

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

МОСКОВСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ)

***В.В.Болятко   А.И.Ксенофонов***

СБОРНИК ЗАДАЧ  
ПО КУРСУ «ОСНОВЫ ЭКОЛОГИИ И ОХРАНЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ  
СРЕДЫ»

Рекомендовано УМО «Ядерные физика и технологии»  
в качестве учебного пособия для студентов вузов

Москва 2007

УДК [574.3+574.4+502:628.3+614.7] (076+072)

ББК 20.1я73+26.23я73+26.22я73

Б 79

Болятко В.В., Ксенофонтов А.И. Сборник задач по курсу «Основы экологии и охраны окружающей среды»: Учебное пособие. М.: МИФИ, 2007/064 с.

Настоящее учебное пособие содержит задачи по восьми основным разделам курса, вопросы по рассматриваемым экологическим проблемам и необходимые методические материалы, позволяющие без привлечения дополнительной литературы решать представленные задачи.

Сборник охватывает задачи по радиоэкологии и проблемам энергетики, охране водной и воздушной среды, ресурсам и различным математическим моделям. Авторы учли замечания и пожелания преподавателей, ведущих семинарские занятия со студентами в рамках учебного плана МИФИ. Всем им авторы приносят свою искреннюю благодарность.

Учебное пособие предназначено для проведения практических занятий по курсу «Основы экологии и охраны окружающей среды».

Подготовлено в рамках Инновационной образовательной программы.

Рецензент канд. физ.-мат. наук, доц. А.Б. Колдобский

ISBN 978-5-7262-0867-1 © Московский инженерно-физический институт (государственный университет), 2007

Редактор Т.В. Волвенкова

Подписано в печать 30.10.2007. Формат 60х84 1/16

Гарнитура Таймс. Печать офсетная.

Печ. л. 4,0. Уч.-изд. л. 4,0. Изд. № 4/33. Тираж 1000 экз.

Московский инженерно-физический институт  
(государственный университет).

115409, Москва, Каширское шоссе, 31

Типография издательства «Тровант»

г. Троицк

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее учебное пособие написано для проведения семинарских занятий со студентами естественнонаучных специальностей и призвано иллюстрировать содержание по курсу «Основы экологии и охраны окружающей среды». На этих занятиях студенты могут применить ранее полученные знания по физике, математике, химии и по другим прикладным наукам.

За последние годы написана масса учебников и пособий по экологии и защите окружающей среды. Много внимания уделяется экологическим проблемам в научных журналах, в популярной литературе и в других изданиях. Много полезной информации можно также найти по интернету.

Между тем задачи по фундаментальной науке – экологии и по общим прикладным вопросам охраны окружающей среды приходится искать по разрозненным литературным источникам, отбирать и видоизменять по задачникам физики, математики, химии и биологии.

Авторы стремились создать цельный задачник, который бы отражал основные современные проблемы экологии и прикладные аспекты охраны окружающей среды, так чтобы в представленных задачах все решения доводились бы до количественных оценок, а постановки самих задач служили бы темами для развития дискуссии.

На протяжении последних нескольких лет учебное пособие переиздавалось, и каждое следующее издание дополняло и расширяло материал предыдущего. Данное издание значительно отличается от предыдущих как по количеству задач, так и по методическому и справочному материалу: включены новые разделы, удалены задачи, не выдержавшие испытание временем, уточнены либо изменены условия других.

Авторы весьма благодарны своим коллегам по кафедре «Биофизика, радиационная физика и экология» Московского инженерно-физического института за полезные замечания и рекомендации, за возможность использовать их опыт, накопленный при проведении практических занятий со студентами.

Авторы далеки от мысли, что написанное учебное пособие полностью лишено каких-либо недостатков, поэтому будут благодарны за все будущие замечания и пожелания.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Баланс веществ.	5
2. Перенос энергии.	11
3. Функции роста. Потребность в ресурсах.	16
4. Рост населения.	22
5. Радиоэкология.	27
6. Проблемы энергетики.	34
7. Загрязнение водной среды.	40
8. Загрязнение атмосферы.	48
9. Справочный материал.	53
10. Ответы к задачам.	58
11. Вопросы по курсу «Основы экологии и охраны окружающей среды».	61
12. Список рекомендуемой литературы.	63

## 1. БАЛАНС ВЕЩЕСТВ

Одной из важнейших расчетных характеристик окружающей среды является концентрация вещества-загрязнителя в воздухе или в воде. Концентрации могут быть заданы в виде весовых или объемных долей, либо их комбинаций. Наиболее часто единицами измерения концентраций в воде являются миллиграммы на литр (мг/л) или микрограммы на литр (мкг/л). При загрязнении воздуха газовые концентрации выражают либо в объемных долях,

$$\left[ \frac{ед}{млн} \right] = \frac{\text{объем загрязнений}}{10^6 \text{ объемов воздуха}} = 10^{-4}\% \quad (\text{при нормальных условиях}), \text{ либо}$$

в смешанных единицах миллиграммы на кубический метр (мг/м<sup>3</sup>) или микрограммы на кубический метр (мкг/м<sup>3</sup>). При решении практических задач часто приходится производить перевод единиц концентраций  $C$  :

$$C \left[ \frac{мг}{м^3} \right] = \frac{C \left[ \frac{ед}{млн} \right] \cdot M}{22,4} \cdot \left( \frac{273}{T [^{\circ}K]} \right) \cdot P [атм], \quad (1.1)$$

где  $M$  - молекулярная масса загрязняющего газа;  $P$  - давление в атмосферах (атм).

Согласно закону сохранения массы при протекании химической реакции в замкнутом пространстве материя не возникает и не исчезает (при ядерной реакции возможно превращение массы в энергию). Эта концепция позволяет отслеживать вещество, в частности, загрязнитель, проникающий в биомассу, в воздушную или водную среды, с помощью баланса масс. Нарисовав воображаемую границу вокруг выделенного объема (области), как это показано на рис.1.1, можно фиксировать поток вещества через границу, а также накопление его внутри области.

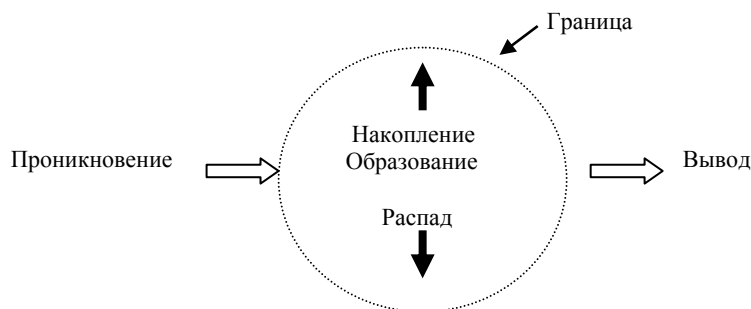


Рис.1.1. Диаграмма баланса вещества

Используя рис.1.1, можно записать следующее уравнение баланса массы для каждого интересующего вещества (загрязнителя):

$$\begin{aligned} \left( \text{скорость} \right. & \left. \text{проникновения} \right) + \left( \text{скорость} \right. & \left. \text{образования} \right) = \\ & = \left( \text{скорость} \right. & \left. \text{вывода} \right) + \left( \text{скорость} \right. & \left. \text{распада} \right) + \left( \text{скорость} \right. & \left. \text{накопления} \right). \end{aligned} \quad (1.2)$$

Если в самом объеме нет источника загрязнения, то в приведенном уравнении слагаемое «скорость образования» исчезает. Часто уравнение (1.2) может быть упрощено, в частности, для стационарного (равновесного) состояния концентрация загрязнителя постоянна и слагаемое «скорость накопления» обращается в нуль. Следующее упрощение имеет место, когда вещество сохраняется внутри интересующей области, что означает отсутствие радиоактивного распада, химических реакций или бактериального разложения. Для такого консервативного случая слагаемое «скорость распада» в (1.2) обращается в нуль. Примером консервативных веществ являются растворенные в воде твердые вещества или углекислый газ в воздухе.

Простейшими для анализа являются системы, находящиеся в стационарном состоянии, а интересующее нас вещество является

консервативным. В таких случаях уравнение (1.2) переходит в следующее:

$$\begin{pmatrix} \text{скорость} \\ \text{проникновения} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{скорость} \\ \text{вывода} \end{pmatrix}. \quad (1.3)$$

Рассмотрим стационарную консервативную систему. Пусть одним из проникающих компонентов будет поток мощностью  $Q_S$  (объем/ед. времени) – расход воды или воздуха с концентрацией загрязнителя  $C_S$  (масса/ед. объема). Другим входящим потоком будет сильнозагрязненный поток мощностью  $Q_W$  и концентрацией  $C_W$ . Тогда на выходе образуется смешанный поток мощностью  $Q_m$  и концентрацией  $C_m$ . На основе уравнения баланса можно записать:

$$C_S \cdot Q_S + C_W \cdot Q_W = C_m \cdot Q_m, \quad (1.4)$$

полагая при этом полное перемешивание загрязнителя в рассматриваемом объеме.

Во многих случаях вещества вступают в химические, ядерные или биологические реакции, т.е. являются неконсервативными веществами. Распад неконсервативных веществ обычно рассматривается как реакция первого порядка, т.е. полагается, что скорость изменения (убывания) концентрации пропорциональна концентрации самого

вещества  $\frac{dC}{dt} = -k \cdot C$ . Решение этого уравнения имеет вид:

$$C = C_0 \cdot e^{-kt}, \quad (1.5)$$

где  $k$  – коэффициент скорости реакции, а  $C_0$  – начальная концентрация. Таким образом, полная скорость распада вещества, равномерно распределенного по объему  $V$ , составит

$d(CV)/dt = V \cdot dC/dt$  и согласно уравнению (1.2):

$$\left( \begin{matrix} \text{скорость} \\ \text{распада} \end{matrix} \right) = kCV. \quad (1.6)$$

В нестационарном случае, когда концентрация загрязнителя меняется во времени, в уравнении (1.2) слагаемое «скорость накопления» записывается в виде  $d(CV)/dt$  для равномерного распределения загрязнителя по объему, внутри которого масса равна  $CV$ , а уравнение примет вид:

$$S = Q \cdot C + kCV + d(CV)/dt, \quad (1.7)$$

где  $S$  – мощность источника загрязнения (скорость образования).

Уравнение (1.7) легко решить с помощью перехода к новой переменной  $C' = (C - \frac{S}{Q + kV})$ , причем  $C_\infty = \frac{S}{Q + kV}$  представляет собой концентрацию загрязнителя для равновесного состояния. Тогда решение уравнения (1.7) будет иметь следующий вид:

$$C(t) = [C_0 - C_\infty] \cdot \exp[-(k + \frac{Q}{V}) \cdot t] + C_\infty. \quad (1.8)$$

**Задача 1.1.** Измеренная экспресс-методом объемная концентрация окиси углерода в выхлопных газах автомобиля составляет 1,2%. Выразить эту концентрацию в г/м<sup>3</sup> при нормальном давлении и температуре 30 °С.

**Задача 1.2.** Измеренная концентрация диоксида серы в атмосферном воздухе составила 330 мкг/м<sup>3</sup> при 1 атм. и температуре 25 °С. Сравнить полученное значение с допустимой объемной концентрацией SO<sub>2</sub> в воздухе, равной 1,4·10<sup>-5</sup>%?

**Задача 1.3.** В текущий поток мощностью  $Q_S = 25$  м<sup>3</sup>/с, вливается загрязненный приток мощностью  $Q_W = 5$  м<sup>3</sup>/с. Концентрация загрязнителя в потоке  $C_S$  достигает 20 мг/л, а в притоке  $C_W = 60$  мг/л.



Предполагая полное перемешивание двух потоков, найти концентрацию загрязнителя в смешанном потоке.

**Задача 1.4.** В реку с содержанием солей 400 мг/л и мощностью потока  $25 \text{ м}^3/\text{с}$  впадают сельскохозяйственные сточные воды с мощностью потока  $5 \text{ м}^3/\text{с}$  и с содержанием солей 2 г/л. Соли быстро становятся равномерно распределенными по реке. Воду на нужды населения берут из реки ниже по течению и смешивают с чистой. При этом концентрация солей в смеси не превышает 500 мг/л. Какое должно быть соотношение чистой и речной воды?

**Задача 1.5.** В водоем объемом  $V = 0,01 \text{ км}^3$  вливается поток мощностью  $5 \text{ м}^3/\text{с}$  и концентрацией загрязнителя 10 мг/л. Имеется также канал сточных вод, который выбрасывает в водоем поток того же загрязнителя, при этом мощность потока составляет  $0,5 \text{ м}^3/\text{с}$ , а концентрация загрязнителя 100 мг/л. Коэффициент скорости реакции  $k$  загрязнителя равен  $0,2 \text{ сут}^{-1}$ . Предполагая отсутствие испарения, найти стационарную концентрацию загрязнителя в водоеме.

**Задача 1.6.** Нужно выкопать искусственный водоем, необходимый для сбора потока воды мощностью  $0,1 \text{ м}^3/\text{с}$  и концентрацией неконсервативного загрязнителя 30 мг/л при коэффициенте скорости реакции  $0,2 \text{ сут}^{-1}$ . Каким должен быть объем водоема, если на выходе из него концентрация загрязнителя равна 10 мг/л?

**Задача 1.7.** Поток воды мощностью 4 млн л воды в сутки, содержащий химический загрязнитель концентрацией 40 мг/л, проходит через систему из двух последовательно расположенных водоемов. Объем первого водоема 10 млн л, второго – 20 млн л. Предполагая полное перемешивание и отсутствие испарения, определить концентрацию загрязнителя на выходе из второго водоема, если коэффициент скорости распада равен  $0,4 \text{ сут}^{-1}$ .

**Задача 1.8.** Внутри бара объемом  $500 \text{ м}^3$  находятся 50 курильщиков, каждый из которых выкуривает две сигареты в час. Одна сигарета, помимо прочего, выпускает 0,7 мг формальдегида ( $\text{CH}_2\text{O}$ ). Формальдегид превращается в двуокись углерода, причем коэффициент скорости реакции  $k = 0,4 \text{ ч}^{-1}$ . Потоки свежего воздуха, поступающего в помещение, и отводимого задымленного воздуха имеют одинаковую мощность  $1000 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Оценить стационарную концентрацию формальдегида в воздухе.

**Задача 1.9.** Потоки свежего воздуха, поступающего в бар из задачи 1.8, и отводимого задымленного воздуха имеют одинаковую мощность  $1000 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Предположим, что в момент открытия в 17 ч воздух

в баре чист. Чему будет равна концентрация формальдегида в воздухе в 18 ч?

**Задача 1.10.** Пороговые параметры формальдегида в воздухе по запаху 0,16 ед/млн и по раздражающему действию на слизистую глаза человека 0,01 ед/млн. Что почувствуют посетители бара из задачи 1.8 при длительном пребывании в прокуренном помещении при температуре 25 °С?

**Задача 1.11.** Рассмотрим водоем объемом  $V = 0,01 \text{ км}^3$  из задачи 1.5. Коэффициент скорости реакции  $k$  загрязнителя равен  $0,2 \text{ сут}^{-1}$ . Предположим, что состояние водоема признано неприемлемым и решено отвести сточный канал от водоема, исключив этот источник загрязнения. Найти величину концентрации загрязнителя в водоеме спустя неделю после отвода сточного канала и новое значение стационарной концентрации.

**Задача 1.12.** Представим воздушное пространство города в виде прямоугольной камеры со сторонами 20 км и высотой 200 м. Чистый воздух приносится в камеру ветром, дующим вдоль одной из сторон, со скоростью 5 м/с. Мощность потока загрязнителя, для которого коэффициент скорости реакции  $k = 0,1 \text{ ч}^{-1}$ , равна 8 кг/с. Найти стационарную концентрацию загрязнителя в воздушном пространстве города.

**Задача 1.13.** На поверхности металлических деталей, обрабатываемых в гальванической ванне, остаются натеки электролита, которые необходимо смывать. Концентрация металла в натеках составляет 10%, а после промывки она должна быть снижена до 10 ед/млн. Объем натеков составляет 1 л/ч. Определить расход воды на промывку деталей для одноступенчатой и трехступенчатой систем с подачей равных объемов воды на каждой ступени промывки.

**Задача 1.14.** Лишенная слуха и зрения летучая мышь мечется в воздухе со скоростью  $v = 1 \text{ м/с}$  с открытым ртом (площадь ротового отверстия  $10 \text{ мм}^2$ ). Плотность комаров в воздухе составляет в среднем  $N = 10 \text{ ед/м}^3$ . Найти время, за которое мышь обязательно поймает хотя бы одного комара?

*Энергетические процессы могут идти  
самопроизвольно только при условии  
перехода энергии из концентрированной  
формы в рассеянную...*  
Второе начало термодинамики

## 2. ПЕРЕНОС ЭНЕРГИИ

Из закона сохранения и превращения энергии следует, что для любой системы, помещенной в заданный объем, справедливо равенство:

$$\left\{ \begin{array}{c} \text{энергия} \\ \text{поступающая} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} \text{энергия} \\ \text{выходящая} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{c} \text{изменение} \\ \text{внутренней энергии} \end{array} \right\}. \quad (2.1)$$

При этом изменение внутренней энергии  $\Delta U$  вещества массой  $m$  с изменением температуры на  $\Delta T$  составляет  $\Delta U = m \cdot c \cdot \Delta T$ , где  $c$  – теплоемкость вещества (для воды она равна 4,18 кДж/(кг·К)).

Когда вещество переходит в другую фазу, происходит изменение внутренней энергии без изменения температуры. Энергия, требуемая для фазового перехода из твердого вещества в жидкое состояние, называется теплотой плавления, а для перевода жидкости в пар – теплотой испарения. При этом изменение внутренней энергии при выпаривании воды равняется  $m \cdot H$ , где  $m$  – масса, а  $H$  – удельная теплота испарения, а при плавлении будет  $m \cdot \Lambda$ , где  $\Lambda$  – удельная теплота плавления.

Во многих задачах, связанных с проблемой охраны окружающей среды, рассматриваются потоки как вещества, так и энергии через границы системы. Примером может служить удаление с помощью теплоносителя (обычно воды) теплоты из зоны протекания процесса. В этом случае скорость изменения внутренней энергии равняется  $\dot{m} \cdot c \cdot \Delta T$ , где  $\dot{m}$  – поток вещества через границы системы, а  $\Delta T$  – перепад температур в потоке, отводящем теплоту от процесса.

Когда два тела имеют разную температуру, теплота переносится от более теплого тела к более холодному. Этот процесс может осуществляться за счет теплопроводности (кондуктивный процесс), когда имеется непосредственный контакт между телами; за счет конвекции, когда между ними имеется газ или жидкость, или за счет излучения.

Процесс переноса тепла через барьер (например, стену здания) можно описать следующим уравнением:

$$q = \frac{S \cdot (T_1 - T_2)}{R}, \quad (2.2)$$

где  $q$  – тепловой поток [Вт] через барьер площадью  $S$  [м<sup>2</sup>], расположенный перпендикулярно вектору теплового потока,  $T_1$  и  $T_2$  – значения температуры [К] внешних поверхностей барьера,  $R$  – термическое сопротивление [м<sup>2</sup>·К/Вт].

При переносе теплоты излучением испускаемую энергию несут электромагнитные волны. Каждый объект излучает тепло. Абсолютно черное тело является совершенным излучателем, оно испускает с единицы поверхности больше энергии, чем любой реальный объект при той же температуре.

Мощность испускаемого излучения  $W$  абсолютно черного тела описывается законом Стефана – Больцмана:

$$W = \sigma \cdot S \cdot T^4, \quad (2.3)$$

где  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) – постоянная Стефана–Больцмана,  $S$  – площадь поверхности излучателя, м<sup>2</sup>;  $T$  – его температура, К. Длина волны, на которой спектр излучения достигает своего максимума, определяется с помощью закона смещения Вина:

$$\lambda_{\max} \cdot T = b, \quad (2.4)$$

где  $\lambda$  – длина волны, м;  $T$  – температура, К;  $b = 2,90 \cdot 10^{-3}$ , – постоянная Вина, м·К.

Величина кванта энергии определяется соотношением Эйнштейна – Планка:

$$E = h \nu, \quad (2.5)$$

где  $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка, а  $\nu$  – частота электромагнитного излучения, с<sup>-1</sup>.

Энергия и масса связаны следующим соотношением эквивалентности Эйнштейна:

$$E_0 = mc^2, \quad (2.6)$$

где  $c$  – скорость света в вакууме.

**Задача 2.1.** Определить увеличение массы всей воды Мирового океана ( $1,38 \cdot 10^{21}$  кг) при нагревании ее на  $10^\circ\text{C}$ .

**Задача 2.2.** Сколько времени потребуется, чтобы растопить слой льда (плотность  $\rho = 0,91 \text{ г/см}^3$ ) толщиной 1 см и температурой минус  $10^\circ\text{C}$  на площади  $1 \text{ м}^2$ , а образовавшуюся воду испарить за счет энергии Солнца, если интенсивность на поверхности Земли составляет  $167 \text{ Вт/м}^2$ ? Альбедо поверхности льда принять равным 0,81, а потерями теплоты пренебречь. Для льда удельную теплоемкость принять равной  $2,1 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$ , а удельную теплоту плавления –  $333 \text{ кДж/кг}$ . Для воды удельную теплоту испарения принять равной  $2,26 \cdot 10^3 \text{ кДж/кг}$ .

**Задача 2.3.** Оцените, сколько энергии содержится в шаровой молнии, если, как утверждают очевидцы, при соприкосновении с батареей она оплавил участок трубы длиной 5 см. Принять, что при этом произошел разогрев трубы на  $\Delta T = 600^\circ\text{C}$ , удельная теплоемкость  $c = 0,71 \text{ Дж/(г}\cdot\text{K)}$ , а плотность  $\rho = 7,8 \text{ г/см}^3$ . Внешний и внутренний диаметры трубы равны 3,0 и 2,4 см соответственно.

**Задача 2.4.** Получить выражение для определения количества теплоты  $Q$ , выделяемой при замерзании воды с образованием арктического льда ( $B$  – удельная теплота кристаллизации) на участке площадью  $S$  за промежуток времени  $\Delta t$ , если допустить, что зависимость толщины льда от времени имеет вид  $h = \alpha \cdot \sqrt{t}$ , где  $\alpha$  – параметр, зависящий только от температуры воздуха на поверхности льда.

**Задача 2.5.** По прогнозам, в XXI веке средняя температура Земли повысится на  $1,5^\circ\text{C}$ . Определить, на сколько повысится уровень Мирового океана, занимающего  $2/3$  площади Земли ( $510 \text{ млн км}^2$ ), массой  $1,38 \cdot 10^{21}$  кг за счет теплового расширения воды? Коэффициент объемного расширения воды равен  $1,5 \cdot 10^{-4} \text{ град}^{-1}$ . Сравните результат с повышением уровня за счет таяния льда Антарктиды, занимающей всего 2,74% площади Земли, при средней толщине льда 1720 м.

**Задача 2.6.** Открытый плавательный бассейн, температура воды в котором равна  $17^\circ\text{C}$ , а площадь поверхности  $100 \text{ м}^2$ , за счет испарения теряет каждую неделю 2 см от уровня воды. Цена электроэнергии, требуемой для нагрева доливаемой воды, составляет  $1,89 \text{ руб/(кВт}\cdot\text{ч)}$ .

Владелец бассейна купил покрытие стоимостью 3000 руб., уменьшающее испарение вдвое. Определить срок окупаемости приобретения, если принять, что энергия, расходуемая на испарение воды, равна энергии, требуемой для нагрева доливаемой воды?

**Задача 2.7.** Москвич собирается произвести расходы на утепление лоджии площадью боковой поверхности  $50 \text{ м}^2$ . Ему предложено заплатить за работу и материалы 3000 руб, что гарантирует повышение термического сопротивления с 3 до  $50 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$  при температуре в квартире  $22^\circ\text{C}$ . Принимая во внимание, что отопительный сезон в Москве длится 7 мес. при средней температуре на улице минус  $5^\circ\text{C}$ , а москвич решил обогреваться электричеством, которое стоит  $2,08 \text{ руб}/\text{кВт}\cdot\text{ч}$ , подсчитать экономию электроэнергии и денег в год за счет дополнительной теплоизоляции.

**Задача 2.8.** Рассмотрим Землю как черное тело со средней температурой  $15^\circ\text{C}$  и площадью поверхности  $510 \text{ млн км}^2$ . Найти мощность излучения Земли и длину волны, на которую приходится максимум излучаемой мощности.

**Задача 2.9.** Солнечный спектр имеет максимум при длине волны порядка  $0,48 \text{ мкм}$ . Если рассматривать Солнце как абсолютно черное тело, какова будет его эквивалентная температура? Оценить время, за которое его масса уменьшится на 1%. Масса Солнца  $2 \cdot 10^{30} \text{ кг}$ , его радиус  $7 \cdot 10^8 \text{ м}$ .

**Задача 2.10.** Угольная ТЭС превращает энергию топлива в электрическую с эффективностью 33,3%. Электрическая мощность ТЭС составляет 1000 МВт. Оставшиеся две трети энергетического содержания топлива выбрасываются в окружающую среду в виде теплоты: 15% теплового выброса идет в дымовую трубу, остальные 85% забирает охлаждающая вода из близлежащей реки. Мощность потока воды в реке равна  $100 \text{ м}^3/\text{с}$ , с температурой  $20^\circ\text{C}$ . Какой расход охлаждающей воды потребуется, если воду нельзя нагревать более чем на  $10^\circ\text{C}$ ? Какова будет температура воды в реке после того, как в нее вольется нагретая вода из охлаждающего контура?

**Задача 2.11.** Через освещенный солнечным светом интенсивностью  $600 \text{ Вт}/\text{м}^2$  солнечный коллектор с площадью поверхности  $6 \text{ м}^2$  пропускается холодная вода с расходом 2 л/мин. Каково будет увеличение температуры воды на выходе из коллектора, если его эффективность составляет 50%?

**Задача 2.12.** Сравнить энергию, требуемую для испарения 1 л воды температурой 17 °С, с энергией, требуемой для поднятия этого же литра воды в воздух на высоту 3 км.

**Задача 2.13.** Принимая теплоту сгорания чистого углерода равной 94,4 ккал/моль, определите потерю в весе при сгорании одного моля углерода. Определите энергию, выделяющуюся при сгорании атома углерода.

**Задача 2.14.** При движении Земли вокруг Солнца расстояние между ними колеблется в среднем на  $\pm 1,6\%$ . Оцените изменение спектральной характеристики излучения Земли как абсолютно черного тела за счет указанного фактора.

**Задача 2.15.** Установлено, что в атмосфере происходит реакция фотодиссоциации диоксида  $\text{NO}_2$  на  $\text{NO}$  и  $\text{O}$ . При этом поглощается излучение ультрафиолетовой области солнечного спектра, снижая прозрачность атмосферы и способствуя образованию фотохимического тумана – смога. Определите длину волны излучения, если энергия диссоциации диоксида равна 300 кДж/моль.

**Задача 2.16.** На ранней стадии развития Земли более 3 млрд лет тому назад первичный кислород образовывался в результате фотолиза паров воды. Для того, чтобы разрушить связь  $\text{O-H}$ , требуется энергия  $7,69 \cdot 10^{-19}$  Дж. Рассчитайте длину волны, при которой происходит фотолиз.

**Задача 2.17.** Пучок солнечного света приносит 4,2 Дж энергии в минуту на  $1 \text{ см}^2$  поверхности, расположенной перпендикулярно направлению распространения пучка вблизи поверхности Земли. Определите температуру почвы, при которой она излучала бы такое же количество энергии обратно в космическое пространство.

*Чем интенсивнее и скорее  
потребление невозобновимых  
естественных ресурсов,  
тем значительнее нарушение  
окружающей природной среды...*  
Н.Ф.Реймерс

### 3. ФУНКЦИИ РОСТА. ПОТРЕБНОСТЬ В РЕСУРСАХ

Наиболее часто в расчетах, проводимых для экологических систем, используется экспоненциальная функция. Для большинства интересующих нас процессов в окружающей среде обычно предполагается, что кривая роста – это гладкая, непрерывная функция без однократных годовых скачков. Кривая роста хорошо описывается обычной экспоненциальной функцией.

При экспоненциальном росте скорость изменения величины  $N$  пропорциональна самой  $N$  :

$$dN / dt = r \cdot N, \quad (3.1)$$

где  $r$  – скорость роста, измеряемая в единицах (время)<sup>-1</sup>. В демографических и экономических расчетах скорость роста часто выражается в процентах за год. Решение уравнения (3.1):

$$N = N_0 \cdot e^{r \cdot t}. \quad (3.2)$$

Время удвоения  $T_2$  величины, растущей экспоненциально со скоростью  $r$ , легко подсчитать. Полагая  $N = 2N_0$  при  $t = T_2$  в (3.2), получим:

$$2 \cdot N_0 = N_0 \cdot e^{r T_2}, \quad \text{откуда} \quad T_2 = \frac{\ln 2}{r}. \quad (3.3)$$

Весьма часто величина, которую нужно смоделировать, может быть рассмотрена как произведение нескольких отдельных величин. Если величину можно представить в виде произведения  $n$  сомножителей, каждый из которых растет экспоненциально, то полная скорость роста  $r$  будет равна сумме отдельных скоростей:

$$r = r_1 + r_2 + \dots + r_n. \quad (3.4)$$



Большая часть энергии и материалов для поддержания жизни человека на планете получается из невозобновимых полезных ископаемых (ресурсов). Рассмотрим кратко процесс потребления ресурсов. Когда минерал извлекается из земли, геологи обычно говорят, что он вырабатывается. Кривая выработки ресурсов в зависимости от времени показана на рис.3.1, где  $P$  – скорость выработки, а  $Q$  – количество выработанных ресурсов.

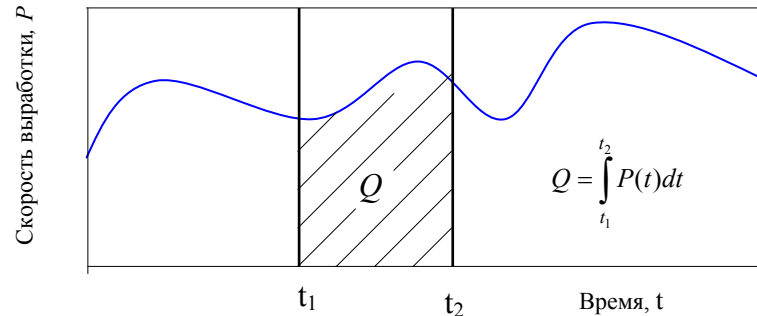


Рис.3.1. Скорость выработки в зависимости от времени: заштрихованная область – количество ресурсов, выработанных в период между  $t_1$  и  $t_2$

Если скорость выработки растет экспоненциально, то полное количество ресурсов, выработанное за любой промежуток времени  $t$ , определить легко. Пусть  $t_1 = 0$ ,  $t_2 = t$ , тогда:

$$Q = \int_0^t P_0 e^{rt} dt = \frac{P_0}{r} (e^{rt} - 1), \quad (3.5)$$

где  $P_0$  – начальная скорость выработки, а  $r$  – скорость роста выработки. Из (3.5) легко определить и промежуток времени, требуемый для выработки данного количества ресурсов  $Q$ . Имеется много способов описания того, как осуществляется полный цикл выработки. Модель экспоненциального роста до полного истощения ресурсов представляется маловероятной. Выработка ресурсов обычно начинается с экспоненциального роста, пока ресурсов много и они относительно дешевы. Для описания полной кривой выработки более подходит

нормальное (гауссовское) распределение. На рис.3.2 показан график этой функции и основные параметры, определяющие ее.

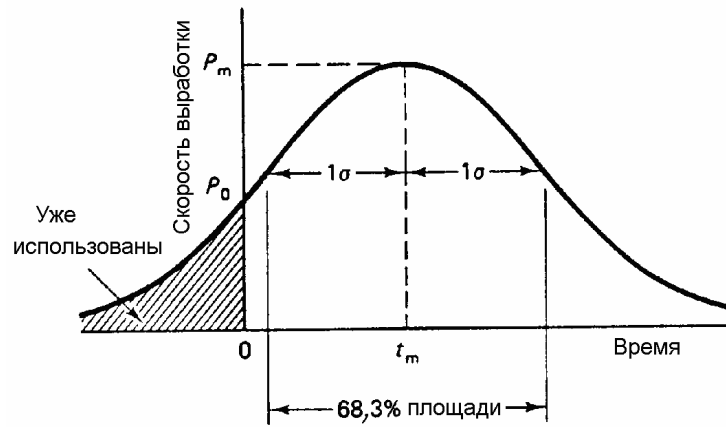


Рис.3.2. Выработка ресурсов в соответствии с гауссовской функцией

Уравнение полного цикла выработки ресурсов выглядит при этом следующим образом:

$$P = P_m \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-t_m}{\sigma}\right)^2\right], \quad (3.6)$$

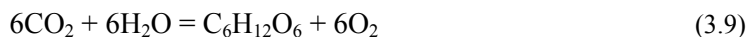
где  $P_m$  – максимальная скорость выработки в момент времени  $t_m$ ,  $\sigma$  – стандартное отклонение. Полное количество ресурсов, выработанных за все время  $Q_\infty$ :

$$\begin{aligned} Q_\infty &= \int_{-\infty}^{\infty} P dt = \int_{-\infty}^{\infty} P_m \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-t_m}{\sigma}\right)^2\right] dt = \\ &= \sqrt{2\pi} \cdot \sigma \cdot P_m. \end{aligned} \quad (3.7)$$

Если в (3.7) считать, что при  $t = 0$  начальная скорость выработки  $P_0$ , то можно получить выражение для момента времени  $t_m$ , когда выработка максимальна:

$$t_m = \sigma \cdot \sqrt{2 \ln \frac{P_m}{P_0}}. \quad (3.8)$$

В зеленых растениях осуществляется фотосинтез – получение органического вещества и кислорода под действием солнечного излучения. Ежегодно в процессе фотосинтеза на Земле образуется органическое вещество согласно реакции фотосинтеза:



(в правой части уравнения в качестве вырабатываемой биомассы представлена молекула глюкозы), для чего требуется 674 ккал/моль солнечной энергии.

В настоящее время сельскохозяйственные культуры способны преобразовывать падающую солнечную энергию в запасенную химическую энергию с эффективностью только в 1-3% при самых благоприятных условиях.

**Задача 3.1.** Сколько тонн условного топлива калорийностью 7000 ккал/кг необходимо ежегодно для обеспечения всего населения Земли (6 млрд чел) энергией 10 кВт·год/чел?

**Задача 3.2.** Предположим, валовой национальный продукт (ВНП) страны на душу населения растет со скоростью 3%, а численность населения увеличивается со скоростью 0,5% в год. Предположим также, что благодаря усилиям по энергосбережению энергия, необходимая для создания 1 рубля ВНП, в последние годы уменьшается экспоненциально. Десять лет назад отношение (энергия/ВНП) составляло 1,0 МДж/руб, а в настоящее время – 0,8 МДж/руб. Какова полная скорость роста потребления энергии?

**Задача 3.3.** Мировое производство угля достигает 5 млрд т в год, а извлекаемые запасы оцениваются в 1 трлн т. Скорость роста производства угля за последние 10 лет составила в среднем 2,7% в год. На сколько лет хватит этих запасов, если такие темпы роста сохранятся?

**Задача 3.4.** В земной коре содержится около  $5 \cdot 10^{-4}\%$  естественного урана. Определить, какому количеству угля с теплотворной способностью  $3 \cdot 10^7$  Дж/кг будет эквивалентен уран, содержащийся в 1 т

земли, если 1 кг делящегося изотопа  $^{235}\text{U}$ , составляющего всего 0,72% естественного урана, выделяет энергию, равную  $8,2 \cdot 10^{13}$  Дж?

**Задача 3.5.** Добыча нефти в 1997 г. в России достигала скорости 306 млн т/год. Предположим, что окончательная выработка нефти в России в два раза превышает извлекаемые запасы на 1997 г., оцениваемые в 27,5 млрд т. Сколько времени потребуется, чтобы достичь максимальной скорости выработки, в 4 раза превышающей темпы 1997 г., если следовать гауссовской кривой?

**Задача 3.6.** По последним данным мировые резервы хрома составляют 800 млн т, а современные темпы потребления 2 млн т в год. Если темпы потребления хрома будут расти экспоненциально с постоянной скоростью 2,6% в год, сколько времени потребуется для выработки имеющихся резервов? Если количество ресурсов в 5 раз превышает имеющиеся резервы, сколько времени потребуется для выработки всех ресурсов?

**Задача 3.7.** Предположим, что выработка хрома описывается гауссовской кривой. Если функция выработки будет иметь максимум, в 6 раз превышающий текущую скорость выработки в 2 млн т в год, сколько времени потребуется, чтобы достичь максимума выработки? Общее количество ресурсов составляет 4 млрд т.

**Задача 3.8.** Какой запас пресной воды содержится в айсберге площадью  $0,5 \text{ км}^2$  с высотой над поверхностью воды 20 м? Принять плотность льда  $0,91 \text{ г/см}^3$ , а плотность морской воды  $1,03 \text{ г/см}^3$ .

**Задача 3.9.** В течение одного года на  $1 \text{ см}^2$  поверхности нашей планеты ( $R_{\text{Земли}} = 6400 \text{ км}$ ) поступает от Солнца в среднем 108 ккал. Разведанные запасы ископаемого топлива на Земле приблизительно эквивалентны  $3 \cdot 10^{22}$  Дж. За какое время Солнце «доставит» на Землю такую запасенную энергию?

**Задача 3.10.** Оценить ежегодную скорость прироста биомассы (интенсивность солнечного излучения на земной поверхности в ясный солнечный день равна  $108 \text{ ккал/см}^2/\text{год}$ ), если на фотосинтез тратится лишь 1% этой энергии. Принять энергетический эквивалент для растений равным  $18,7 \text{ кДж/г}$ . Также оценить максимально возможный урожай для пшеницы, если ее масса составляет 45% от общей биомассы и для средней полосы имеется 1500 ч светлого времени за сезон. На дыхание растений тратится 50% всей получаемой энергии.

**Задача 3.11.** Найти время обращения атмосферного кислорода через биогенный цикл. Массу атмосферы Земли принять равной  $5,9 \cdot 10^{15} \text{ т}$ ,

а доля кислорода по массе составляет 23,1%, ежегодная продуктивность биосферы –  $2,32 \cdot 10^{11}$  т.

**Задача 3.12.** Если доля углекислого газа  $\text{CO}_2$  по массе в атмосфере Земли составляет 0,047%, определите время цикла для углерода в атмосфере. Воспользоваться необходимыми данными из предыдущей задачи.

**Задача 3.13.** Получить количественную оценку эффективности транспирации, т.е. отношение количеств транспирированной воды к связанной воде, в благоприятных условиях (см. задачу 3.10). Принять, что 50% солнечного излучения идет на испарение воды.

**Задача 3.14.** Интенсивность поглощения зелеными растениями солнечной энергии в умеренном климате в среднем составляет  $20000 \text{ кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$ . Около 1,2% поглощенной энергии расходуется на фотосинтез. Вычислить, какая площадь зеленых растений обеспечивает человека кислородом, если суточная потребность составляет 700 г?

*Существуют определенные верхние  
и нижние пределы для популяции,  
которые соблюдаются в природе...*

Ю.Одум

#### 4. РОСТ НАСЕЛЕНИЯ

Модель экспоненциального роста хорошо подходит для краткосрочных прогнозов роста популяции, но даже малая скорость роста не может поддерживаться долгое время, поскольку рост населения неизбежно столкнется с ограничениями, связанными с окружающей средой. Поэтому получалось, что темпы роста населения Земли зависели от темпов развития жизнеобеспечивающих технологий.

Закон роста населения планеты до середины XX века хорошо описывался гиперболой, являющейся решением следующего дифференциального уравнения:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{1}{C} \cdot N^2, \quad (4.1)$$

в котором скорость роста численности населения Земли примерно пропорциональна квадрату его численности, а  $C$  – определяющий коэффициент. Решением уравнения (4.1) является зависимость, определяющая гиперболический рост населения:

$$N(t) = \frac{C}{t_0 - t}, \quad (4.2)$$

где  $N(t)$  – население мира в год  $t$ ;  $t_0$  – момент времени, когда население мира стало бы бесконечным, если бы продолжило расти и далее. Согласно данной модели обычно полагают  $t_0 = 2025$  год, а  $C = 2 \cdot 10^{11}$ .

Данная формула хорошо согласуется с данными демографии и описывает рост населения в течение приблизительно нескольких десятков тысяч лет. Тем не менее, область ее применимости принципиально ограничена как в будущем, так и в прошлом.

Начиная с 1960-х годов, относительные темпы роста населения стали все больше замедляться, и на смену мировому гиперболическому демографическому росту пришел другой тип – логистический рост.

Эта зависимость численности популяции от времени в естественных условиях описывается S-образной логистической кривой, показанной на рис.4.1. По достижении какого-то предела график выходит на плато и численность стабилизируется. Часто прогнозы численности населения математически моделируются именно такой кривой роста.

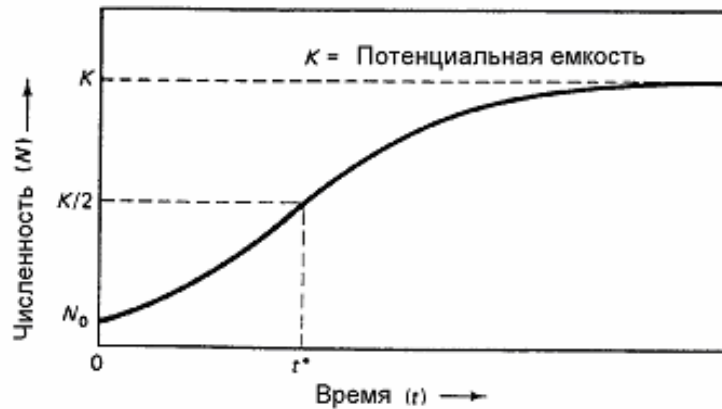


Рис.4.1. Логистическая кривая роста

Логистическая кривая роста предполагает плавный переход от экспоненциального роста популяции к стационарной фазе. Математически логистическая кривая описывается дифференциальным уравнением

$$\frac{dN}{dt} = r \cdot N \cdot \left(1 - \frac{N}{K}\right), \quad (4.3)$$

где  $N$  – размер популяции,  $r$  – скорость роста,  $K$  – максимально возможная в данных условиях численность популяции или потенциальная емкость экологической системы. Наличие определенной емкости среды, ограничивающей рост популяции, является важной экологической закономерностью.

Множитель  $(1 - N/K)$  часто называют сопротивлением окружающей среды, так как математическое выражение этой зависимости отличается от экспоненциальной только наличием этого множителя. Решение уравнения (4.3) имеет вид:

$$N = \frac{K}{1 + e^{-r(t-t^*)}}. \quad (4.4)$$

Отметим, что  $t^*$  соответствует моменту времени, когда  $N = K/2$ . Подставляя  $t = 0$  в (4.4), получим выражение

$$t^* = \frac{1}{r} \ln\left(\frac{K}{N_0} - 1\right), \quad (4.5)$$

где  $N_0$  – численность популяции при  $t = 0$ , когда рост популяции хорошо описывается экспоненциальной функцией. В решение (4.4) входит неизвестная скорость роста  $r$ , которую можно найти, если ввести мгновенную скорость роста  $r_0$  для экспоненциальной модели в момент времени  $t = 0$ , т.е.:

$$\left. \frac{dN}{dt} \right|_{t=0} = r_0 \cdot N_0. \quad (4.6)$$

С другой стороны, это же значение можно найти из уравнения (4.3). Следовательно, из равенства получим искомую скорость роста

$$r = \frac{r_0}{1 - N_0/K}. \quad (4.7)$$

Логистическую кривую роста можно использовать при рассмотрении другой полезной концепции – максимально устойчивой отдачи экосистемы. Максимально устойчивая отдача определяет максимальную скорость  $(dN/dt)_{\max}$ , с которой может изменяться популяция без нарушения ее общей динамики и размера.

Однако уравнение логистического роста (4.4) дает только грубую оценку роста человеческой популяции, поскольку не использует более детальную информацию о темпах прироста и смертности, а также о возрастной структуре населения.

Для более точного прогноза вводят коэффициенты рождаемости и смертности. Коэффициент рождаемости  $B$  – количество рождений на 1000 человек населения за данный год, коэффициент смертности  $D$  –



число смертей на 1000 человек за год. Коэффициент детской смертности равняется числу умерших детей в возрасте до 1 года на 1000 родившихся жителей за данный год. Коэффициент полного прироста – это среднее количество рожденных живыми детей на одну женщину. Количество детей, которых в среднем должна иметь каждая женщина для поддержания населения страны на постоянном уровне, называется замещающим уровнем прироста. Явление продолжения роста населения, несмотря на то, что замещающий уровень прироста достигнут, называют инерцией популяции.

Разница между коэффициентами рождаемости и смертности называется коэффициентом естественного прироста населения  $r = B - D$ . Данный коэффициент может быть выражен как в единицах на 1000, так и в процентах. Если  $r$  рассматривать как независимый от времени коэффициент, то для прогнозирования численности населения на ранней стадии можно использовать экспоненциальное уравнение (3.2).

**Задача 4.1.** Население планеты в 1830 г. оценивалось в 1 млрд чел. К концу 1999 г. оно достигло 6 млрд чел. Оценить скорость экспоненциального роста, который мог бы дать такой результат. Каково при этом время удвоения населения?

**Задача 4.2.** Численность лабораторной популяции простейших растет экспоненциально. В начальный момент эта численность равна 50 особям, а через час достигает 150 особей. Найдите скорость роста для этой популяции и период удвоения.

**Задача 4.3.** Предположим, что человеческая популяция следует логистической кривой, пока не стабилизируется при 15 млрд чел. В 1999 г. население планеты составляло 6 млрд чел., а скорость его роста 1,7%. Когда будут достигнуты уровни в 7,5 млрд и 14 млрд чел.?

**Задача 4.4.** Доказать, что максимально устойчивая отдача получается, когда популяция достигает половины потенциальной емкости (используйте уравнение (4.3)).

**Задача 4.5.** Предположим, что популяция следует простой логистической кривой роста. Найти максимально устойчивую отдачу как функцию потенциальной емкости  $K$ , текущей численности популяции  $N_0$  и мгновенной скорости роста  $r_0$ .

**Задача 4.6.** В пруд запустили 50 карпов и заметили, что сначала популяция удваивалась каждый год, а затем через некоторое время стабилизировалась на уровне 4000 рыб, что соответствует потенциальной

емкости пруда. Используя результаты задачи 4.5, найти максимально устойчивую отдачу пруда.

**Задача 4.7.** В 1997 г. при населении 147,6 млн чел. Россия имела коэффициенты рождаемости 9,3, смертности 14,5 и детской смертности 17,3 соответственно. Какова доля детской смертности в общем количестве смертей? Если коэффициент детской смертности равнялся бы 9 (как в высокоразвитых странах), сколько детских смертей можно было бы избежать каждый год?

**Задача 4.8.** Статистические данные по Индии в 1996 г. были таковы: население 950 млн чел., коэффициенты рождаемости 34, смертности 13, детской смертности 118 соответственно. Найти долю детской смертности. Если динамика человеческой популяции в Индии сохранится на уровне 1996 г., через сколько лет ее население удвоится?

**Задача 4.9.** Рассмотрим упрощенную возрастную структуру, разделяющую популяцию страны на три группы: в возрасте от 0 до 24 – 2,5 млн чел.; от 25 до 49 – 1,5 млн чел.; от 50 до 74 – 1,0 млн чел. Положим, что все женщины рожают непосредственно перед 25-м днем рождения и все смерти приходятся на 75 лет. Коэффициент полного прироста в течение первых 25 лет в стране равен 4, а дальше все время 2. Нарисовать возрастные структуры, какими они будут через 25, 50 и 75 лет.

**Задача 4.10.** Решить задачу 4.9 при следующих условиях. Начальная численность популяции: в возрасте от 0 до 24 – 3 млн чел.; от 25 до 49 – 2 млн чел.; от 50 до 74 – 1 млн чел. Замещающий уровень прироста достигнут в начальный момент.

**Задача 4.11.** Оценить численность населения планеты, какой она была в 1830 г. и в 1999 г., используя гиперболическую модель. Принять  $t_0 = 2025$  и  $C = 2 \cdot 10^{11}$ .

## 5. РАДИОЭКОЛОГИЯ

Радиоэкология – раздел экологии, исследующий действие ионизирующих излучений на особи, популяции, сообщества и экосистемы, а также миграцию радионуклидов в среде обитания.

Одним из источников ионизирующих излучений является радионуклид – атомное ядро, способное к радиоактивному распаду.

Под активностью радионуклида в источнике понимается отношение ожидаемого числа  $dN$  спонтанных ядерных превращений из данного энергетического состояния, происходящих в источнике за интервал времени  $dt$ , к величине этого интервала:

$$A = \frac{dN}{dt}. \quad (5.1)$$

Единицей активности радионуклида является беккерель: 1 Бк = 1 распад/с. Внесистемной единицей активности является кюри: 1 Ки =  $3,7 \cdot 10^{10}$  Бк. Отношение активности радионуклида к массе, объему, площади источника называется удельной, объемной, поверхностной активностью радионуклида соответственно.

Изменение активности радионуклида во времени выражается экспоненциальным законом радиоактивного распада:

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda \cdot t}, \quad (5.2)$$

где  $A_0$  и  $A(t)$  – активности радионуклида в начальный момент времени и по прошествии времени  $t$  соответственно;  $\lambda$  – постоянная распада, характеризующая вероятность распада на один атом в единицу времени.

Активность связана с числом радиоактивных атомов следующим образом:

$$A = \lambda \cdot N = 0,693 \cdot N / T_{1/2}, \quad (5.3)$$

где  $N$  – число радиоактивных атомов, имеющих в источнике в данный момент времени;  $T_{1/2}$  – период полураспада, т.е. время, в течение которого распадается половина радиоактивных атомов. Таким образом:

$$T_{1/2} = \frac{0,693}{\lambda}, \quad \tau = \bar{t} = \frac{\int_0^{\infty} t dN(t)}{\int_0^{\infty} dN(t)}. \quad (5.4)$$

В формулах (5.4)  $T_{1/2}$  – период полураспада,  $\tau$  – среднее время жизни радионуклида.

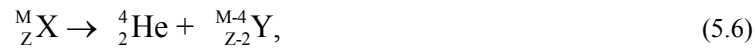
Между активностью  $A$  в беккерелях (Бк) и массой радионуклида  $m$  в граммах с атомной массой  $M$  согласно выражению (5.3) существует следующая зависимость:

$$A = \frac{0,693}{T_{1/2}} \cdot \frac{N_A}{M} \cdot m, \quad (5.5)$$

где  $N_A = 6,023 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup> – число Авогадро; период полураспада  $T_{1/2}$  измеряется в секундах.

Имеются следующие основные типы радиоактивных превращений.

1.  $\alpha$ -Распад (испускание ядра атома гелия  ${}^4_2\text{He}$ ), преобладающий для радионуклидов с большими атомными номерами, записывается в виде:



где  $X$  – исходное материнское ядро, а  $Y$  – дочернее ядро продукта распада.

2.  $\beta^-$ -Распад (испускание электрона), происходящий как для естественных, так и для искусственных радионуклидов; электронный распад представляется в виде:

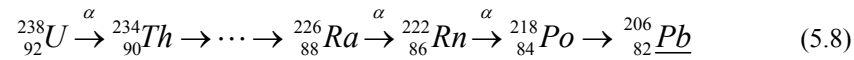


где  $\tilde{\nu}$  – антинейтрино.

3.  $\beta^+$ -Распад с испусканием позитрона и  $K$ -захват (захват орбитального электрона ядром) приводят к возникновению одного и того же дочернего ядра распада  ${}^M_{Z-1}Y$ .
4. Спонтанное деление.

При распаде радионуклида не всегда образуется стабильный нуклид. Дочерний продукт может быть радиоактивным и образовывать новый радионуклид. Этот процесс принято изображать в виде радиоактивной цепочки, состоящей из материнского радионуклида и его потомства.

Примером такой цепочки может служить радиоактивная цепочка семейства урана, фрагментарно приведенная ниже:



В этих случаях говорят о достижении радиоактивного равновесия при распаде исходного (материнского ядра)  $N_0$  и возникновении новых (дочерних) ядер  $N_1, N_2, \dots, N_i$ , если активности радионуклидов цепочки равны

$$\lambda_0 \cdot N_0 = \lambda_1 \cdot N_1 = \lambda_2 \cdot N_2 \text{ и т.д.} \quad (5.9)$$

Действие ионизирующих излучений на вещество проявляется в ионизации атомов и молекул, входящих в состав вещества. Мерой этого радиационного воздействия служит поглощенная доза – отношение средней энергии, переданной веществу в элементарном объеме ионизирующим излучением, к массе вещества в этом объеме. За единицу поглощенной дозы в СИ принимают грей (Гр): 1 Гр = 1 Дж/кг.

Для оценки биологического действия излучения при хроническом облучении человека в малых дозах служит величина эквивалентной дозы. Поглощенная и эквивалентная дозы связаны коэффициентом качества  $K$ , зависящим от вида излучения. Эквивалентная доза  $H$  есть произведение поглощенной дозы  $D$  на коэффициент качества излучения  $K$  в данном объеме биологической ткани. Единицей измерения эквивалентной дозы в СИ является зиверт (Зв): 1 Зв = 1 Гр/К.

Для случаев неравномерного облучения различных органов или тканей тела человека введено понятие эффективной дозы  $H_E$ :

$$H_E = \sum_T w_T \cdot H_T, \quad (5.10)$$

где  $H_T$  – эквивалентная доза в  $T$ -м органе;  $w_T$  – взвешивающий коэффициент, представляющий собой отношение стохастического риска смерти при облучении  $T$ -го органа к риску смерти от равномерного облучения всего тела при одинаковых эквивалентных дозах. Так как  $\sum_T w_T = 1$ , при равномерном облучении всего тела  $H_E = H$ .

Эквивалентная доза или эффективная доза, характеризующие меру ожидаемого эффекта облучения для одного организма, являются индивидуальными дозами. На практике возникает необходимость оценивать эффект при облучении больших групп людей или целых популяций. В этом случае используется понятие коллективной дозы, равной сумме индивидуальных доз. Единицей коллективной эквивалентной дозы в СИ является человеко-зиверт (чел-Зв).

Для оценки полного радиационного воздействия от долгоживущих радионуклидов используется понятие ожидаемой коллективной дозы, которая определяется как доза от какого-либо радиоактивного источника за все время его существования или за определенный длительный промежуток времени.

Основную часть облучения организмы получают от естественных источников радиации, содержащихся в атмосфере, земной коре, воде и биоте. Среди космогенных радионуклидов наибольшую радиозоологическую значимость имеют тритий  $^3\text{H}$  и радиоуглерод  $^{14}\text{C}$ . Среди земных природных радионуклидов наиболее важное значение имеет изотоп калия  $^{40}\text{K}$ , а также изотопный ряд урана  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  и тория  $^{232}\text{Th}$ .

Значение радиационного фактора, при превышении которого следует проводить определенные защитные мероприятия, называется уровнем вмешательства.

В табл.5.1 представлены периоды полураспадов и значения допустимой объемной активности (ДОВА) во вдыхаемом воздухе и уровни вмешательства (УВ) при поступлении с водой отдельных радионуклидов.

Таблица 5.1

**Характеристики и пороговые значения некоторых радионуклидов**

Радионуклид	Период полураспада $T_{1/2}$ , год	ДОО в воздухе, Бк/м <sup>3</sup>	УВ для воды, Бк/кг
<sup>3</sup> H	12,3	$1,9 \cdot 10^3$	$3,3 \cdot 10^3$
<sup>14</sup> C	$5,73 \cdot 10^3$	55	$2,4 \cdot 10^2$
<sup>90</sup> Sr	29,1	2,7	5
<sup>131</sup> I	8,04 сут	7,3	6,3
<sup>210</sup> Pb	22,3	0,11	0,2
<sup>40</sup> K	$1,28 \cdot 10^9$	31	22
<sup>226</sup> Ra	$1,6 \cdot 10^3$	$3,0 \cdot 10^{-2}$	0,5
<sup>232</sup> Th	$1,40 \cdot 10^{10}$	$4,9 \cdot 10^{-3}$	0,6
<sup>235</sup> U	$7,04 \cdot 10^8$	$3,7 \cdot 10^{-2}$	3,0
<sup>238</sup> U	$4,47 \cdot 10^9$	$4,0 \cdot 10^{-2}$	3,1
<sup>239</sup> Pu	$2,41 \cdot 10^4$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	0,56

**Задача 5.1.** Что продолжительнее – три периода полураспада или два средних времени жизни радионуклида? Какой процент радиоактивных атомов образца распадается на протяжении одного среднего времени жизни, двух средних времен жизни?

**Задача 5.2.** Пусть образец содержит 1000 радиоактивных ядер с периодом полураспада  $T_{1/2}$ . Сколько ядер останется через промежуток времени  $T_{1/2}/2$ ? Какова вероятность, что радиоактивное ядро выживет на протяжении 10 периодов полураспада?

**Задача 5.3.** Образец радиоактивного вещества содержит  $10^{12}$  радиоактивных атомов. Сколько атомов распадается каждую секунду, если период полураспада равен 1 ч?

**Задача 5.4.** За счет космического излучения на высоте 6100 м над уровнем моря в секунду образуются 23 пары ионов в 1 см<sup>3</sup> воздуха. Чему равна поглощенная доза за год, вызывающая такую ионизацию? Принять плотность воздуха на высоте 6100 м равной  $1,1 \cdot 10^{-3}$  г/см<sup>3</sup>. Считать, что на образование одной пары ионов затрачивается энергия, равная 33,85 эВ.

**Задача 5.5.** Известно, что в естественном уране по массе наряду с 99,28%  $^{238}\text{U}$  содержится 0,72%  $^{235}\text{U}$ . Определите содержание  $^{235}\text{U}$  в естественном уране, какое было 2 млрд лет тому назад?

**Задача 5.6.** Возраст урановых минералов принимается равным 3 млрд лет. Рассчитать (в % по массе), какое количество свинца  $^{206}\text{Pb}$  накопится в минерале за это время?

**Задача 5.7.** Оцените, во сколько раз различаются концентрации трития в винах 10-летней и 50-летней выдержки?

**Задача 5.8.** Определить возраст археологической находки органического характера, если измеренная удельная активность содержащегося в ней  $^{14}\text{C}$  составила 70% от равновесной.

**Задача 5.9.** Сколько времени требуется, чтобы нагреть 10 мл воды, в которой находится 10 мг  $^{239}\text{Pu}$ , на 10 °C за счет энергии радиоактивного распада? Принять выделяющуюся энергию равной 5,21 МэВ/распад, а тепловыми потерями в системе пренебречь.

**Задача 5.10.** В организме человека в среднем содержится около 7,03 Бк радия, 99% которого сосредоточено в костях. Предполагая, что радий находится в равновесии с основными дочерними продуктами распада и равномерно распределен в костях, определить общее число фотонов радия, образующихся в 1 мин в 1 г костей, если их масса равна 7 кг. Квантовый выход фотонов на один распад составляет 233%.

**Задача 5.11.** Измерения объемных концентраций  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{140}\text{Ba}$  в молоке показали значения 0,26; 2,4 и 11,1 Бк/л соответственно. Определить, сколько распадов всех трех радионуклидов происходит в см<sup>3</sup> молока за 1 ч.

**Задача 5.12.** Плутониевый аэрозоль прокачивается через фильтр со скоростью 50 л/мин в течение 40 мин. Сколько атомов плутония содержит аэрозоль в 1 л воздуха, если активность фильтра, имеющего эффективность 98%, после прекращения прокачки оказалась равной 111 МБк?

**Задача 5.13.** Рассчитать удельную активность от одного из компонентов естественного фона – равномерно распределенного в почве калия с концентрацией 0,028 г естественного К на 1 г породы. Учесть, что фотонное излучение обусловлено  $^{40}\text{K}$ , массовое содержание которого в естественном калии 0,0119%.

**Задача 5.14.** Рассчитать поглощенную годовую дозу внутреннего облучения гонад естественным источником – радионуклидом  $^{40}\text{K}$  с удельной активностью в гонадах  $8,4 \cdot 10^{-2}$  Бк/г. Эффективная поглощенная энергия равна 0,47 МэВ/расп.



**Задача 5.15.** Средняя доза дополнительного облучения для человека, проживающего в непосредственной близости от АЭС, оценивается за год примерно в  $1,0 \cdot 10^{-5}$  Зв. Сколько дополнительных случаев смерти от рака можно было бы ожидать в России (при населении 150 млн чел.), из-за влияния АЭС, если бы это облучение было средним по стране? Используйте величину коэффициента вероятности смертельного случая от рака для населения  $5,0 \cdot 10^{-2} \text{ Зв}^{-1}$ .

**Задача 5.16.** Для местных жителей, проживавших в районе Чернобыля, полученная эквивалентная доза оценивается в 0,05 Зв. Используя данные предыдущей задачи, оцените риск смерти от рака индивидуума, получившего при аварии такую дозу радиации.

**Задача 5.17.** Дочерний радионуклид  $^{226}\text{Ra}$  находится в радиоактивном равновесии в урановой цепочке распада, т.е. в любой момент времени распада происходит компенсация данного радионуклида за счет распада предыдущего. Определите содержание  $^{238}\text{U}$  в 11 т руды, которую за всю жизнь вручную переработала Мария Кюри, получив при этом всего 8,5 мг  $^{226}\text{Ra}$ .

## **6. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ**

В настоящее время энергетические потребности обеспечиваются в основном за счет трех видов энергоресурсов: органического топлива, воды и атомного ядра.

Сжигание топлива не только основной источник энергии, но и важнейший поставщик загрязняющих веществ. Тепловые станции в наибольшей степени ответственны за усиление парникового эффекта и выпадение кислотных дождей.

Использование гидроэнергии может дать не более 3-5% общей потребности в энергии, уничтожая огромные площади сельскохозяйственных земель.

Появление альтернативных источников получения энергии связано с истощением ресурсов и загрязнением окружающей среды. К таким источникам относятся энергии солнца, ветра, воды и недр земного шара, термоядерного синтеза.

Солнце практически неисчерпаемый источник энергии, которую можно получать с помощью, как фокусировки солнечных лучей, так и фотоэлементов.

Запасы ветроэнергетики более чем в сто раз превышают запасы гидроэнергии всех рек планеты, но для работы ветровых электростанций необходим постоянный ветер, а он есть не всегда. Мощность такой электростанции пропорциональна кубу скорости ветра и квадрату радиуса ветровой установки.

В наше время приливная энергия в основном превращается в электрическую энергию на приливных электростанциях и вливается затем в общий поток энергии, вырабатываемой электростанциями всех типов. В отличие от гидроэнергии рек, средняя величина приливной энергии мало меняется от сезона к сезону, что позволяет приливным электростанциям более равномерно обеспечивать энергией промышленные предприятия.

Геотермальными называются выделяющиеся из недр Земли воды с температурой от 40 до 100°C. Наибольшая температура поступающей к земной поверхности геотермальной воды может достигать 300°C, а температура пара доходить до 600°C.

Получение электрической энергии осуществляется с помощью

геотермальных вод и пара наиболее высоких параметров. Полная энергия геотермальных вод земной коры во много раз превышает энергию всех видов ископаемого топлива.

Поскольку для получения электрической энергии на геотермальных электростанциях используется даровое тепло Земли, они вырабатывают более дешевую энергию, чем энергия тепловых, атомных и гидроэлектростанций. Если принять при этом во внимание и большие запасы геотермальной энергии в земной коре, можно утверждать, что геотермальной энергетике принадлежит большое будущее.

Используя разницу в температуре поверхностных и глубинных вод, можно из природных вод извлекать тепло и перерабатывать его на электростанциях в электроэнергию.

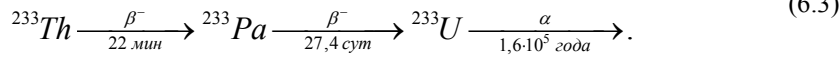
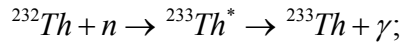
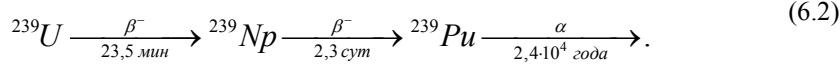
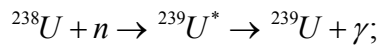
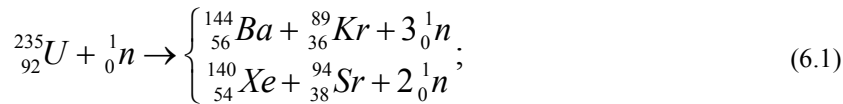
Однако главным недостатком всех альтернативных энергоносителей – ветра, солнца, или той же энергии океана – является непостоянство такого источника энергии. По прогнозу авторитетных организаций к 2020 году на долю альтернативных источников энергии придется около 6% общего энергопотребления.

Открытие деления урана позволило использовать реакцию деления как мощный источник энергии.

Естественный уран содержит 99,28%  $^{238}\text{U}$ , 0,72%  $^{235}\text{U}$  и следы  $^{234}\text{U}$ . В настоящее время наибольшее распространение получили реакторы на тепловых нейтронах, где в качестве топлива используется  $^{235}\text{U}$ . Хотя другие изотопы, например  $^{238}\text{U}$ , делятся на быстрых нейтронах, их нельзя использовать в ядерном реакторе в качестве топлива.

Нуклиды, ядра которых могут делиться под действием каких-либо частиц, называются делимыми. Наибольший интерес представляет деление тяжелых ядер нейтронами, поскольку в результате каждого акта деления образуются новые свободные нейтроны. Таким образом возникает самоподдерживающаяся цепная реакция. Нуклиды, которые делятся под действием нейтронов любых энергий, называются делящимися (рис.6.1).

Наиболее важными для ядерной техники являются естественные (сырьевые) нуклиды  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$ , встречающиеся в природе, и искусственные  $^{233}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$ , которые нарабатываются из сырьевых в ядерных реакторах, формулы (6.2) и (6.3).



В результате деления ядра небольшая часть массы делящегося вещества превращается в энергию движения образовавшихся осколков и энергию излучения. При сжигании угля масса также изменяется, но всего лишь на несколько миллиардных частей грамма на моль, что эквивалентно нескольким электрон-вольтам энергии на один атом углерода.

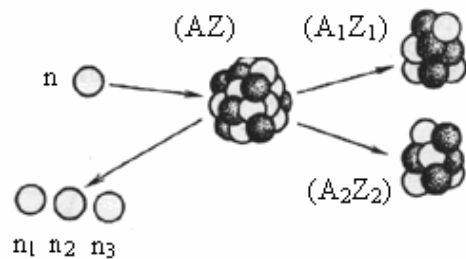


Рис.6.1. Деление ядра (AZ) первичным нейтроном  $n$  на два осколочных ядра (A<sub>1</sub>Z<sub>1</sub>) и (A<sub>2</sub>Z<sub>2</sub>) с возникновением нейтронов  $n_1, n_2, n_3$

При делении ядра в основном выделяется кинетическая энергия, переносимая осколками деления, а также частицами и квантами с энергиями до нескольких МэВ. Вся эта энергия, в конце концов, переходит в тепло. При делении  ${}^{235}\text{U}$  выделяется около 200 МэВ на каждый акт деления. И хотя абсолютное значение энергии мало, но по отношению к массе, вовлеченной в процесс деления, эта энергия является огромной.

Глубина выгорания топлива определяется как отношение количества израсходованного ядерного топлива, к общему количеству первоначально загруженного топливного материала, выраженное в процентах.

Другая возможность получения ядерной энергии заключается в реализации реакции слияния легких ядер, получившей название реакции термоядерного синтеза. Например, реакция синтеза ядер дейтерия с ядрами трития



открывает неограниченные возможности для производства энергии.

В заключение приведем данные об источниках энергии, охватывающие весь прошлый век и прогноз до 2100 года. Если в 1900 году 60% энергии человечество получало за счет сжигания дров, то потом началась развиваться угледобыча, а потом пришла нефть. К 1980 году 40% энергии давала нефть, 20% – газ, а 25% – уголь. Согласно прогнозу до 2020 года, доля угля в мировом энергопотреблении вырастет до 30-32%, газ останется на уровне 18%, а нефть с 40 понизится до 20%. Гидроэнергия останется на уровне 3%. Что касается атомной энергии, то ее доля вырастет с сегодняшних 8 до 12%.

**Задача 6.1.** Подсчитать мощность в ваттах, соответствующую  $3,1 \cdot 10^{10}$  делений в секунду, если высвобождение энергии при 1 делении равно примерно 200 МэВ.

**Задача 6.2.** Какова тепловая мощность в активной зоне реактора, если расход  ${}^{235}\text{U}$  составляет 1 г/сут?

**Задача 6.3.** Во сколько раз энергия, выделяемая при делении 1 г уранового горючего, больше энергии, выделяемой при сгорании 1 г угля? Энергетическое содержание угля принять равным 24 кДж/г.

**Задача 6.4.** Определить расход делящегося вещества (природного урана) в течение одного года работы АЭС мощностью 1000 МВт, считая глубину выгорания 0,35%; выделение теплоты на 1 кг делящегося вещества составляет  $6,7 \cdot 10^{13}$  Дж. Время работы электростанции равно 7000 ч/год, а ее КПД = 0,33.

**Задача 6.5.** Какова максимально возможная эффективность, которую может иметь ТЭС, если температура пара 500°C, а охладителя 20 °С? Какова максимально возможная эффективность электростанции, использующей термальную энергию океана (температура воды из глубины к поверхности океана изменяется от 5 до 25 °С)?

**Задача 6.6.** Уголь, используемый для сжигания в ТЭС, имеет энергетическое содержание 24 кДж/г. Нормативные документы ограничивают выброс двуокиси серы до 260 г (130 г элементарной серы), а макрочастиц до 13 г на миллион кДж выходной теплоты. ТЭС сжигает топливо с содержанием 2% серы и 10% шлаков. Около 70% шлака улетучивается в виде пепла и 30% осаждается в виде золы. Эффективность ТЭС – 33,3%. Найти допустимый выброс серы и частиц на 1 кВт·ч производимой ТЭС энергии. Какова должна быть эффективность улавливания серы и частиц (все они состоят из пепла), чтобы соответствовать предъявляемым требованиям по допустимому выбросу?

**Задача 6.7.** Турбина гидроэлектростанции расположена на 200 м ниже уровня воды в водохранилище. Скорость воды после прохождения турбины 30 м/с. Какая часть энергии воды передана турбине, если пренебречь потерями на трение в подводящем канале?

**Задача 6.8.** При производстве 1 кВт·ч электроэнергии на современной АЭС тепловые отходы в воду, используемую для охлаждения, составляют 1900 ккал. Приняв для местности с умеренным климатом охлаждающую способность воды, равной 10 ккал/(м<sup>2</sup>·ч), оценить площадь водной поверхности, требуемую для рассеяния теплоты от АЭС мощностью 1000 МВт только за счет охлаждающей способности воды.

**Задача 6.9.** Количество солнечной энергии, падающей в виде излучения на поверхность Земли, составляет 0,2 кал/(см<sup>2</sup>·мин). Какую площадь должна иметь солнечная батарея с эффективностью 20% и мощностью 100 Вт?

**Задача 6.10.** Суммарная установленная мощность 428 энергоблоков АЭС мира в 2000 году составила 345 ГВт. Определить, сколько энергии было выработано на этих блоках за год? Какое количество углерода было бы выброшено в атмосферу, если бы то же количество электроэнергии было бы произведено на угольных электростанциях? Принять КПД угольной станции – 40%, содержание С в угле по массе – 60%, калорийность угля 29 МДж/кг.

**Задача 6.11.** До установки электрофильтра в дымовых газах ТЭС содержалось 6,0 г твердых частиц на 1 м<sup>3</sup> газа. Расход газа составлял 5 м<sup>3</sup>/с. Электрофильтр улавливает 2000 кг частиц в сутки. Определите уровень выделения твердых частиц после принятия мер против загрязнения воздуха и эффективность электрофильтра. Определите, обеспечит ли новая система допустимый уровень выделения твердых частиц, равный 0,7 г/м<sup>3</sup>.

**Задача 6.12.** Предположим, что численность населения нашей планеты стабилизируется на величине 9 млрд чел. и потребление энергии на душу населения в год станет равным 10 кВт. Если всю энергию предполагается получать за счет ядерной энергии, то какую эквивалентную массу следует каждую секунду превращать в другие формы энергии?

**Задача 6.13.** Возможным источником ядерной энергии в будущем станет тяжелый водород (дейтерий), имеющийся в морской воде в количестве  $5 \cdot 10^{13}$  т. Используя решение предыдущей задачи, рассчитайте, на какой срок хватит запаса дейтерия, если при реакции синтеза ядер  $1/200$  массы покоя дейтерия превращается в полезную энергию.

## 7. ЗАГРЯЗНЕНИЕ ВОДНОЙ СРЕДЫ

Вода играет большую роль в нашей жизни. Вода покрывает около 70% территории планеты и обладает физическими и химическими свойствами, которые резко отличают ее от других известных жидкостей. Например, она увеличивается в объеме при охлаждении, имеет максимальную плотность при 4 °С, что означает уменьшение ее массы при другой температуре. Значения температуры замерзания и кипения имеет высокую разницу, поэтому вода остается жидкой в большинстве областей Земли.

Среди существующих в природе жидкостей вода обладает наибольшей теплоемкостью, составляющей 4,18 кДж/(кг·К). Это предопределяет ее большое влияние на климат. Основным терморегулятором климата являются воды океанов и морей: накапливая тепло летом, они отдают его зимой. Отсутствие водоемов на местности обычно приводит к образованию резко континентального климата. Благодаря влиянию океанов на значительной части земного шара обеспечивается перевес осадков на суше над испарением, и организмы растений и животных получают нужное им для жизни количество воды.

За последнее время число и масштабы природных катаклизмов, связанных с водой, возросли и в нынешнем веке ожидаются существенные климатические изменения.

Как известно, молекула воды состоит из двух атомов водорода и одного атома кислорода. В составе обычной воды  $H_2O$  имеется небольшое количество тяжелой воды  $D_2O$  и совсем незначительное количество сверхтяжелой воды  $T_2O$ . В молекулу тяжелой воды вместо обыкновенного водорода  $H$  – протия входит его тяжелый изотоп  $D$  – дейтерий, в состав молекулы сверхтяжелой воды входит еще более тяжелый изотоп водорода  $T$  – тритий. В природной воде на 1000 молекул  $H_2O$  приходится две молекулы  $D_2O$ , а на  $10^{18}$  молекул  $H_2O$  одна молекула тритированной воды НТО.

Комбинируя различные сочетания изотопов водорода и кислорода, можно получить 135 разновидностей воды с различными



молярными массами. В природе чаще всего встречаются молекулы воды, построенные из наиболее распространенных изотопов. Молекул  $\text{H}_2\text{O}^{16}$  в природной воде содержится 99,73%, молекул  $\text{H}_2\text{O}^{18}$  порядка 0,2% и молекул  $\text{H}_2\text{O}^{17}$  приблизительно 0,04%.

Вода является богатейшим источником энергии – это гидроэнергия рек, энергия приливов, геотермальная и термоядерная энергия. Водные ресурсы планеты распределяются крайне неравномерно, усиливается конкуренция за воду для ирригации, промышленности, производства электроэнергии, бытовых целей.

Соленые воды океанов сильно ограничивают возможность ее хозяйственного использования, а опреснение океанской воды достаточно трудоемкое и дорогостоящее занятие. К счастью, Солнце выполняет за нас эту работу, испаряя воду и оставляя соли в океане (88% влаги поступает именно из океанов).

Важная роль в изучении процессов, связанных с загрязнением окружающей среды, принадлежит микроэлементам, главным образом, металлам, которые являются продуктами техногенного происхождения. Перечень приоритетных загрязнителей при изучении мониторинга природных сред включает постоянно расширяющийся список элементов, среди которых наиболее важными считаются As, Hg, Cd, Pb, Cu и другие.

Но не только значениями концентрации различных загрязнителей определяется качество воды. Одним из важнейших параметров является количество растворенного в ней кислорода, концентрация которого обычно составляет  $C_K=8-15$  мг/л, значение  $C_K=3$  мг/л является минимально необходимым для существования популяции рыб. Этот показатель уменьшается с ростом температуры воды, а также с повышением концентрации загрязнителей.

Важнейшим показателем по микробиологическим и паразитологическим свойствам воды является величина *БПК* – биологическая потребность в кислороде, необходимом микроорганизмам для разложения примесей, определяющая количество бактерий в объеме воды.

Приведем часть требований к качеству питьевой воды, взятые из санитарных правил, устанавливающих критерии безопасности для человека факторов среды его обитания и требования к обеспечению благоприятных условий его жизнедеятельности, по наличию органических и неорганических веществ (табл. 7.1).

Таблица 7.1

**Значения ПДК для питьевой воды**

Вещество	ПДК, мг/л
Нефтепродукты	0,1
Алюминий	0,5
Бериллий	0,0002
Железо	0,3
Кадмий	0,001
Медь	1,0
Мышьяк	0,05
Нитраты	45
Нитриты	3,0
Ртуть	0,0005
Свинец	0,03
Хлориды	350

Часто используется величина  $БПК_5$  – общее количество кислорода, потребляемое микроорганизмами за первые пять дней разложения при температуре 20 °С. По санитарным нормам значение  $БПК_5$  для природных водоемов не должно превышать 3-6 мг/л, в сточных водах значение составляет уже от 200 до 3000 мг/л, и поэтому их необходимо очищать или сильно разбавлять. Для определения этой величины используется следующее соотношение:

$$БПК_5 = \frac{C_{K1} - C_{K2}}{P}, \quad (7.1)$$

где  $C_{K1}$  и  $C_{K2}$  – начальное и конечное содержание кислорода в разбавленной загрязненной воде, для которой  $P$  – фактор разбавления, отношение объема загрязненной воды к объему воды с учетом разбавления.

В случае если в воде для разбавления содержатся микроорганизмы, то  $БПК_w$  загрязненной воды определяется из соотношения:

$$БПК_m \cdot V_m = БПК_w \cdot V_w + БПК_d \cdot V_d, \quad (7.2)$$

где  $БПК_m$  – определяется для смеси загрязненной и разбавленной воды;  $БПК_w$  – для загрязненной воды;  $БПК_d$  – для разбавителя, а  $V_m = V_w + V_d$  – объем смешанной воды.

Распад органических отходов обычно рассматривается как реакция первого порядка, т.е. скорость распада пропорциональна количеству отходов:

$$\frac{dL_t}{dt} = -kL, \quad (7.3)$$

где  $L_t$  – значение  $БПК$ , остающееся через время  $t$ , а  $k$  – коэффициент скорости  $БПК$  реакции, зависящий от различных параметров среды. Решение имеет вид:

$$L_t = L_0 \cdot e^{-kt}, \quad (7.4)$$

где  $L_0$  – предельное значение  $БПК$ , необходимое микроорганизмам полное количество кислорода для окисления органических отходов (см. рис.7.1). Тогда можно записать:

$$L_0 = БПК_t + L_t, \quad (7.5)$$

а также легко получить

$$БПК_t = L_0(1 - e^{-kt}). \quad (7.6)$$

Таким образом, коэффициент  $k$  является индикатором скорости биоразложения загрязнителей.

Другой опасностью для водоемов планеты является тепловое загрязнение, вызванное сбросом нагретой воды в результате производственной деятельности человечества. Коэффициент скорости реакции в зависимости от температуры  $T(^{\circ}\text{C})$  можно описать следующим выражением:

$$k = k_{20} \cdot \theta^{(T-20)}, \quad (7.7)$$

где  $k_{20}$  — скорость реакции при комнатной температуре  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а  $\theta \approx 1,047$ .

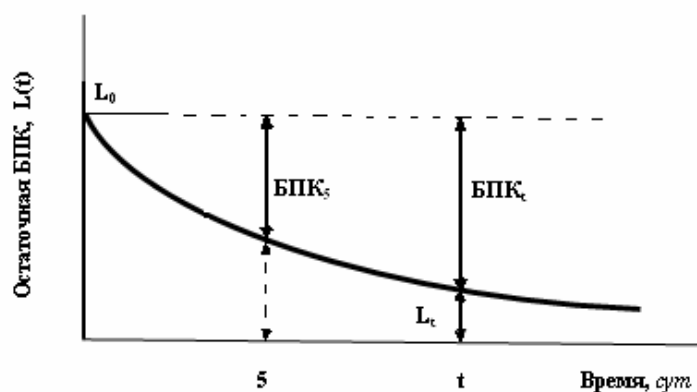


Рис 7.1. Остаточная биологическая потребность кислорода  $БПК$  как функция времени

Проблема полной очистки производственных стоков от растворенных в воде органических веществ, например, фенолов, ввиду их относительно хорошей растворимости в воде, является одной из труднорешаемых. В частности, это связано с большими экономическими и ресурсными затратами, а также с последующей утилизацией или захоронением отходов.

Для процессов естественной ассимиляции загрязнения требуется очень большое количество воды. Например, крупнейшая река Европы Волга может разбавить объем сбрасываемых в своем низовье сточных вод лишь в 350 раз.

Существуют требования к органолептическим свойствам воды (запах, привкус, цветность, мутность) и по радиационной безопасности для питьевой воды: общая объемная активность для  $\alpha$ -излучателей — 0,1 Бк/л и для  $\beta$ -излучателей — 1,0 Бк/л.

Естественная радиоактивность вод Мирового океана в основном обусловлена радиоактивным изотопом калия ( $^{40}\text{K}$ ). Количество радия в поверхностных водах океана составляет около  $0,4 \cdot 10^{-10}\%$ . Вода природных источников содержит урана от  $5 \cdot 10^{-7}$  до  $3 \cdot 10^{-5}$  г/л. Радиоактивность природной воды может достигать величины порядка нескольких единиц Бк/л. Например, только за счет природного трития в

воде ее радиоактивность составляет 0,12 Бк/л. Наибольшее количество радиоактивных веществ содержат туманы и морось.

**Задача 7.1.** Из цистерны, содержащей  $50 \text{ м}^3$  жидких отходов, отливают  $10 \text{ м}^3$ , а затем в цистерну вливают  $10 \text{ м}^3$  чистой воды. Перемешав все это, из нее отливают  $10 \text{ м}^3$  смеси, затем опять вливают  $10 \text{ м}^3$  воды. Повторяют процедуру еще раз. Сколько в цистерне после этого останется жидких отходов с исходной концентрацией?

**Задача 7.2.** Какой максимальный объем 12%-го раствора кислоты можно получить, смешивая по 1 л 5-, 10- и 15%-го раствора, в предположении, что плотность любого раствора постоянна и равна плотности воды?

**Задача 7.3.** Глобальное выпадение осадков по всей планете составляет, в среднем, 1 м воды в год. Количество энергии, требуемое для испарения 1 кг воды температурой  $17^\circ\text{C}$ , составляет 2460 кДж. Какая часть энергии, поступающей в среднем на поверхность Земли от Солнца ( $167 \text{ Вт/м}^2$ ), требуется для испарения всей выпавшей за год воды, если площадь земного шара равняется  $510 \cdot 10^6 \text{ км}^2$ ?

**Задача 7.4.** В результате вулканической деятельности образовалось  $300 \text{ м}^3$  сероводорода при нормальных условиях ( $\rho = 1,539 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$ ), который полностью растворился в соседнем пруду объемом  $5 \cdot 10^6 \text{ м}^3$ . Найти концентрацию сероводорода в воде и сравнить полученное значение с ПДК сероводорода, если для хозяйственных нужд оно равно 0,05 мг/л?

**Задача 7.5.** Пробу сточных вод объемом 10 мл разбавляют чистой водой до объема 300 мл, при этом содержание кислорода в воде составляет 9,0 мг/л. После 5 суток содержание кислорода снизилось до 3,0 мг/л. Определите БПК<sub>5</sub> для сточных вод. Какое минимальное значение БПК<sub>5</sub> можно определить для указанного разбавления, если разница между начальным и конечным измерениями  $C_K$  должна быть не менее 2,0 мг/л?

**Задача 7.6.** Вода, используемая для разбавления при 5-суточном испытании, имеет разницу между последовательными измерениями  $C_K$  1 мг/л. Пробу сточных вод объемом 15 мл разбавляют указанной водой до объема 300 мл. Спустя 5 суток содержание кислорода снижается с 9,0 мг/л до 2,0 мг/л. Чему равно значение БПК<sub>5</sub> для сточных вод?

**Задача 7.7.** Исследуемая сточная вода представляет собой смесь из 1 части сточных вод и 9 частей дистиллированной воды. При этом начальное содержание кислорода в момент смешивания составляет

9,0 мг/л, а БПК после 5 дней снизилось до 2,0 мг/л. Чему равняется БПК<sub>5</sub> для сточных вод?

**Задача 7.8.** Определить скорость биологической реакции, если для пробы сточных вод БПК<sub>5</sub>=120 мг/л, а предельное значение БПК есть  $L_0 = 180$  мг/л.

**Задача 7.9.** В разбавленной чистой водой пробе сточных вод содержание кислорода за 5 суток уменьшается с 9,0 до 3,0 мг/л. Фактор разбавления составляет  $P=0,030$ , а коэффициент скорости реакции  $k=0,22$  сут<sup>-1</sup>. Определите БПК<sub>5</sub> и  $L_0$  для сточных вод.

**Задача 7.10.** Водоочистительная станция сбрасывает сточные воды ( $1,1$  м<sup>3</sup>/с), имеющие предельное значение БПК=50,0 мг/л, в реку с мощностью потока  $8,7$  м<sup>3</sup>/с и БПК=6,0 мг/л. Коэффициент скорости биоразложения составляет  $k=0,20$  сут<sup>-1</sup>. Предполагая полное перемешивание двух потоков, определите предельное значение БПК в смешанном потоке в месте сброса. Если скорость воды в реке постоянна и равна  $0,30$  м/с, то каким будет остаточная БПК в реке в 30 км ниже по течению?

**Задача 7.11.** Пусть предельное значение БПК сточных вод равно 300 мг/л. При 20 °С БПК<sub>5</sub> составляет 200 мг/л при скорости реакции  $0,22$  сут<sup>-1</sup>. Чему будет равно значение БПК<sub>5</sub> сточных вод при температуре 25 °С?

**Задача 7.12.** Пусть сточные воды при 20 °С имеют БПК<sub>5</sub>=210 мг/л, а предельное значение БПК равно 350 мг/л. Определите значение БПК<sub>5</sub> при температуре 30 °С.

**Задача 7.13.** При хлорировании питьевой воды в ней образуется хлороформ, являющийся потенциальным канцерогеном. Допустим, что концентрация хлороформа составляет 70 мкг/л. Канцерогенный фактор опасности при постоянном потреблении воды равен  $6,1 \cdot 10^{-3} \left( \frac{\text{мг}}{\text{кг} \cdot \text{сут}} \right)^{-1}$ .

Считая, что вес взрослого человека 70 кг, а потребление воды составляет 2 л/сут, оцените вероятность заболевания раком человеком, постоянно употребляющим хлорированную воду.

**Задача 7.14.** В процессе длительного кипячения улетучиваются большие массы воды, и увеличивается доля тяжелой воды D<sub>2</sub>O, осаждаемой внизу чайника. Определите, сколько раз нужно кипятить воду в чайнике, чтобы увеличить концентрацию тяжелой воды в 2 раза, если чайник каждый раз выкипает наполовину. Мольная доля D<sub>2</sub>O в питьевой воде составляет 0,016%, а коэффициент разделения,

показывающий отношение концентраций  $D_2O$  в жидкой и газовой фазах, равен 1,03.

**Задача 7.15.** Изменим условие предыдущей задачи: будем каждый раз после выпаривания наполовину, добавлять в остатки старой кипяченой воды такое же количество свежей воды. Доказать, что при таких добавлениях не может быть получена концентрация тяжелой воды более 0,0162%.

**Задача 7.16.** Отношение числа атомов трития к протию  $T/H = 10^{-18}$  получило специальное название – тритиевая единица. Исходя из этого, определить содержание природного трития в Мировом океане.

*Биосфера представляет собой  
единственную систему,  
обеспечивающую устойчивость  
среды обитания...*  
Закон незаменимости биосферы

## 8. ЗАГРЯЗНЕНИЕ АТМОСФЕРЫ

Атмосферный воздух является жизненно важным компонентом окружающей природной среды, неотъемлемой частью среды обитания человека, растений и животных.

Загрязнение атмосферного воздуха – поступление в атмосферный воздух или образование в нем вредных (загрязняющих) веществ в концентрациях, превышающих установленные государством гигиенические и экологические нормативы качества атмосферного воздуха.

Загрязнение воздушной среды обычно связывают либо с промышленными выбросами, либо с фотохимическим смогом. В первом случае в воздух выбрасывается большое количество оксидов серы, корпускулярных частиц и аэрозолей. Фотохимический смог обусловлен выбросами окиси углерода, оксидами азота и различными углеводородами, реагирующими друг с другом под действием ультрафиолетового излучения Солнца в воздухе. Кроме того, в последние годы привлекает большое внимание радиационно-опасный загрязнитель – газ радон.

Рост концентрации в атмосфере Земли парниковых газов ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ , ХФУ, водяной пар) и аэрозолей в результате деятельности человека продолжает изменять атмосферу таким образом, что это может неблагоприятно повлиять на климат. В 1997 г. был принят Киотский протокол, по которому большинство стран согласились снизить свои антропогенные выбросы парниковых газов, по меньшей мере, на 5% по сравнению с уровнями 1990 г. в период действия обязательств с 2008 г. по 2012 г.

Другой глобальной проблемой является разрушение озонового слоя атмосферы, вызывающее повышение на поверхности Земли интенсивности жесткого ультрафиолетового излучения. Озон – это газообразный компонент атмосферы, имеющий исключительно важное значение для поддержания радиационного баланса стратосферы (всего



около 10% озона находится в тропосфере). Был принят ряд международных документов, которые регулирует потребление и производство хлорфторуглеродных соединений (ХФУ), разрушающих озоновый слой.

Атмосфера Земли состоит из газов и содержит различные примеси (пыль, капли воды, кристаллы льда, морские соли, продукты горения). Состав атмосферы Земли приведен в табл.8.1.

Таблица 8.1

**Состав атмосферы Земли**  
(общая масса  $5,1 \cdot 10^{18}$  кг)

Газ	Содержание, %		Плотность по отношению к воздуху
	по объему	по массе	
Азот	78,08	75,50	0,967
Кислород	20,95	23,15	1,105
Аргон	0,93	1,29	1,379
Углекислый газ	0,036	0,046	1,529
.....	.....	.....	.....
Метан	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-5}$	0,556
Закись азота	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-5}$	1,527
Озон	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$	-
тропосфера	$1,25 \cdot 10^{-5}$	$6,5 \cdot 10^{-5}$	-
стратосфера			
.....	.....	.....	.....
ХФУ ( $\text{CFCl}_3$ и $\text{CF}_2\text{Cl}_2$ ),	$2,68 \cdot 10^{-8}$	-	-

Газовый состав атмосферы по основным компонентам – азоту и кислороду – сохраняется постоянным, в то время как содержание других газов может изменяться в широких пределах. Считается, что для предотвращения катастрофических изменений климата объемную концентрацию  $\text{CO}_2$  в атмосфере необходимо поддерживать на уровне ниже  $4,5 \cdot 10^{-4}$ .

В целях наблюдения за загрязнением организован мониторинг атмосферного воздуха, т.е. система наблюдений за состоянием и происходящими в нем природными явлениями.

Для оценки качества воздуха в помещении часто используют простую однокамерную модель, схематически показанную на рис.1.1, и формулу баланса массы (1.2), которая раскрывается в уравнении (1.7). Добавив в это уравнение  $C_0 \cdot I \cdot V$  – скорость проникновения в виде, аналогичном скорости вывода, где  $I$  – скорость воздухообмена, придем к следующему уравнению:

$$V \frac{dC}{dt} = S + C_0 \cdot I \cdot V - C \cdot I \cdot V - k \cdot C \cdot V . \quad (8.1)$$

Решение этого уравнения для стационарного случая примет вид:

$$C_{\infty} = \frac{S/V + C_0 \cdot I}{I + k} . \quad (8.2)$$

Такие загрязнители воздуха, как  $CO$  и  $N_2O$  могут считаться консервативными ( $k = 0$ ). Если начальная концентрация в помещении  $C(0) = 0$  и  $C_0 = 0$ , то нестационарное решение будет:

$$C(t) = \frac{S}{I \cdot V} (1 - e^{-I \cdot t}) . \quad (8.3)$$

**Задача 8.1.** Концентрация углекислого газа в атмосфере в 1965 г. составляла 320 ед/млн, а в 1990 г. – 355 ед/млн. Какова была скорость роста концентрации  $CO_2$  в атмосфере, если предположить ее экспоненциальное изменение? В каком году концентрация  $CO_2$  в атмосфере удвоится по сравнению с 1965 г.?

**Задача 8.2.** Предположим, что энергетические потребности на душу населения увеличиваются на 1,5% каждый год, выбросы углерода при сгорании ископаемого топлива на единицу энергии растут на 1% каждый год, а численность населения мира растет на 1,5% в год. Как скоро выбросы углерода удвоятся по сравнению с текущим моментом?

**Задача 8.3.** Исходя из условий задачи 8.2, предположим, что начальная скорость выбросов углерода составляет  $5 \cdot 10^9$  т/год, а сейчас в атмосфере находится  $7 \cdot 10^{11}$  т углерода. Если половина испускаемого углерода остается в атмосфере, а другая половина поглощается другими

составляющими биосферы, сколько времени потребуется, чтобы содержание углерода в атмосфере удвоилось?

**Задача 8.4.** Пусть кратковременное допустимое содержание двуокиси азота в воздухе равняется  $470 \text{ мкг/м}^3$  при температуре  $25^\circ\text{C}$  и нормальном давлении 1 атм. Выразите эту концентрацию в ед/млн.

**Задача 8.5.** Допустимое содержание двуокиси углерода в помещении при температуре  $25^\circ\text{C}$  и давлении 1 атм составляет 5000 ед/млн. Выразите эту концентрацию в  $\text{г/м}^3$ .

**Задача 8.6.** В помещении объемом  $46 \text{ м}^3$  установлен керосиновый нагреватель, являющийся источником оксида углерода CO. После двух часов работы концентрация CO достигла  $10 \text{ мг/м}^3$ . Рассматривая оксид углерода как консервативный загрязнитель и принимая скорость воздухообмена равной  $0,25 \text{ ч}^{-1}$ , определите мощность эмиссии CO нагревателем. Считая, что нагреватель работает круглые сутки, найдите стационарную концентрацию оксида углерода в помещении и сравните ее с допустимым значением  $10 \text{ мг/м}^3$ .

**Задача 8.7.** Представим воздушное пространство над промышленным городом в виде прямоугольной камерной модели со сторонами 4 км и высотой 1 км. Мощность потока поступающего в камеру загрязнителя  $\text{SO}_2$   $10 \text{ кг/с}$ . Чистый воздух поступает в камеру с ветром, дующим вдоль одной из сторон со скоростью 5 м/с. Рассматривая  $\text{SO}_2$  как консервативный загрязнитель, найдите его стационарную концентрацию в воздушном пространстве над городом. Сравните ее с допустимым значением  $80 \text{ мкг/м}^3$ .

**Задача 8.8.** Рассмотрим воздушное пространство над городом из предыдущей задачи. Предположим, что выбросы  $\text{SO}_2$  производятся только по рабочим дням и прекращаются в выходные. Оцените концентрацию двуокиси серы в понедельник, спустя час после начала выбросов.

**Задача 8.9.** Пусть имеется одноэтажное строение площадью 250 кв. м и высотой 2,6 м. Радон, образующийся в почве под строением по уравнению  ${}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^{222}_{86}\text{Rn}$ , просачивается внутрь с интенсивностью  $1,0 \text{ пКи/м}^2/\text{с}$ . Считая, что концентрация радона вне дома пренебрежимо мала, определите стационарную концентрацию радона в помещении, если скорость воздухообмена равна  $0,9 \text{ ч}^{-1}$ . Период полураспада радона равен 3,82 сут.

**Задача 8.10.** Оцените содержание углерода в атмосфере Земли для концентрации диоксида углерода равной 360 ед/млн. Принять массу воздуха равной  $5,1 \cdot 10^{18} \text{ кг}$  с плотностью  $1,29 \text{ кг/м}^3$ .

**Задача 8.11.** Во сколько раз увеличится содержание углерода в атмосфере при полном использовании земных запасов угля, нефти и газа, если оценка запасов дает значения 7100, 230 и 145 Гт соответственно. При сжигании органического топлива атмосферный компонент составляет 50%. Воспользоваться решением предыдущей задачи.

**Задача 8.12.** Если бы можно было извлечь весь озон, находящийся в атмосфере, и сжать под нормальным давлением, то какой бы высоты вышел бы слой, покрывающий поверхность Земли? Сравните со всей сжатой под нормальным давлением атмосферой.

**Задача 8.13.** Глобальное изменение климата на Земле связывают с падением астероида в океан и последующим нагревом воды Мирового океана и ее выпариванием. Определите радиус астероида, если его скорость вхождения составила 10000 км/ч, а плотность – 7,8 г/см<sup>3</sup>.

**Задача 8.14.** Определить количество загрязняющей атмосферу двуокиси серы SO<sub>2</sub>, образующейся при сжигании 1 т низкокачественного угля с содержанием серы 3% по массе.

**Задача 8.15.** Найти количество радона  $N_{Rn}$ , образовавшегося за время  $t$ , если количество радия  $N_{Ra}$  остается постоянным.

## 9. СПРАВОЧНЫЙ МАТЕРИАЛ

Таблица 9.1

### Основные и некоторые производные единицы СИ

Величина	Единица	
	Наименование	Обозначение
<i>Основные единицы</i>		
Длина	метр	м
Масса	килограмм	кг
Время	секунда	с
Сила электрического тока	ампер	А
Температура	кельвин	К
Количество вещества	моль	моль
Сила света	кандела	кд
<i>Дополнительные единицы СИ</i>		
Плоский угол	радиан	рад
Телесный угол	стерадиан	ср
<i>Производные единицы</i>		
Площадь	квадратный метр	м <sup>2</sup>
Объем	кубический метр	м <sup>3</sup>
Плотность	килограмм на куб. метр	кг/м <sup>3</sup>
Энергия, работа, теплота	джоуль	Дж
Электрический заряд	кулон	Кл
Удельное количество теплоты	джоуль на килограмм	Дж/кг
Энтропия	джоуль на кельвин	Дж/К
Поток энергии, мощность	ватт	Вт
Интенсивность излучения	ватт на кв. метр	Вт/м <sup>2</sup>
Активность радионуклида	беккерель	Бк
Удельная активность	беккерель на килограмм	Бк/кг
Объемная активность	беккерель на куб. метр	Бк/м <sup>3</sup>
Поглощенная доза	грей	Гр
Эквивалентная доза	зиверт	Зв
Коллективная доза	человеко-зиверт	чел.-Зв

Таблица 9.2

**Внесистемные единицы и соотношения с единицами СИ**

Внесистемная единица		Соотношения с единицами СИ
Наименование	Обозначение	
ангстрем	Å	$1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ м}$
атмосфера	атм	$1 \text{ атм} = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}$
тонна	т	$1 \text{ т} = 10^3 \text{ кг}$
литр	л	$1 \text{ л} = 1 \text{ дм}^3$
гектар	га	$1 \text{ га} = 10^4 \text{ м}^2$
год	год	$1 \text{ год} = 3,1536 \cdot 10^7 \text{ с}$
герц	Гц	$1 \text{ Гц} = 1 \text{ с}^{-1}$
электрон-вольт	эВ	$1 \text{ эВ} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$
эрг	эрг	$1 \text{ эрг} = 1,0 \cdot 10^{-7} \text{ Дж}$
калория	кал	$1 \text{ кал} = 4,1868 \text{ Дж}$
кюри	Ки	$1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$
рентген	Р	$1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$
рад	рад	$1 \text{ рад} = 0,01 \text{ Гр}$
бэр	бэр	$1 \text{ бэр} = 0,01 \text{ Зв}$
барн	б	$1 \text{ б} = 10^{-28} \text{ м}^2$
градус Цельсия	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C} = \text{K} - 273$

Таблица 9.3

**Множители и приставки десятичных кратных и дольных единиц**

Множи- тель	Приставка	Обозна- чение	Множи- тель	Пристав- ка	Обозна- чение
$10^{18}$	экса	Э	$10^{-1}$	деци	д
$10^{15}$	пета	П	$10^{-2}$	санتي	с
$10^{12}$	тера	Т	$10^{-3}$	милли	м
$10^9$	гига	Г	$10^{-6}$	микро	мк
$10^6$	мега	М	$10^{-9}$	нано	н
$10^3$	кило	к	$10^{-12}$	пико	п
$10^2$	гекто	г	$10^{-15}$	фемто	ф
$10^1$	дека	да	$10^{-18}$	атто	а

**Физические постоянные**

Скорость света в вакууме, м/с	$2,998 \cdot 10^8$
Постоянная Планка, Дж·с	$6,626 \cdot 10^{-34}$
Заряд электрона, Кл	$1,602 \cdot 10^{-19}$
Масса покоя электрона, кг	$9,11 \cdot 10^{-31}$
Число Авогадро, моль <sup>-1</sup>	$6,023 \cdot 10^{23}$
Объем моля идеального газа, м <sup>3</sup> /моль	$2,24 \cdot 10^{-2}$
Постоянная Стефана – Больцмана, Вт/(м <sup>2</sup> ·К <sup>4</sup> )	$5,67 \cdot 10^{-8}$
Постоянная Вина, м·К	$2,90 \cdot 10^{-3}$
Плотность воды, кг/м <sup>3</sup>	1000
Плотность льда, кг/м <sup>3</sup>	910
Плотность воздуха, кг/м <sup>3</sup>	1,29
Теплоемкость воды, кДж/(кг·К)	4,18
Теплоемкость льда, кДж/(кг·К)	2,10
Удельная теплота испарения воды, кДж/кг	2260
Коэффициент объемного расширения воды, К <sup>-1</sup>	$1,5 \cdot 10^{-4}$
Радиус земного шара, м	$6,4 \cdot 10^6$
Площадь земного шара, м <sup>2</sup>	$5,1 \cdot 10^{14}$
Масса воды Мирового океана, кг	$1,38 \cdot 10^{21}$
Масса атмосферы Земли, кг	$5,1 \cdot 10^{18}$
Солнечная постоянная, Вт/м <sup>2</sup>	1367
Радиус Солнца, м	$7,0 \cdot 10^8$
Масса Солнца, кг	$2,0 \cdot 10^{30}$

Таблица 9.5

**Распределение массы различных сред на Земле**

Среда	Масса, т
Биомасса	$2,4232 \cdot 10^{12}$
Атмосфера	$5,1 \cdot 10^{15}$
Гидросфера	$1,5 \cdot 10^{18}$
Земная кора	$2,8 \cdot 10^{19}$

Таблица 9.6

**Биомасса организмов Земли**

Экосистема	Организмы	Масса, $\times 10^{12}$ т	Вклад, %
Континенты	Зеленые растения	2,4000	99,2
	Животные и микроорганизмы	0,0200	0,8
	Итого:	2,4200	100
Океаны	Зеленые растения	0,0002	6,3
	Животные и микроорганизмы	0,0030	93,7
	Итого:	0,0032	100
Всего:		2,4232	



Таблица 9.7

Таблица экспоненциальной функции

x	exp(-x)	x	exp(-x)	x	exp(-x)
0	1,0	0,9	0,41	5,5	0,0041
0,01	0,99	1,0	0,37	6,0	0,0025
0,1	0,90	1,5	0,22	6,5	0,0015
0,2	0,82	2,0	0,14	7,0	$9,1 \cdot 10^{-4}$
0,3	0,74	2,5	0,082	7,5	$5,5 \cdot 10^{-4}$
0,4	0,67	3,0	0,050	8,0	$3,4 \cdot 10^{-4}$
0,5	0,61	3,5	0,030	8,5	$2,0 \cdot 10^{-4}$
0,6	0,55	4,0	0,018	9,0	$1,2 \cdot 10^{-4}$
0,7	0,50	4,5	0,011	9,5	$7,5 \cdot 10^{-5}$
0,8	0,45	5,0	0,0067	10,0	$4,5 \cdot 10^{-5}$

## 10. ОТВЕТЫ К ЗАДАЧАМ

### Глава 1

1.1	13,5 г/м <sup>3</sup>	1.2	$1,26 \cdot 10^{-5} \%$
1.3	26,7 мг/л	1.4	0,333
1.5	3,5 мг/л	1.6	$8,64 \cdot 10^4 \text{ м}^3$
1.7	6,67 мг/л	1.8	0,0585 мг/м <sup>3</sup>
1.9	0,0532 мг/м <sup>3</sup>	1.11	2,1 мг/л; 1,8 мг/л
1.12	0,36 мг/м <sup>3</sup>	1.13	999 л/ч; 61,5 л/ч
1.14	2,78 ч		

### Глава 2

2.1	641 тыс. т	2.2	9,3 сут
2.3	42,3 кДж	2.4	$B \cdot \rho \cdot S \cdot \alpha \cdot \Delta t / (2 \cdot \sqrt{t})$
2.5	0,91 м; 64 м	2.6	16,1 сут
2.7	2130 кВт·ч/год; 4430 руб/год	2.8	$2 \cdot 10^{17}$ Вт; 10,1 мкм
2.9	6038 К; $1,23 \cdot 10^{11}$ лет	2.10	40,6 м <sup>3</sup> /с; 24,1 °С
2.11	12,9 °С	2.12	Больше в 84 раза
2.13	$3,65 \cdot 10^{-8} \%$ ; $1,56 \cdot 10^{-19}$ кал	2.14	$10,1 \pm 0,08$ мкм
2.15	0,4 мкм	2.16	0,258 мкм
2.17	60 °С		

### Глава 3

3.1	$6,4 \cdot 10^{10}$ туг	3.2	1,3%
3.3	68,8 года	3.4	98 кг.
3.5	29,8 лет	3.6	93,5 года; 152 года
3.7	250 лет	3.8	$7,8 \cdot 10^7$ т.
3.9	4,7 сут	3.10	2,41 кг/(м <sup>2</sup> ·год); 0,93 т/га
3.11	5500 лет	3.12	8 лет
3.13	680	3.14	43 м <sup>2</sup>

Глава 4			
4.1	0,0106 год <sup>-1</sup> ; 65,4 года	4.2	1,1 ч <sup>-1</sup> ; 0,63 ч
4.3	14,3 года; 107,2 года		
4.5	$\frac{r_0 \cdot K^2}{4 \cdot (K - N_0)}$	4.6	700 год <sup>-1</sup>
4.7	1,1%; 11 тысяч	4.8	31%; 33 года
4.9	5,0 – 2,5 – 1,5 млн; 5,0 – 5,0 – 2,5 млн; 5,0 – 5,0 – 5,0 млн	4.10	3,0 – 3,0 – 2,0 млн; 3,0 – 3,0 – 3,0 млн; 3,0 – 3,0 – 3,0 млн
4.11	1,02 млрд чел; 7,69 млрд чел		

Глава 5	
5.1	3T <sub>1/2</sub> ; 63%; 86,5%
5.3	1,92·10 <sup>8</sup>
5.5	3,6%
5.7	9,52
5.9	250 суток
5.11	49,4 ч <sup>-1</sup> ·см <sup>-3</sup>
5.13	0,87 Бк/г
5.15	75 год <sup>-1</sup>
5.17	0,23%
5.2	707; 10 <sup>-3</sup>
5.4	3,56 мГр
5.6	33,3%
5.8	2950 лет
5.10	0,14 фотон/(г·мин)
5.12	6,2·10 <sup>16</sup> л <sup>-1</sup>
5.14	200 мкГр
5.16	2,5·10 <sup>-3</sup>

Глава 6			
6.1	1,0 Вт	6.2	0,96 МВт
6.3	Больше в 3,4 млн раз	6.4	$3,26 \cdot 10^5$ кг/год
6.5	62%; 6,7%	6.6	1,4 г; 0,14 г; 85%; 99,5%
6.7	77%.	6.8	$190 \text{ км}^2$
6.9	$3,6 \text{ м}^2$	6.10	$1,08 \cdot 10^{19}$ Дж; 560 млн т/год
6.11	$1,38 \text{ г/м}^3$ ; 77%	6.12	1,0 г/с
6.13	$10^{10}$ лет		

## Глава 7

7.1	25,6 м <sup>3</sup>	7.2	2,14 л
7.3	0,47	7.4	0,092 мг/л
7.5	180 мг/л; 60 мг/л	7.6	121 мг/л
7.7	70 мг/л	7.8	0,22 сут <sup>-1</sup>
7.9	200 мг/л; 300 мг/л	7.10	10,9 мг/л; 8,7 мг/л
7.11	225 мг/л	7.12	268 мг/л
7.13	1,22·10 <sup>-5</sup>	7.14	47 раз
7.16	170 кг		

## Глава 8

8.1	0,42%; 2130 год	8.2	17,3 года
8.3	62,5 года	8.4	0,25 ед/млн.
8.5	9,0 г/м <sup>3</sup>	8.6	292 мг/ч; 15,9 мг/м <sup>3</sup>
8.7	0,50 мг/м <sup>3</sup>	8.8	0,49мг/м <sup>3</sup>
8.9	1,5 нКи/м <sup>3</sup>	8.10	762 Гт
8.11	5,9	8.12	3,3 мм; 7,7 км
8.13	242 км	8.14	60 кг

## **11. ВОПРОСЫ ПО КУРСУ «ОСНОВЫ ЭКОЛОГИИ И ОХРАНЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ»**

1. Экология – фундаментальная наука, ее значение для человеческой цивилизации.
2. Поиски концепции устойчивого развития. Экологическая обстановка современной России.
3. Глобальные экологические проблемы, их взаимосвязь и взаимозависимость.
4. Общие закономерности организации биосферы Земли. Биогеохимические принципы В.И. Вернадского. Эволюция биосферы.
5. Биосфера и ноосфера. Основные задачи охраны биосферы. «Римский клуб» и прогнозы развития цивилизации.
6. Причины рыночной и государственной неэффективности в охране окружающей среды. Экологическая доктрина Российской Федерации.
7. Понятие экосистемы. Состав и структура экосистем.
8. Основные принципы экологии: взаимосвязь и целостность; продуцирование и разложение; биологический контроль среды; гомеостаз.
9. Экологические факторы. Лимитирующие факторы и взаимодействие факторов. Закон толерантности. Законы Либиха, Шелфорда, обобщенная концепция лимитирующих факторов. Экологическая ниша.
10. Численность, возрастная структура, биотический потенциал и динамика популяций. Жизненные циклы. Логистическое уравнение. Регуляция роста популяций.
11. Демография человека. Демографический взрыв. Экологизация демографической политики.
12. Развитие экосистем. Сукцессия и климакс.
13. Термодинамика биосферы. Солнечная энергия – основа существования жизни на Земле. Энергетический баланс биосферы.
14. Трансформация энергии в биосфере. Закон Стефана – Больцмана.
15. Пути утилизации солнечной энергии в биосфере. Фотосинтез. Продуценты. Чистая и валовая первичная продукция, вторичная продукция
16. Закон сохранения вещества. Классификация круговоротов в экосистемах.

17. Консументы, редуценты. Пищевые цепи и трофические уровни. Трофическая структура и экологические пирамиды. Продуктивность суши и морей.
18. Моделирование сетей питания и экосистемы «хищник-жертва». Региональные и глобальные модели биосферных процессов.
19. Круговорот углерода. Диоксид углерода и «парниковый эффект». Прогнозы изменения климата и возможные последствия. Киотский протокол по ограничению выбросов парниковых газов в атмосферу.
20. Круговорот кислорода. Озоновая проблема. Образование и роль озона в различных слоях атмосферы. Причины и возможные последствия истощения озонового слоя.
21. Круговороты азота, серы и фосфора.
22. Круговорот воды. Водные экосистемы и их особенности. Типы природных вод и их основные характеристики.
23. Роль живых организмов в круговоротах веществ. Антропогенное воздействие на биогеохимические круговороты в биосфере.
24. Биогеохимическая роль микроэлементов. Микроэлементы как загрязнители природной среды. Тяжелые металлы, миграция элементов на земной поверхности.
25. Природные ресурсы и ограничения в их использовании. Возобновимые и невозобновимые ресурсы. Ресурсы воды, почв и дикой природы. Применение удобрений и пестицидов и загрязнение природной среды.
26. Пищевые ресурсы. Возможности человечества обеспечивать необходимый уровень потребления пищевых ресурсов. Энергетическая стоимость получения единицы с/х продукции.
27. Виды загрязнения. Критерии вредности загрязнения. Модели миграции загрязняющих веществ в окружающей среде.
28. Комплексный мониторинг окружающей среды. Методы контроля атмосферного воздуха, воды, почвы.
29. Санитарно-гигиеническое нормирование. Предельно допустимые концентрации и предельно допустимые сбросы.
30. Экологические принципы нормирования. Эффекты сочетанных воздействий комплекса загрязняющих веществ.
31. Социально-экономические проблемы природопользования. Критерии экологического ущерба. Понятия ОВОС и экологической экспертизы. Экологические риски.

32. Структура и развитие мировой энергетики. Энергетические ресурсы. Прогнозы энергопотребления. Энергетические перспективы России.
33. Традиционные виды энергии: нефть, природный газ, уголь, гидроэнергетика. Альтернативные источники получения энергии. Влияние энергетики на природную среду.
34. Ядерный топливный цикл и экологические проблемы, обращения с РАО. Переработка ОЯТ.
35. Нормы радиационной безопасности. Радиоактивное загрязнение окружающей среды.
36. Основные биологически значимые радионуклиды и пути их миграции в биосфере.
37. Пищевые цепи поступления радионуклидов в организм.
38. Экология АЭС. Радиационные и нерадиационные аспекты воздействия АЭС на окружающую среду. Сравнение уровней природного и техногенного фона.
39. Крупнейшие ядерные аварии и их последствия для окружающей среды. Реабилитация территорий, эффекты воздействия загрязнения на природные объекты.
40. Законодательство в области охраны природной среды. Экономические и правовые аспекты охраны окружающей среды.

## 12. СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Одум Ю. Экология в 2-х т. М.: Мир. 1986.
2. Реймерс Н.Д. Экология. М., 1994.
3. Миллер Т. Жизнь в окружающей среде в 3-х т. М.: Пангея. 1993.
4. Буторина М.В. и др. Инженерная экология и экологический менеджмент. М.: Логос. 2002.
5. Государственный доклад по экологической обстановке России (ежегодное издание).
6. Бабаев Н.С. и др. Ядерная энергетика, человек и окружающая среда. М.: Энергоатомиздат. 1984.
7. Сахаров В.К. Радиоэкология. СПб.: Изд-во «Лань». 2006.
8. Машкович В.П., Кудрявцева А.В. Защита от ионизирующих излучений: Справочник. М.: Энергоатомиздат. 1995.
9. Ионизирующее излучение. Радиационная безопасность. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99). Минздрав России, 1999 г.

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ Д.И.МЕНДЕЛЕЕВА

Период	Г Р У П П Ы Э Л Е М Е Н Т О В									
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII		
1	1,008 1 H водород						(H)		4,003 2 He гелий	
2	6,941 3 Li литий	9,012 4 Be бериллий	10,811 5 B бор	12,011 6 C углерод	14,007 7 N азот	15,999 8 O кислород	18,999 9 F фтор	20,180 10 Ne неон		
3	22,990 11 Na натрий	24,310 12 Mg магний	26,981 13 Al алюминий	28,086 14 Si кремний	30,974 15 P фосфор	32,065 16 S сера	35,453 17 Cl хлор	39,948 18 Ar аргон		
4	39,098 19 K калий	40,078 20 Ca кальций	44,956 21 Sc скандий	47,88 22 Ti титан	50,942 23 V ванадий	51,996 24 Cr хром	54,938 25 Mn марганец	58,933 26 Fe железо	58,71 27 Co кобальт	58,70 28 Ni никель
	85,468 37 Rb рубидий	87,62 38 Sr стронций	89,904 39 Y иттрий	91,224 40 Zr цирконий	92,906 41 Nb ниобий	95,94 42 Mo молибден	98,906 43 Tc технеций	101,07 44 Ru рутений	102,905 45 Rh родий	106,42 46 Pd палладий
5	107,868 47 Ag серебро	112,411 48 Cd кадмий	112,411 49 In индий	114,818 50 Sn олово	118,710 51 Sb сурьма	127,60 52 Te теллур	127,603 53 I йод	132,905 54 Xe ксенон		
	132,905 55 Cs цезий	137,327 56 Ba барий	137,327 57 La лантан	175,054 58 Ce церий	176,430 59 Pr прометий	176,430 60 Nd неодим	176,430 61 Pm прометий	176,430 62 Sm самарий	176,430 63 Eu европий	176,430 64 Gd гадолиний
6	173,054 59 Pr прометий	176,430 60 Nd неодим	176,430 61 Pm прометий	176,430 62 Sm самарий	176,430 63 Eu европий	176,430 64 Gd гадолиний	176,430 65 Tb тербий	176,430 66 Dy диurio	176,430 67 Ho гольмий	176,430 68 Er эрбий
	176,430 69 Tm тм	176,430 70 Yb ytterbium	176,430 71 Lu лютеций	176,430 72 Hf hafnium	176,430 73 Ta тантал	176,430 74 W вольфрам	176,430 75 Re рений	176,430 76 Os осмий	176,430 77 Ir иридий	176,430 78 Pt платина
7	223,028 87 Fr франций	223,028 88 Ra радий	223,028 89 Ac актиний	223,028 90 Th торий	223,028 91 Pa протактиний	223,028 92 U уран	223,028 93 Np нептуний	223,028 94 Pu плутоний	223,028 95 Am амерций	223,028 96 Cm курий
	223,028 97 Bk берклий	223,028 98 Cf калфорний	223,028 99 Es ейзенштейний	223,028 100 Fm фермий	223,028 101 Md мendelevium	223,028 102 No нобеллий	223,028 103 Lr лоуренсий	223,028 104 Rf рутерфордий	223,028 105 Db дубний	223,028 106 Sg сегундий

\* Л А Н Т А Н И Д Ы

\* А К Т И Н И Д Ы