоугольными импульсами электрического тока. Константа Вейсса  $\alpha = 2,6 \text{ мкA} \cdot \text{s}$ , величина реобазы  $b = 4,3 \text{ mA}$ . Вычислить сопротивление этого участка хвоста коровы, если к электродам приложено напряжение  $24 \text{ V}$ .

## IX. ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК

### Основные законы и формулы

Назначение величины или физический закон	Формула
Циклическая частота переменного тока	$\omega = 2\pi\nu$
Обобщенный закон Ома	$J_a = \frac{U}{Z}$
Емкостное сопротивление в цепи переменного тока	$X_c = \frac{1}{\omega C}$
Индуктивное сопротивление в цепи переменного тока	$X_L = \omega L$
Полное сопротивление $Z$ последовательной цепи переменного тока $R$ – активное сопротивление	$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$
Тангенс угла сдвига фаз между током и напряжением при последовательном соединении элементов цепи переменного тока, состоящей из электромкости и активного сопротивления	$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X_c}{R} = \frac{1}{\omega CR}$
Количество теплоты $q_d$ , выделяющейся в единице объема ткани в единицу времени при диатермии ( $\rho$ – удельное сопротивление)	$q_d = j^2 \rho$
Количество теплоты $q_y$ , выделяющейся в единице объема ткани в единицу времени при УВЧ-терапии ( $E$ – напряженность электрического поля)	$q_y = \frac{E^2}{\rho}$
Количество теплоты $q_p$ , выделяющейся в единице объема ткани при индуктотермии ( $B_m$ – амплитудное значение индукции магнитного поля, $K$ – постоянная)	$q_p = K \frac{\omega^2 B_m^2}{\rho}$
Соотношение между амплитудными ( $a$ ) и эффективными ( $a_{\text{eff}}$ ) значениями переменного тока и напряжения	$J_{\text{eff}} = \frac{J_a}{\sqrt{2}}$ $U_{\text{eff}} = \frac{U_a}{\sqrt{2}}$

### Вопросы для самоконтроля

- Расскажите о прохождении переменного тока через электромкость и индуктивность. Напишите формулы емкостного и индуктивного сопротивлений.
- Напишите формулу полного сопротивления при последовательном соединении элементов цепи переменного тока.
- Напишите обобщенный закон Ома для цепи переменного тока.
- Нарисуйте векторную диаграмму последовательной цепи переменного тока.
- Как определить сдвиг фаз между током и напряжением в последовательной цепи переменного тока?
- Каковы особенности прохождения переменного тока в живых тканях по сравнению с постоянным током?
- Какое физиологическое действие оказывает переменный ток малой частоты и высокой частоты?
- Объясните явление дисперсии полного сопротивления биологических тканей. От чего зависит величина дисперсии? Какое практическое применение находит это явление?
- Существуют ли индуктивное и емкостное сопротивление для живых тканей? Какие причины определяют емкостное сопротивление живой клетки?
- Каковы физические причины нагревания живых тканей в высокочастотных электромагнитных полях?
- В чем сущность диатермии, индуктотермии и УВЧ-терапии? Чем они отличаются друг от друга?
- Напишите формулы для вычисления теплового эффекта при диатермии, индуктотермии и УВЧ-терапии.
- Каковы преимущества измерения электросопротивления живых тканей на переменном токе по сравнению с постоянным током?

### Примеры решения задач

#### ЗАДАЧА 21.

Для регистрации переменных импульсных сигналов, создаваемых некоторыми рыбами, измерительный прибор соединяют через емкость с водой аквариума, в котором находится рыба. Ток, создаваемый рыбой, проходит через активное сопротивление воды и последовательно соединенные с ней конденсатор и измерительный прибор.

Определить величину тока в цепи, создаваемого рыбой африканский слоник (*Gnathonemus petersii*), если напряжение между головой и хвостом рыбы достигает максимального значения 4 В. Сопротивление воды 1 кОм, емкость конденсатора 0,05 мкФ. Частота импульсов 3 кГц. Колебания напряжения, создаваемого рыбой, условно считать гармоническими. Сопротивлением тела рыбы пренебречь.

$U = 4 \text{ В}$ :

$$R = 1 \text{ кОм} = 10^3 \text{ Ом}$$

$$C = 0,05 \text{ мкФ} = 5 \cdot 10^{-8} \text{ Ф}$$

$$v = 3 \text{ кГц} = 3 \cdot 10^3 \text{ Гц}$$

$$J = ?$$

Поскольку активное и емкостное сопротивление в цепи соединены последовательно, то обобщенный закон Ома для цепи переменного тока может быть записан в виде  $J = \frac{U}{Z}$ , где  $Z$  – полное сопротивление цепи, равное

$$Z = \sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}, \text{ т.к.}$$

$$\omega = 2\pi v, \text{ то } J = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{4\pi^2 v^2 C^2}}}.$$

Произведем вычисления:

$$4\pi^2 v^2 C^2 = 4 \cdot 3,14^2 \cdot 9 \cdot 10^6 \cdot 25 \cdot 10^{-16} = 8,9 \cdot 10^{-7};$$

$$1/4\pi^2 v^2 C^2 = 1/8,9 \cdot 10^{-7} = 1,12 \cdot 10^6;$$

$$\sqrt{R^2 + 1/4\pi^2 v^2 C^2} = \sqrt{10^6 + 1,12 \cdot 10^6} = 146 \cdot 10^3 \text{ Ом};$$

$$J = \frac{4}{146 \cdot 10^3} = 2,74 \cdot 10^{-3} \text{ А} = 2,74 \text{ мА.}$$

Ответ: сила тока равна 2,74 мА.

### Задача 22.

Сопротивление образца мышечной ткани животного измеряется при пропускании через него сначала постоянного, а затем переменного тока. При какой частоте переменного тока полное сопротивление ткани будет в 3 раза больше величины ее активного, омического сопротивления, равного 850 Ом? Емкость ткани равна 0,01 мкФ.

### Решение.

$$R = 850 \text{ Ом}$$

$$C = 0,01 \text{ мкФ} = 10^{-8} \text{ Ф}$$

$$Z = 3R$$

$$v = ?$$

Считая, что омическое и емкостное сопротивления ткани соединены последовательно, можно записать, что полное сопротивление ткани равно:

$$Z = \sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}.$$

Так как  $\omega = 2\pi v$ , а по условию  $Z = 3R$ , то

$$\sqrt{R^2 + \frac{1}{4\pi^2 v^2 C^2}} = 3R, \text{ или } R^2 + \frac{1}{4\pi^2 v^2 C^2} = 9R^2.$$

Отсюда

$$\frac{1}{4\pi^2 v^2 C^2} = 8R^2 \text{ и } v^2 = \frac{1}{32\pi^2 R^2 C^2}.$$

Следовательно,

$$v = \frac{1}{4\pi R C \sqrt{2}} = \frac{\sqrt{2}}{8\pi R C}.$$

Проверим размерность полученного выражения:

$$[v] = \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{Ф}} = \frac{1}{\text{В} \cdot \text{Кл}} = \frac{\text{А}}{\text{Кл}} = \frac{\text{А}}{\text{А} \cdot \text{с}} = \text{с}^{-1} (\text{Гц}).$$

Подставим числовые данные:

$$v = \frac{1,41}{8 \cdot 3,14 \cdot 850 \cdot 10^{-8}} = 6,60 \cdot 10^5 (\text{Гц}) = 660 (\text{кГц}).$$

Ответ: частота переменного тока равна 660 кГц.

### Контрольные задачи

9.0 Определить активное сопротивление образца мышечной ткани, если при изменении частоты переменного тока от 20 кГц до 35 кГц его полное сопротивление уменьшилось в 1,8 раза. Электроемкость образца 2,5 мкФ.

9.1 Для профилактики ряда заболеваний крупного рогатого скота применяют ультрафиолетовый облучатель ПРК-2, который подключают к сетевому напряжению через дроссель. Показания вольтметра и амперметра в цепи облучателя равны соответственно 220 В и 2,1 А. Мощность аппарата 375 Вт. Определить амплитудные значения тока и напряжения, сдвиг фаз между то-

ком и напряжением и индуктивность дросселя, если его активное сопротивление равно 2,15 Ом. Частота переменного тока 50 Гц.

9.2 В колебательном контуре для УВЧ-терапии имеется конденсатор емкостью 20 пФ и катушка с индуктивностью 1,5 мкГн и активным сопротивлением 15 Ом. Контур создает колебания с частотой 30 МГц. Определить полное сопротивление контура, если все его элементы соединены последовательно.

9.3 Интенсивность обмена веществ удобно характеризовать коэффициентом поляризации ткани, который равен отношению полных сопротивлений при частотах 10 кГц и 1 МГц. Например, для лечения мlekопитающих в норме это число должно быть равно 9. Вычислить во сколько раз поменяется электротемкость значения при указанном повышении частоты переменного тока. Активным сопротивлением ткани пренебречь.

9.4 При лечении желудка коровы методом диатермии необходимо при прогревании за одну процедуру сообщить ей 22 кДж тепла. Сколько времени надо проводить прогревание, если площадь электродов 250 см<sup>2</sup>, сила тока 1,15 А, удельное сопротивление ткани 18 Ом·м, а толщина прогреваемого участка 6 см?

9.5 При лечении плеврита методом УВЧ-терапии необходимо за одну 15-минутную процедуру в объеме ткани 450 см<sup>3</sup> выделить 8,15 кДж теплоты. Удельное сопротивление ткани 13 Ом·м. Вычислить эффективное значение напряженности электрического поля между электродами и амплитудное значение напряженности.

9.6 Какова электротемкость ткани, если ее полное сопротивление, измеренное на частоте 10 кГц, оказалось в 2 раза больше ее активного сопротивления, равного 135 Ом?

9.7 Методом индуктотермии сначала прогревают мышцы при частоте переменного тока 10 МГц, а затем прогревают печень при частоте 13,5 МГц. Во сколько раз интенсивность нагрева печени больше, чем интенсивность нагрева мышцы? Удельные сопротивления мышцы и печени соответственно равны 2,4 Ом·м и 3,2 Ом·м.

9.8 При лечении ревматизма сустава лошади ее ногу охватывают тремя витками изолированного провода, подсоединенными к генератору высокочастотных колебаний (метод, индуктотермии). Индуктивность витков провода составляет 0,8 мкГн, часто-

та генератора 11 МГц. Вычислить электротемкость контура. (Указание: воспользоваться формулой Томсона)

9.9 В нашей стране для микроволновой терапии выделены следующие длины волн: для дециметровой (ДМВ) терапии – 6,5 дм и для сантиметровой (СМВ) – 12,6 см. Вычислить частоты электромагнитных колебаний, соответствующие этим длинам волн. Вычислить емкостные сопротивления ткани при этих частотах, если электротемкость ткани 0,015 мкФ.

## X. ФОТОМЕТРИЯ. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

### Основные законы и формулы

Наименование величины или физический закон	Формула
1	2
Закон преломления света $\alpha$ – угол падения, $\gamma$ – угол преломления, $n_1$ и $n_2$ – показатели преломления соответственно среды падения и среды преломления	$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{n_2}{n_1}$
Формула линзы $R_1$ и $R_2$ – радиусы кривизны линзы, $F$ – фокусное расстояние линзы, $n_2$ – показатель преломления вещества линзы, $n_1$ – показатель преломления окружающей среды	$\frac{1}{F} = \left( \frac{n_2 - 1}{n_1} \right) \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$
Световые фотометрические величины Полный световой поток от точечного источника света в люменах. $J$ – сила света в канделях Сила света $J$ . $\Phi$ – световой поток, $\omega$ – телесный угол в стерадианах	$\Phi = 4\pi J$ $J = \frac{\Phi}{\omega}$
Освещенность в люксах. $S_{обл}$ – площадь облучаемой поверхности	$E = \frac{\Phi}{S_{обл}}$
Освещенность, создаваемая точечным источником света на расстоянии $R$ от него. $i$ – угол падения световых лучей	$E = \frac{J}{R^2} \cos i$
Светимость $M$ . $S_{изл}$ – излучающая поверхность	$M = \frac{\Phi}{S_{изл}}$

1	2
Соотношение между светимостью $M$ и яркостью $L$ для источников, удовлетворяющих закону Ламберта	$M = \pi L$
Эффективные фотометрические величины для ультрафиолетовой части спектра	
Поток излучения $\Phi$ (эр или бакт)	$\Phi = 4\pi J$
Сила излучения ( $\text{эр}/\text{ср}$ или $\text{бакт}/\text{ср}$ )	$J = \frac{\Phi}{\omega}$
Облученность ( $\text{эр}/\text{м}^2$ или $\text{бакт}/\text{м}^2$ )	$E = \frac{\Phi}{S_{\text{обл}}}$
Облученность от точечного источника	$E = \frac{J}{R^2} \cos i$

#### Вопросы для самоконтроля

- Сформулируйте законы отражения и преломления света. Дайте определение показателя преломления
- Покажите, как связаны между собой абсолютный и относительный показатели преломления на границе раздела двух сред.
- В чем заключается явление полного внутреннего отражения? Как применяется это явление в оптических приборах (например, в рефрактометре)?
- Каков принцип действия световодов? Расскажите об их применении в ветеринарной практике.
- Выведите формулу линзы. Какие типы линз вам известны? Что называют оптической силой линзы и в каких единицах она измеряется?
- Нарисуйте оптическую схему микроскопа. Чему равно увеличение микроскопа?
- Что называют апертурным углом? Что называют числовой апертурой?
- Дайте определение энергетических фотометрических величин и единиц их измерения.
- Получите выражение для освещенности, создаваемой точечным источником света.
- Дайте определение эффективных фотометрических величин в эритемной и бактерицидной областях ультрафиолетовой части спектра.

11. Дайте определение фотометрических величин в видимой части спектра. Каковы единицы их измерения?

12. Каково значение фотометрических измерений в ветеринарии и зоотехнии? Какое влияние оказывает видимый свет на сельскохозяйственных животных и птицу?

13. С какой целью применяют ультрафиолетовое излучение в ветеринарии и зоотехнии?

#### Примеры решения задач

##### ЗАДАЧА 23.

Ультрафиолетовая лампа ЛЭ-30, применяемая в животноводстве и ветеринарии, создает световой поток 110 лм, эритемный поток 750 эр и бактерицидный поток 125 бакт. Определить световую, эритемную и бактерицидную отдачу лампы, если ее мощность 30 Вт. Вычислить силу света и силу эритемного и бактерицидного излучений лампы. Какие облученности и освещенность создает эта лампа на расстоянии 3 м от нее при нормальном падении света? Считать лампу точечным источником.

##### Решение.

$$\Phi = 110 \text{ лм}$$

$$\Phi_e = 0,75 \text{ эр}$$

$$\Phi_b = 0,125 \text{ бакт}$$

$$N = 30 \text{ Вт}$$

$$R = 3 \text{ м}$$

$$K = ?; J = ?; E = ?$$

Светоотдача определяется как отношение светового потока к мощности источника света. Аналогично определяются и остальные отдачи.

$$K_e = \frac{\Phi}{N} = \frac{110 \text{ лм}}{30 \text{ Вт}}$$

$$= 3,67 \text{ лм/Вт}$$

$$K_e = \frac{0,75 \text{ эр}}{30 \text{ Вт}} = 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ эр/Вт}$$

$$K_b = \frac{0,125 \text{ бакт}}{30 \text{ Вт}} = 4,17 \cdot 10^{-3} \text{ бакт/Вт}$$

Световой поток и сила точечного источника связаны соотношением:

$$\Phi = 4\pi J.$$

Отсюда

$$J = \frac{\Phi}{4\pi} = \frac{110}{4\pi} = 8,76 \text{ (кл)}.$$

Аналогично

$$J_0 = \frac{0.75}{4\pi} = 5.97 \cdot 10^{-2} \text{ (эр/ср).}$$

$$J_0 = \frac{0.125}{4\pi} = 9.95 \cdot 10^{-3} \text{ (бакт/ср).}$$

Освещенность, создаваемая точечным источником света:

$$E = \frac{J}{R^2} = \frac{8.76}{9} = 0.973 \text{ (лк).}$$

Аналогично

$$E_1 = \frac{5.97 \cdot 10^{-2}}{9} = 6.63 \cdot 10^{-3} \text{ (эр/м}^2\text{)} = 6.63 \text{ (мэр/м}^2\text{)}$$

$$E_0 = \frac{9.95 \cdot 10^{-3}}{9} = 1.10 \cdot 10^{-3} \text{ (бакт/м}^2\text{)} = 110 \text{ (мбакт/м}^2\text{).}$$

#### Задача 24.

Окно в виварии имеет размеры  $2.5 \times 3.5 \text{ м}$ , и на него в полдень падает световой поток  $0.11 \text{ Млм}$ . Считая коэффициент отражения света от каждой поверхности оконного стекла по  $4\%$ , определить освещенность окна с наружной его стороны, а также яркость и светимость окна внутри вивария. Поглощением света внутри стекла пренебречь.

Решение.

$$S = 2.5 \times 3.5 = 8.75 \text{ м}^2$$

$$\Phi = 0.11 \text{ Млм} = 0.11 \cdot 10^6 \text{ лм}$$

$$\rho = 4\% = 0.04$$

$$E = ? \text{ М} = ? \text{ Л} = ?$$

Вычислим освещенность окна:

$$E = \frac{\Phi}{S} = \frac{0.11 \cdot 10^6}{8.75} = 1.26 \cdot 10^4 \text{ лк.}$$

Часть светового потока, отраженная от внешней поверхности стекла, равна  $\rho\Phi$ .

Поэтому световой поток, прошедший в стекло, равен  $\Phi_1 = \Phi - \rho\Phi = (1 - \rho)\Phi$ . Точно так же можно написать, что световой поток, вышедший из стекла после отражения на внутренней поверхности, равен  $\Phi_2 = (1 - \rho)\Phi_1$ .  $\Phi_1 = (1 - \rho)^2\Phi$ .

Таким образом, светимость стекла внутри вивария создается тем световым потоком, который прошел через стекло, т.е.

$$M = \pi L \quad M = \frac{\Phi_2}{S} = \frac{(1 - \rho)^2 \Phi}{S} = (1 - \rho)^2 E.$$

Поскольку яркость и светимость связаны между собой соотношением:

$$M = \pi L, \text{ то } L = M/\pi.$$

Проведем вычисления:

$$M = (1 - 0.04)^2 \cdot 1.26 \cdot 10^4 = 1.16 \cdot (лк).$$

$$L = 1.16 \cdot 10^4 / 3.14 = 3.68 \cdot 10^3 \text{ (кд/м}^2\text{).}$$

#### Контрольные задачи

10.0. Оптическая сила хрусталика для человека с нормальным зрением равна  $25 \text{ дп}$ . Показатель преломления  $1.4$ . Вычислить радиусы кривизны хрусталика, если известно, что один радиус кривизны в  $2$  раза больше другого.

10.1. Передняя часть глаза состоит из роговицы и хрусталика. Считая их поверхности взаимно параллельными, вычислить угол преломления света в хрусталике, если луч света падает на роговицу под углом  $40^\circ$ . Показатели преломления роговицы и хрусталика соответственно равны  $1.38$  и  $1.44$ .

10.2) Оптическая сила нормального глаза равна примерно  $60 \text{ дп}$ . Какова будет оптическая сила глаза, если человек ныряет в воду? Показатели преломления роговицы глаза и воды соответственно равны  $1.38$  и  $1.33$ .

10.3. Минимальный угол зрения, при котором человек различает две светящиеся точки раздельно, равен одной угловой минуте ( $1'$ ). Расстояние наилучшего зрения для нормального глаза равно  $25 \text{ см}$ . Вычислить предел разрешения глаза.

10.4. Человек рассматривает мелкий предмет размером  $0.1 \text{ мм}$ , держа его на расстоянии наилучшего зрения, т.е. на расстоянии  $25 \text{ см}$  от глаза. Сможет ли человек различить контуры этого предмета, если диаметр светочувствительного элемента (папочки в сетчатке) равен  $2 \text{ мкм}$ ? Оптическую силу глаза принять равной  $60 \text{ дп}$ .

10.5. С какого наибольшего расстояния можно заметить ночью огонек сигареты, сила света которой  $2 \text{ мкд}$ , если минимальный световой поток, воспринимаемый глазом, равен  $0.08 \text{ плм}$ ? Диаметр зрачка в темноте  $0.75 \text{ см}$ .

10.6. Ультрафиолетовая лампа ПРК-2 создает световой поток  $8 \text{ клм}$ , эритемный поток  $4.75 \text{ эр}$  и бактерицидный поток  $10.5 \text{ бакт}$ . Определить освещенность, а также эритемную и бактерицидную облученности поверхности тела животного на расстоянии  $2.5 \text{ м}$

от лампы при нормальном падении света. Определить светоотдачу лампы, если ее мощность 375 Вт.

10.7. Рекомендованная Академией с.-х. наук профилактическая ежедневная доза ультрафиолетового облучения свиней должна составлять 180 мэр·ч/м<sup>2</sup>. Облучатель ПРК-2 подвешен на высоте 1,5 м над животным. Эритемный поток от лампы равен 4,75 эр. Определить длительность ежесуточного облучения.

10.8. Ультрафиолетовый облучатель, состоящий из 5 ламп ДУВ-15, подвешен на высоте 6 м над клетками с цыплятами. Одна из ламп вышла из строя. На сколько надо опустить облучатель, чтобы облученность клеток не изменилась?

10.9. Обеззараживание хирургического инструмента от стрептококков проводят путем облучения его бактерицидным ультрафиолетовым облучателем. На поверхности инструмента необходимо создать облученность 500 мбакт/м<sup>2</sup>. Инструмент находится на краю круглого стола диаметром 2 м, а источник подведен над центром стола на высоте 1,5 м. Какой бактерицидный поток должен создавать источник?

## XI. ВОЛНОВАЯ ОПТИКА. ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

### Основные законы и формулы

Наименование величины или физический закон	Формула
Средел разрешения микроскопа $z$ . $\lambda$ – длина волны света. $\theta$ – азимутальный угол, $n$ – показатель преломления среды между предметным стеклом и объектом	$z = \frac{0,61\lambda}{n \sin \theta}$
Угол максимальной поляризации света при отражении $\varphi_B$ (закон Брюстера)	$\operatorname{tg} \varphi_B = n$
Угол поворота плоскости поляризации света $C$ – концентрация раствора, $L$ – длина пути света в растворе (закон Био) $[\alpha]$ – удельное вращение	$\psi = [\alpha] CL$
Энергетическая светимость тела (закон Стефана-Больцмана)	$M = \sigma T^4$
Длина волны $\lambda_m$ , на которую приходится максимум теплового излучения (закон Вина)	$\lambda_m = \frac{b}{T}$

### Вопросы для самоконтроля

- Что представляет собой явление интерференции волн? Каковы условия, при которых возникает явление интерференции?
- Каковы методы наблюдения интерференции света? Почему не наблюдается интерференция при одновременном включении двух лампочек?
- Что представляет собой явление дифракции? При каких условиях наблюдается дифракция?
- Что называют разрешающей способностью оптического прибора? Какими причинами она вызывается? Дайте определение предела разрешения.
- Каковы свойства ультрафиолетового и инфракрасного излучений? Каковы методы наблюдения этих излучений?
- Как применяют ультрафиолетовое излучение в ветеринарии и зоотехнии? Расскажите о бактерицидном и эритемном действии ультрафиолетового излучения.
- Расскажите о явлении поляризации света. Каковы методы наблюдения поляризации света?
- Сформулируйте законы Малюса и Брюстера
- Расскажите о явлении двойного лучепреломления и о применении этого явления при исследовании микроструктур в поляризованном свете.
- Расскажите о явлении вращения плоскости поляризации оптически активными веществами.
- Расскажите об устройстве поляриметров и сахариметров. Каково их применение в ветеринарии?
- Что называют лучеиспускательной и лучепоглощающей способностью тела?
- Что называют абсолютно черным телом? Каковы модели абсолютно черного тела?
- Сформулируйте законы Стефана-Больцмана, Кирхгофа и Вина

### Примеры решения задач

#### ЗАДАЧА 25.

Раствор глюкозы с концентрацией 0,28 г/см<sup>3</sup>, налитый в стеклянную трубку длиной 15 см, поворачивает плоскость поляризации света на 32°. Определить удельное вращение глюкозы.

**Решение.**

$$\rho = 0.28 \text{ г}/\text{см}^3$$

$$L = 15 \text{ см} = 1.5 \text{ дм}$$

$$\psi = 32^\circ$$

$$[\alpha] = ?$$

Согласно закону Био угол поворота плоскости поляризации в оптически активных веществах  $\psi = [\alpha]CL$ .  
Отсюда

$$[\alpha] = \frac{\psi}{CL} = \frac{32 \text{ град}}{0.28 \text{ г}/\text{см}^3 \cdot 1.5 \text{ дм}} = 76.2 \text{ град} \cdot \text{см}^3 / (\text{г} \cdot \text{дм}).$$

**Задача 26**

Какое количество теплоты излучает  $1 \text{ м}^2$  поверхности тела лошади за час, если температура воздуха в конюшне  $15^\circ\text{C}$ , а температуру кожи лошади принять в среднем  $37^\circ\text{C}$ . Приведенный коэффициент излучения кожи равен  $4.9 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ .

$$\sigma = 4.9 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$$

$$S = 1 \text{ м}^2$$

$$t = 3600 \text{ с}$$

$$T_1 = 273 + 37 = 310 \text{ К}$$

$$T_2 = 273 + 15 = 288 \text{ К}$$

$$\Phi_p = ?$$

Согласно закону Стефана-Больцмана тепловой поток, излучаемый нагретым телом, пропорционален четвертой степени абсолютной температуры этого тела, а также площади поверхности и времени излучения. Теплообмен между двумя телами с

разными температурами (например, между телом животного и окружающим воздухом) заключается в том, что тело с более высокой температурой (тело 1) излучает сильнее и передает телу с более низкой температурой (телу 2) больше энергии в единицу времени, чем само оно получает от тела 2. Таким образом, от тела 1 к телу 2 передается тепловой поток:

$$\Phi_p = \Phi_1 - \Phi_2 = \sigma S (T_1^4 - T_2^4),$$

где  $\sigma$  – приведенный коэффициент излучения, зависящий от природы тела, от его температуры и в значительной степени от состояния его поверхности.

Проверим размерность.

$$[\Phi_p] = \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{К}^4 = \text{Вт} \cdot \text{с} = \text{Дж}.$$

Подставим в это выражение числовые значения заданных величин:

$$\Phi_p = 4.9 \cdot 10^{-8} \cdot 1 \cdot 3.6 \cdot 10^3 (310^4 - 288^4) = 4.15 \cdot 10^5 \text{ (Дж)}.$$

**Контрольные задачи**

11.0. Вычислить предел разрешения микроскопа при наблюдении объекта через зеленый светофильтр (длина волны 555 нм) если апертурный угол микроскопа  $75^\circ$ . Каков будет предел разрешения, если наблюдать этот же объект с иммерсионным объективом? Показатель преломления иммерсионной жидкости 1.65.

11.1. С каким показателем преломления следует взять иммерсионную жидкость, чтобы рассмотреть в микроскопе субклеточный элемент диаметром 0,25 мкм при наблюдении через оранжевый светофильтр (длина волны 600 нм)? Апертурный угол микроскопа  $70^\circ$ .

11.2. Предельный угол полного внутреннего отражения луча света на границе между воздухом и сывороткой крови равен  $48.2^\circ$ . Каков должен быть угол падения луча света из воздуха на поверхность жидкости, чтобы отраженный луч был максимально поляризован?

11.3. Угол поворота плоскости поляризации желтого света при прохождении через цилиндрическую кювету с раствором сахара равен  $28^\circ$ . Длина кюветы 15 см. Удельное вращение сахара  $66.5 \text{ град}/(\text{дм} \cdot \text{г}/\text{см}^3)$ . Определить концентрацию сахара в растворе

11.4. Раствор глюкозы с концентрацией  $2.28 \text{ г}/\text{см}^3$ , налитый в кювету сахариметра, поворачивает плоскость поляризации света на  $32^\circ$ . Определить концентрацию глюкозы в кювете той же длины, если раствор вращает плоскость поляризации на угол  $24^\circ$ .

11.5. На какую длину волны приходится максимум излучения человеческого тела, если средняя температура его поверхности равна  $36.5^\circ\text{C}$ ?

11.6. Определить температуру вольфрамовой нити накала лампы «солярикс», применяемой для обогрева помещений для молодняка КРС, если максимум ее излучения приходится на инфракрасную область спектра с длиной волны 1.5 мкм.

11.7. Во сколько раз повысится теплоотдача с поверхности тела человека, если при заболевании его температура повысилась от  $36^\circ$  до  $41^\circ\text{C}$ , а температура окружающего воздуха  $20^\circ\text{C}$ ?

11.8. На какую длину волны приходится максимум излучения почвы в парнике, если температура почвы  $15^\circ\text{C}$ ? Какова энергетическая светимость почвы?

\* При решении задач 11.8–11.9 пользоваться законами излучения АЧТ

11.9. Применяющиеся для термотерапии тепловыделяющие элементы (ТВЭЛ) создают энергетическую светимость  $6,25 \text{ кВт}/\text{м}^2$ . Определить температуру ТВЭЛ.

## XII. КВАНТОВАЯ ОПТИКА. ФОТОБИОЛОГИЯ

### Основные законы и формулы

Наименование величины или физический закон	Формула
Энергия кванта (фотона). $c$ – скорость света	$W = hv = \frac{hc}{\lambda}$
Соотношение между массой и энергией (формула Эйнштейна)	$W = mc^2$
Закон поглощения света. $J_0$ и $J$ – интенсивности света до и после поглощения слоем вещества толщиной $d$ . ( $k$ – показатель поглощения)	$J = J_0 e^{-kd}$

### Вопросы для самоконтроля

- 1 В чем сущность квантовой теории излучения? Напишите формулу Планка.
- 2 Сформулируйте законы фотоэффекта. Почему эти законы нельзя объяснить на основе классической волновой теории света?
- 3 Напишите уравнение Эйнштейна для фотоэффекта.
- 4 Какие физические явления определяют взаимодействие света с веществом?
- 5 Выведите закон поглощения света (закон Бугера). Объясните физический смысл показателя поглощения. Напишите закон Бера.
- 6 Перечислите типы фотохимических реакций, протекающих в биологических системах.
- 7 Дайте определение люминесценции. Сформулируйте правило Стокса и дайте его объяснение.
- 8 Расскажите о применении люминесцентного анализа в ветеринарии и ветеринарно-санитарной экспертизе.
- 9 Каковы источники и свойства ультрафиолетового излучения?
- 10 Расскажите о биологическом действии ультрафиолетового излучения.

11.Каковы источники и свойства инфракрасного излучения?

12.Опишите свойства лазерного излучения. Расскажите о применении лазеров в медицине и биологии.

13.Каковы методы получения и наблюдения рентгеновского излучения?

14.Каковы свойства тормозного и характеристического рентгеновского излучений? Нарисуйте соответствующие им спектральные кривые.

15.Расскажите о взаимодействии рентгеновских лучей с веществом и о применении их в ветеринарии.

### Примеры решения задач

#### ЗАДАЧА 27.

Коротковолновое УФ-излучение с длиной волны 200 нм оказывает наиболее выраженное бактерицидное действие, обусловленное изменением структуры белков, входящих в состав бактерий. Вычислить энергию, необходимую для изменения структуры этих белков. Ответ выразить в электронвольтах. Культура бактерий находится в чашке Петри диаметром 100 мм. Какое количество фотонов УФ-излучения попадает на поверхность культуры бактерий за 10 мин, если интенсивность облучения  $0,3 \text{ мВт}/\text{см}^2$ ?

#### Решение.

$$\begin{aligned} t &= 10 \text{ мин} = 600 \text{ с} & \text{Энергия кванта равна} \\ \lambda &= 200 \text{ нм} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ м} & W = \frac{hc}{\lambda} \\ J &= 0,3 \text{ мВт}/\text{см}^2 = 3 \text{ Вт}/\text{м}^2 \\ d &= 100 \text{ мм} = 0,1 \text{ м} \\ W &= ? \text{ н.э.} = ? \end{aligned}$$

Отсюда

$$W = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{2 \cdot 10^{-7} \text{ м}} = 9,95 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$

Поэтому

$$W = \frac{9,95 \cdot 10^{-19}}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 6,22 \text{ эВ.}$$

Интенсивность потока излучения равна энергии, падающей на единицу площади поверхности за единицу времени. Энергия потока равна произведению энергии одного фотона на число фотонов, т.е.  $nW$ .

Таким образом,  $J = \frac{nW}{St}$ . Отсюда  $n = \frac{JS \cdot t}{W}$ .

Площадь круглой чашки Петри  $S = \frac{\pi d^2}{2}$ . Следовательно,  $n = \frac{J\pi d^2 \cdot t}{4W}$ . Подставим числовые значения:

$$n = \frac{3 \text{ Вт} \cdot \text{м}^2 \cdot 3,14 \cdot 0,01 \text{ м}^2 \cdot 600 \text{ с}}{4 \cdot 9,95 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}} = 1,42 \cdot 10^{19}.$$

Ответ: энергия одного фотона 6,22 эВ, на поверхность чашки Петри за 10 мин попадает  $1,42 \cdot 10^{19}$  фотонов

### Задача 28.

При прохождении через кювету с окрашенным раствором лекарственного вещества интенсивность света уменьшилась на 18%. Определить показатель поглощения раствора. Во сколько раз уменьшится интенсивность света по сравнению с первым раствором, если концентрацию раствора увеличить в 5 раз? Толщина слоя раствора в кювете 8 см.

#### Решение.

$$L = 8 \text{ см} = 0,08 \text{ м}$$

$$\frac{J_0 - J_1}{J_0} = 0,18$$

$$\frac{C_2}{C_1} = 5$$

$$\kappa = ? \quad \frac{J_2}{J_1} = ?$$

В соответствии с законом Бугера интенсивность света, прошедшего через слой вещества толщиной  $L$ , уменьшается по экспоненциальному закону:

$$J_1 = J_0 e^{-\kappa L},$$

где  $\kappa$  – показатель поглощения вещества.

Отсюда  $\frac{J_2}{J_1} = e^{\kappa L}$ . Логарифмируя, получим:

$$\ln \frac{J_0}{J} = \kappa L. \quad \text{Отсюда } \kappa = \frac{\ln \frac{J_0}{J}}{L}.$$

По условиям задачи  $\frac{J_0 - J_1}{J_0} = 0,18$ . Преобразуя, получим:

$$1 - \frac{J_1}{J_0} = 0,18; \quad \frac{J_1}{J_0} = 1 - 0,18 = 0,82; \quad \frac{J_0}{J_1} = \frac{1}{0,82} = 1,22.$$

$$\kappa = \frac{\ln 1,22}{0,08} = 2,51 \text{ (м}^{-1}\text{)}.$$

Поглощение монохроматического света окрашенными растворами подчиняется закону Бера, согласно которому показатель поглощения пропорционален концентрации вещества в растворе, т.е.  $\kappa = \alpha C$ , где  $\alpha$  – показатель поглощения для раствора единичной концентрации. Поэтому для растворов двух концентраций можно написать закон Бугера-Бера.

$$J_1 = J_0 e^{-\alpha C_1 L}; \quad J_2 = J_0 e^{-\alpha C_2 L}.$$

Логарифмируя, получим:

$$\ln \frac{J_0}{J_1} = \alpha C_1 L; \quad \ln \frac{J_0}{J_2} = \alpha C_2 L.$$

Отсюда

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{\ln \frac{J_0}{J_1}}{\ln \frac{J_0}{J_2}}; \quad \ln \frac{J_0}{J_2} = \frac{C_2}{C_1} \ln \frac{J_0}{J_1} = \\ = 5 \ln \frac{1}{0,82} = 5 \ln 1,22 = 0,993.$$

С помощью микрокалькулятора находим, что  $\frac{J_0}{J_2} = 2,698$ .

Таким образом,  $J_2 = \frac{J_0}{2,698}$ , а по условиям задачи  $J_2 = 0,82 J_0$ .

$$\text{Поэтому } \frac{J_2}{J_1} = \frac{1}{2,698 \cdot 0,82} = 0,452.$$

Ответ: интенсивность света во втором растворе уменьшится и будет равна  $J_2 = 0,452 J_1$ .

### Задача 29.

Определить наименьшую длину волны рентгеновского излучения, создаваемого трубкой, работающей под напряжением

500 кВ. Какой минимальной скоростью должны обладать электроны в этой трубке?

*Решение.*

$$U = 500 \text{ кВ} = 5 \cdot 10^5 \text{ В}$$
$$\lambda = ? \quad v = ?$$

Квант рентгеновского излучения возникает при бомбардировке анодката трубы электронами, разогнанными в электрическом поле. Считая, что энергия кванта должна равняться энергии электрона, получаемой им в электрическом поле, можно написать:

$$hv = eU, \text{ но } v = \frac{c}{\lambda}. \text{ Поэтому } h \frac{c}{\lambda} = eU$$
$$\text{Отсюда } \lambda = \frac{hc}{eU}$$

Проверим размерность полученного выражения:

$$[\lambda] = \frac{\text{Дж} \cdot \text{с}}{\text{Кл} \cdot \text{В}} = \frac{\text{Дж} \cdot \text{с}}{\text{Кл} \cdot \text{Дж} / \text{Кл}} = \text{м.}$$

Скорость электрона можно определить из условия равенства его кинетической энергии и энергии, приобретенной им в электрическом поле:

$$\frac{mv^2}{2} = eU; v = \sqrt{\frac{2eU}{m}}$$

Подставляем в полученные формулы числовые значения заданных величин (заряд и массу электрона находим в таблицах):

$$\lambda = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{1,6 \cdot 10^{19} \cdot 5 \cdot 10^6} = 2,48 \cdot 10^{-12} (\text{м}).$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 5 \cdot 10^6}{9,1 \cdot 10^{-31}}} = 4,18 \cdot 10^8 (\text{м/с}).$$

Ответ: длина волны  $\lambda = 2,48 \cdot 10^{-12} \text{ м} = 2,48 \text{ пм.}$

Скорость электронов:  $v = 4,18 \cdot 10^8 \text{ м/с.}$

### Контрольные задачи

12.0. Для фотоактивирования зерен кукурузы излучением гелий-неонового лазера необходимо, чтобы на поверхность зерна в секунду падало  $8 \cdot 10^{19}$  фотонов. Определить мощность лазера, если длина волны излучаемого им света равна 615 нм.

12.1. Человеческий глаз наиболее чувствителен к зеленому свету с длиной волны 555 нм. Порог чувствительности глаза при этом равен  $2,9 \cdot 10^{-17}$  Вт. Какое количество фотонов падает на сетчатку в секунду?

12.2. Максимальная эритемная чувствительность кожи человека к ультрафиолетовому облучению имеет место при длине волны 296,7 нм. Определить частоту и энергию фотонов этого излучения.

12.3. Определить массу и импульс фотонов, соответствующих максимальному бактерицидному действию ультрафиолетового излучения (длина волны 254 нм). Сравнить массу фотона с массой электрона ( $9,1 \cdot 10^{-31}$  кг).

12.4. Показатель поглощения плазмы крови равен  $0,836 \text{ см}^{-1}$ . Какая толщина слоя плазмы крови уменьшает интенсивность падающего света в 3 раза?

12.5. В кювете находится раствор крови с концентрацией 0,85 моль/л. Удельный показатель поглощения в законе Бера для этого раствора равен  $0,35 \text{ л/(см} \cdot \text{моль)}$ . Определить, во сколько раз уменьшится интенсивность света при прохождении его через кювету высотой 8 см, заполненную этим раствором.

12.6. Линейный показатель поглощения рентгеновского излучения в свинце равен  $52 \text{ см}^{-1}$ . Какова должна быть толщина экранирующего слоя свинца, чтобы он уменьшил интенсивность рентгеновского излучения в 30 раз?

12.7. Квантово-механические расчеты показывают, что атомный показатель поглощения веществом рентгеновского излучения пропорционален кубу порядкового номера атома в таблице Менделеева. Вычислить, во сколько раз молекулярный показатель поглощения кости больше, чем у мягкой ткани. Считать, что мягкая ткань состоит в основном из воды, а кость из  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ . Молекулярный показатель поглощения равен сумме атомных показателей поглощения.

12.8. Определить максимальную длину волны тормозного рентгеновского излучения, если к рентгеновской трубке приложено напряжение 65 кВ. Какова энергия кванта рентгеновского излучения?

12.9. Какое напряжение надо приложить к рентгеновской трубке, чтобы получить излучение с максимальной длиной волны в 7 пм? Какова будет энергия кванта этого излучения?

ТАБЛИЦЫ СПРАВОЧНЫХ ДАННЫХ

Таблица 1  
Основные физические константы в Си

Название	Символ	
Гравитационная постоянная	$\gamma$	$6,670 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$
Скорость света в вакууме	$c$	$2,99793 \cdot 10^8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$
Постоянная Авогадро	$N_A$	$6,02252 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Универсальная газовая постоянная	$R$	$8,31510 \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{моль}^{-1}$
Постоянная Больцмана	$k$	$1,38054 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1}$
Постоянная Фарадея	$F$	$9,6487 \cdot 10^4 \text{ Кл} \cdot \text{моль}^{-1}$
Постоянная Планка	$h$	$6,62491 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Постоянная Стефана-Больцмана	$\sigma$	$5,6697 \cdot 10^{-8} \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{К}^{-4}$
Постоянная Вина	$b$	$2,8979 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$
Заряд электрона	$e$	$1,6021 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Масса покоя электрона	$m_e$	$9,1091 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
Масса покоя протона	$m_p$	$1,67261 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$

Причение. При решении задач числа необходимо округлять до количества знаков, требуемых условиями задачи.

Таблица 1

Таблица 2

Приставки для обозначения десятичных кратных и дольных единиц

Название приставки	Обозначение	Коэф. умножения, соответствующий приставке	Пример
Тера	Т	$10^{12}$	Тераджуль (ТДж)
Гига	Г	$10^9$	Гигаом (ГОм)
Мега	М	$10^6$	Мегаом (МОм)
Кило	к	$10^3$	километр (км)
гекто	г	$10^2$	гектоватт (гВт)
Дека	да	10	декалитр (дал)
Деци	д	$10^{-1}$	декиметр (дм)
Санти	с	$10^{-2}$	сантиметр (см)
Милли	м	$10^{-3}$	миллиампер (мА)
Микро	мк	$10^{-6}$	микровольт (мкВ)
Нано	н	$10^{-9}$	нанометр (нм)
Пико	п	$10^{-12}$	пикофарад (пФ)

Примечание. При произношении ударение не должно приходиться на приставку

Таблица 3

Греческий алфавит

Обозначение букв	Название букв	Обозначение букв	Название букв
Α, α	альфа	Ν, ν	ни
Β, β	бета	Ξ, ξ	кси
Γ, γ	гамма	Ο, ο	омикрон
Δ, δ	дельта	Π, π	пи
Ε, ε	эpsilon	Ρ, ρ	ро
Ζ, ζ	дзета	Σ, σ	сигма
Η, η	эта	Τ, τ	тау
Θ, θ	тэта	Υ, υ	ипсилон
Ι, ι	иота	Φ, φ	фи
Κ, κ	каппа	Χ, χ	хи
Λ, λ	ламбда	Ψ, ψ	пси
Μ, μ	мю	Ω, ω	омега

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белановский, А.С. Основы биофизики в ветеринарии: Учеб. пособие / А.С. Белановский. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Дрофа, 2007, 332 с.
2. Журавлев, А.И. Основы физики и биофизики: Учеб. пособие для вузов / А.И. Журавлев, А.С. Белановский, В.Э. Новиков и др. – 2-е изд., испр. – М.: Бином, 2008, 383 с.
3. Безверниня, Р.Н. Сборник задач по физике: Учеб. пособие для вузов / Р.Н. Безверниня, Н.И. Горюховская, Р.И. Грабовский и др./Под. ред. Р.И. Грабовского. – 3-е изд. – СПб: Плань, 2007, 128 с.
4. Белановский, А.С. Международная система единиц и применение ее в ветеринарии: Учеб. пособие / А.С. Белановский, В.И. Максимов – М.: МГАВМиБ, 2006, 55 с.
5. Белановский, А.С. Физика. Словарь иностранных терминов: Учеб. пособие / А.С. Белановский. – М.: МГАВМиБ, 2007, 108 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие .....	3
Общие методические указания .....	4
Указания к выполнению контрольных работ .....	8
Методические указания к разделам программы и контрольные задания .....	11
Правила приближенных вычислений .....	11
1. Вращательное движение твердого тела .....	13
II. Акустика .....	20
III. Гидродинамика .....	24
IV. Биомеханика .....	30
V. Свойства жидкостей. Явления переноса .....	35
VI. Термодинамика .....	41
VII. Электростатика. Постоянный ток .....	46
VIII. Биоэлектрические явления .....	51
IX. Переменный ток .....	56
X. Фотометрия. Геометрическая оптика .....	61
XI. Волновая оптика. Тепловое излучение .....	66
XII. Квантовая оптика. Фотобиополия .....	70
XIII. Радиактивность. Свойства ионизирующих излучений .....	76
Таблицы справочных данных .....	80
Библиографический список .....	82

<http://kursovик-bezproblem.16mb.com>