

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, 2002, 40 с.

Настоящее учебное пособие содержит задачи по шести основным разделам курса, вопросы по курсу и необходимые методические материалы, позволяющие без привлечения дополнительной литературы решать представленные задачи.

С момента первого издания сборника в 1998 г. текст был значительно переработан и дополнен новыми разделами по радиоэкологии и проблемам энергетики. 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".

Рецензент С.З.Дунин

Рекомендовано редсоветом МИФИ в качестве учебного пособия.

- © Болятко В.В., Ксенофонтов А.И., 1998, 2002 г.
- © Московский инженерно-физический институт (государственный университет), 1998, 2002 г.

ISBN 5-7262-0451-4

## 1. БАЛАНС ВЕЩЕСТВ

В большинстве задач экологии интересующей величиной является концентрация вещества (загрязнителя) в воздухе или в воде. Концентрации могут быть заданы на основе весовых или объемных долей, либо их комбинаций, что может иногда приводить к затруднениям. Наиболее часто единицами измерения концентраций в воде являются мг/л или мкг/л. При загрязнении воздуха газовые концентрации выражают либо на основе объемных долей (ед/млн, %), либо в смешанных единицах (мг/м<sup>3</sup>, мкг/м<sup>3</sup>). Например, концентрация газообразного загрязнителя в ед/млн есть не что иное, как объем загрязнителя на миллион объемов воздушной смеси. При решении практических задач часто приходится производить перевод единиц концентраций.

Согласно закону сохранения массы при протекании химической реакции материя не возникает и не исчезает (при ядерной реакции возможно превращение массы в энергию). Эта концепция позволяет отслеживать вещество, в частности – загрязнитель, в разных объемах (воздушной или водной 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):

$$\begin{aligned} \left( \begin{array}{l} \text{скорость} \\ \text{проникновения} \end{array} \right) + \left( \begin{array}{l} \text{скорость} \\ \text{образования} \end{array} \right) = \\ = \left( \begin{array}{l} \text{скорость} \\ \text{вывода} \end{array} \right) + \left( \begin{array}{l} \text{скорость} \\ \text{распада} \end{array} \right) + \left( \begin{array}{l} \text{скорость} \\ \text{накопления} \end{array} \right). \end{aligned} \quad (1.1)$$

Если в самом объеме нет источника загрязнения, то в приведенном уравнении слагаемое «скорость образования» исчезает. Часто уравнение (1.1) 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 (1.1) 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 (1.1) переходит в следующее:

$$\left( \begin{array}{l} \text{скорость} \\ \text{проникновения} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{l} \text{скорость} \\ \text{вывода} \end{array} \right). \quad (1.2)$$

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:

$$C_S \cdot Q_S + C_W \cdot Q_W = C_m \cdot Q_m, \quad (1.3)$$

полагая при этом полное перемешивание загрязнителя в рассматриваемом объеме. Во многих случаях вещества претерпевают химические, ядерные или биологические реакции, являясь тем самым 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:

$$C = C_0 \cdot e^{-kt}, \quad (1.4)$$

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

$$\frac{d(CV)}{dt} = V \cdot dC/dt \text{ и согласно уравнению (1.1):}$$

$$\left( \begin{array}{l} \text{скорость} \\ \text{распада} \end{array} \right) = kCV. \quad (1.5)$$

В нестационарном случае, когда концентрация загрязнителя меняется во времени, в уравнении (1.1) слагаемое «скорость накопления» записывается в виде  $\frac{d(CV)}{dt}$  для равномерного распределения загрязнителя по объему, внутри которого масса равна  $CV$ , а уравнение примет вид:

$$S = Q \cdot C + kCV + \frac{d(CV)}{dt}, \quad (1.6)$$

где  $S$  – мощность источника загрязнения.

Уравнение (1.6) 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 (1.6) может быть представлено в следующем виде:

$$C(t) = [C_0 - C_\infty] \cdot \exp[-(k + \frac{Q}{V}) \cdot t] + C_\infty. \quad (1.7)$$

**Задача 1.1.** 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?

**Задача 1.2.** Измеренная экспресс-методом объемная концентрация окиси углерода в выхлопных газах автомобиля составляет 1,2%. Выразить эту концентрацию в  $\text{мг}/\text{м}^3$  при нормальном давлении и температуре  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Задача 1.3.** Измеренная концентрация диоксида серы в атмосферном воздухе составила  $330 \text{ мкг}/\text{м}^3$  при 1 атм. и температуре  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Превышает ли это значение допустимую объемную концентрацию  $\text{SO}_2$  в воздухе, равную  $1,4 \cdot 10^{-5}\%$ ?

**Задача 1.4.** Какой максимальный объем 12%-го раствора кислоты можно получить, смешивая по 1 л 5%-го, 10%-го и 15%-го растворов?

**Задача 1.5.** В текущий поток мощностью  $Q_S = 25 \text{ м}^3/\text{с}$ , вливается загрязненный приток мощностью  $Q_W = 5 \text{ м}^3/\text{с}$ . Концентрация загрязнителя в потоке  $C_S$  достигает  $20 \text{ мг}/\text{л}$ , а в притоке  $C_W = 60 \text{ мг}/\text{л}$ . Предполагая полное перемешивание двух потоков, найти концентрацию загрязнителя в смешанном потоке.

**Задача 1.6.** В реку с содержанием солей  $400 \text{ мг}/\text{л}$  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  $2 \text{ г}/\text{л}$ . 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  $500 \text{ мг}/\text{л}$ . Каково должно быть соотношение чистой и речной воды?

**Задача 1.7.** В водоем объемом  $V = 0,01 \text{ км}^3$  вливается поток мощностью  $5 \text{ м}^3/\text{с}$  и концентрацией загрязнителя  $10 \text{ мг}/\text{л}$ . 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  $100 \text{ мг}/\text{л}$ . Коэффициент скорости реакции  $k$  загрязнителя равен  $0,2 \text{ сут}^{-1}$ . Предполагая отсутствие испарения, найти стационарную концентрацию загрязнителя.

**Задача 1.8.** Нужно выкопать искусственный водоем, необходимый для сбора потока воды мощностью  $0,1 \text{ м}^3/\text{с}$  и концентрацией неконсервативного загрязнителя  $30 \text{ мг}/\text{л}$  при скорости реакции  $0,2 \text{ сут}^{-1}$ . Каким должен быть объем водоема, если на выходе из него концентрация загрязнителя равна  $10 \text{ мг}/\text{л}$ ?

**Задача 1.9.** Поток воды мощностью  $4 \text{ млн л}$  воды в сутки, содержащий химический загрязнитель концентрацией  $40 \text{ мг}/\text{л}$ , проходит через систему из двух последовательно расположенных водоемов. Объем первого водоема  $10 \text{ млн л}$ , второго –  $20 \text{ млн л}$ . Предполагая полное перемешивание и отсутствие испарения, определить концентрацию загрязнителя на выходе из второго водоема, если скорость распада равна  $0,4 \text{ сут}^{-1}$ .

**Задача 1.10.** Внутри бара объемом  $500 \text{ м}^3$  находятся 50 курительщиков, каждый из которых выкуривает две сигареты в час. Одна сигарета, помимо прочего, выпускает  $1,4 \text{ мг}$  формальдегида (НСНО). 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 1.11.** Бар из задачи 1.10 имеет объем  $500 \text{ м}^3$ . Потоки свежего воздуха, поступающего в помещение, 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 1.12.** Рассмотрим водоем объемом  $V = 0,01 \text{ км}^3$  из задачи 1.7. 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 1.13.** 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 1.14.** На поверхности металлических деталей, обрабатываемых в гальванической ванне, остаются натеки электролита, которые необходимо смывать. Концентрация металла в натечках 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 1.15.** 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  $N = 10 \text{ ед/м}^3$ . Сколько времени нужно, чтобы мышь поймала хотя бы одного комара?

**Задача 1.16.** 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  $5 \cdot 10^6 \text{ м}^3$ . Можно ли эту воду использовать для хозяйственных нужд, если ПДК сероводорода равна  $0,05 \text{ мг/л}$ ?

## 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 вещества массой  $m$  с изменением температуры  $\Delta T$  составляет  $\Delta U = m \cdot c \cdot \Delta T$ , где  $c$  – теплоемкость вещества (для воды она равна  $4,18 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$ ).

Когда вещество переходит в другую фазу, происходит изменение внутренней энергии без изменения температуры. Энергия, требуемая для фазового перехода из твердого вещества в жидкое, 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  $m' \cdot c \cdot \Delta T$ , где  $m'$  – 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 теплоты 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), расположенный перпендикулярно тепловому потоку, температуры (К)  $T_1$  и  $T_2$  – внешних поверхностей барьера,  $R$  – термическое сопротивление,  $\text{м}^2 \cdot \text{К} / \text{Вт}$ .

При переносе теплоты излучением, испускаемую энергию несут электромагнитные волны. Каждый объект испускает тепловое излучение. 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  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$  – постоянная Стефана–Больцмана,  $S$  – площадь поверхности излучателя,  $\text{м}^2$ ,  $T$  – температура, К. Длина волны, на которой спектр излучения достигает своего максимума, определяется с помощью закона смещения Вина:

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

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

Величина кванта энергии определяется соотношением Эйнштейна – Планка:

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

где  $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$  – постоянная Планка, а  $\nu$  – частота электромагнитного излучения.

Энергия и масса связаны следующим соотношением эквивалентности Эйнштейна:

$$E = mc^2. \quad (2.6)$$

**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  $\rho = 0,91 \text{ г} / \text{см}^3$ ) толщиной 1 см и температуры  $-10^\circ\text{C}$  на площади  $1 \text{ м}^2$ , а образовавшуюся воду испарить за счет энергии Солнца, если интенсивность на поверхности Земли составляет  $167 \text{ Вт} / \text{м}^2$ ? Альbedo поверхности льда принять равным 0,81, а потерями теплоты пренебречь. Для льда удельную теплоемкость принять равной  $2,1 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$ , а удельную теплоту плавления –  $3350 \text{ кДж} / \text{кг}$ . Для воды удельную теплоту парообразования принять равной  $2,26 \cdot 10^3 \text{ кДж} / \text{кг}$ .

**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  $c = 0,71 \text{ Дж} / (\text{г} \cdot \text{К})$ , а плотность  $\rho = 7,8 \text{ г} / \text{см}^3$ . Внешний и внутренний диаметры трубы равны 3,0 см и 2,4 см соответственно.

**Задача 2.4.** 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 ( $167 \text{ Вт} / \text{м}^2$ ) требуется для испарения всей выпавшей за год воды, если площадь земного шара равняется  $510 \cdot 10^6 \text{ км}^2$ ?

**Задача 2.5.** 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 2.6.** 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 ( $510$  млн  $\text{км}^2$ ), массой  $1,38 \cdot 10^{21}$  кг за счет термического 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 мощности льда 1720 м.

**Задача 2.7.** Открытый плавательный бассейн, температура воды в котором равна  $17\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 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 0,8 руб/кВт-ч. Владелец бассейна считает, что покупка покрытия стоимостью 3000 руб., уменьшающего испарение вдвое, окупится за один 15-недельный плавательный сезон. Соответствует ли это истине, если принять, что энергия, расходуемая на испарение воды, равна энергии, требуемой для нагрева доливаемой воды?

**Задача 2.8.** 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  $50\text{ м}^2\cdot\text{K}/\text{Вт}$  при температуре в квартире  $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Принимая во внимание, что отопительный сезон в Москве длится 7 мес. при средней температуре на улице  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а москвич решил обогреваться электричеством, которое стоит 0,8 руб/кВт-ч, подсчитать экономию электроэнергии и денег в год за счет дополнительной теплоизоляции.

**Задача 2.9.** Рассмотрим Землю как черное тело со средней температурой  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  и площадью поверхности 510 млн  $\text{км}^2$ . Найти мощность излучения Земли и длину волны, на которую приходится максимум излучаемой мощности.

**Задача 2.10.** Солнечный спектр имеет максимум при длине волны порядка 0,48 мкм. Если рассматривать Солнце как абсолютно черное тело, какова будет его эквивалентная температура? Оценить время, за которое его масса уменьшится на 1%. Масса Солнца  $2\cdot 10^{30}$  кг, его радиус  $7\cdot 10^8$  м.

**Задача 2.11.** 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  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Какой расход охлаждающей воды потребуются, если воду нельзя нагревать более чем на  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ?

Какова будет температура воды в реке после того, как в нее вольется нагретая вода из охлаждающего контура?

**Задача 2.12.** 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 2.13.** Сравнить энергию, требуемую для испарения 1 л воды температурой  $17\text{ }^{\circ}\text{C}$ , с энергией, требуемой для поднятия этого же литра в воздух на высоту 3 км.

**Задача 2.14.** Принимая теплоту сгорания чистого углерода равной  $94,4\text{ ккал}/\text{г-моль}$ , определите потерю в весе при сгорании одной грамм-молекулы углерода. Определите энергию, выделяющуюся при сгорании атома углерода.

**Задача 2.15.** 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 2.16.** 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  $300\text{ кДж}/\text{г-моль}$ .

**Задача 2.17.** 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.

### 3. ФУНКЦИИ РОСТА. ПОТРЕБНОСТЬ В РЕСУРСАХ

Наиболее часто используемой математической функцией, встречающейся в расчетах, связанных с экологическими проблемами, является 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):

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

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

$$2N_0 = N_0 \cdot e^{rT_2}, \quad \text{откуда} \quad T_2 = \frac{\ln 2}{r}. \quad (3.3)$$

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.

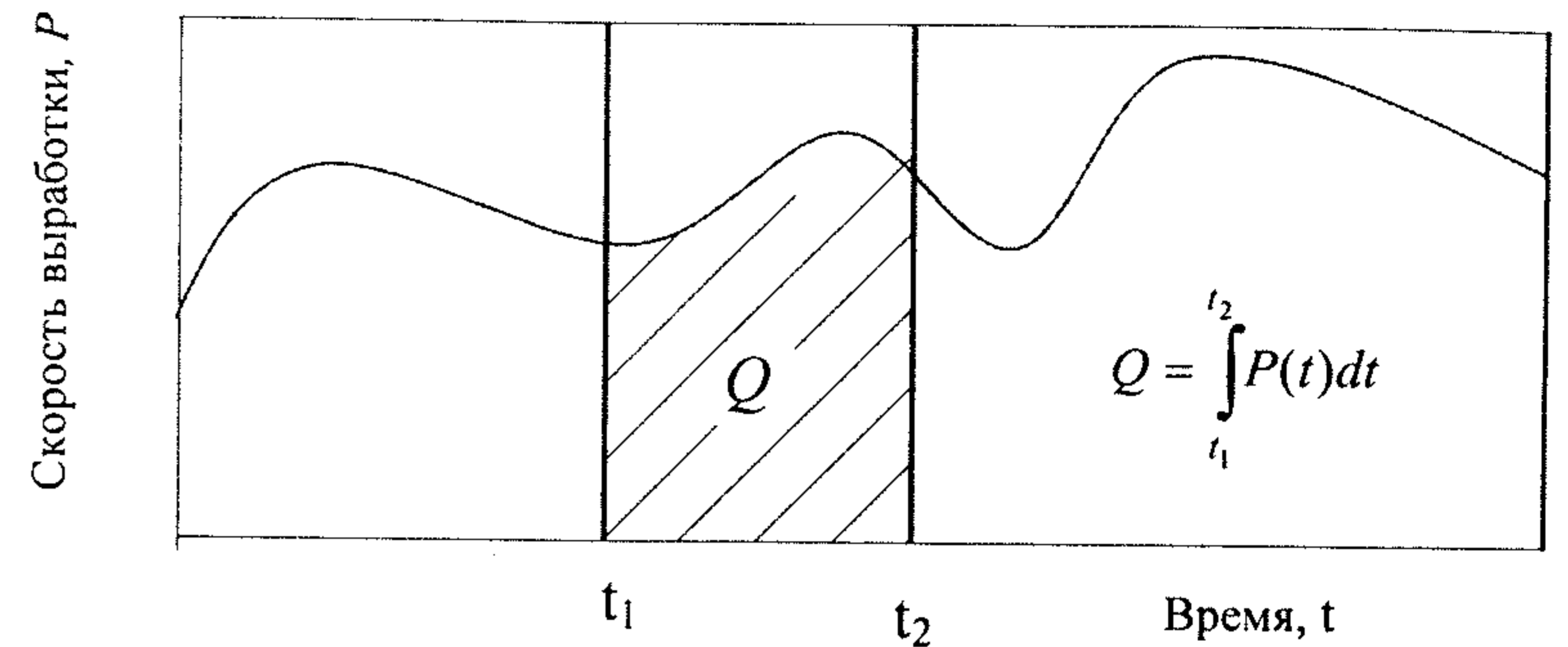


Рис.3.1. Скорость выработки в зависимости от времени: заштрихованная область – количество ресурсов, выработанных в период между  $t_1$  и  $t_2$

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

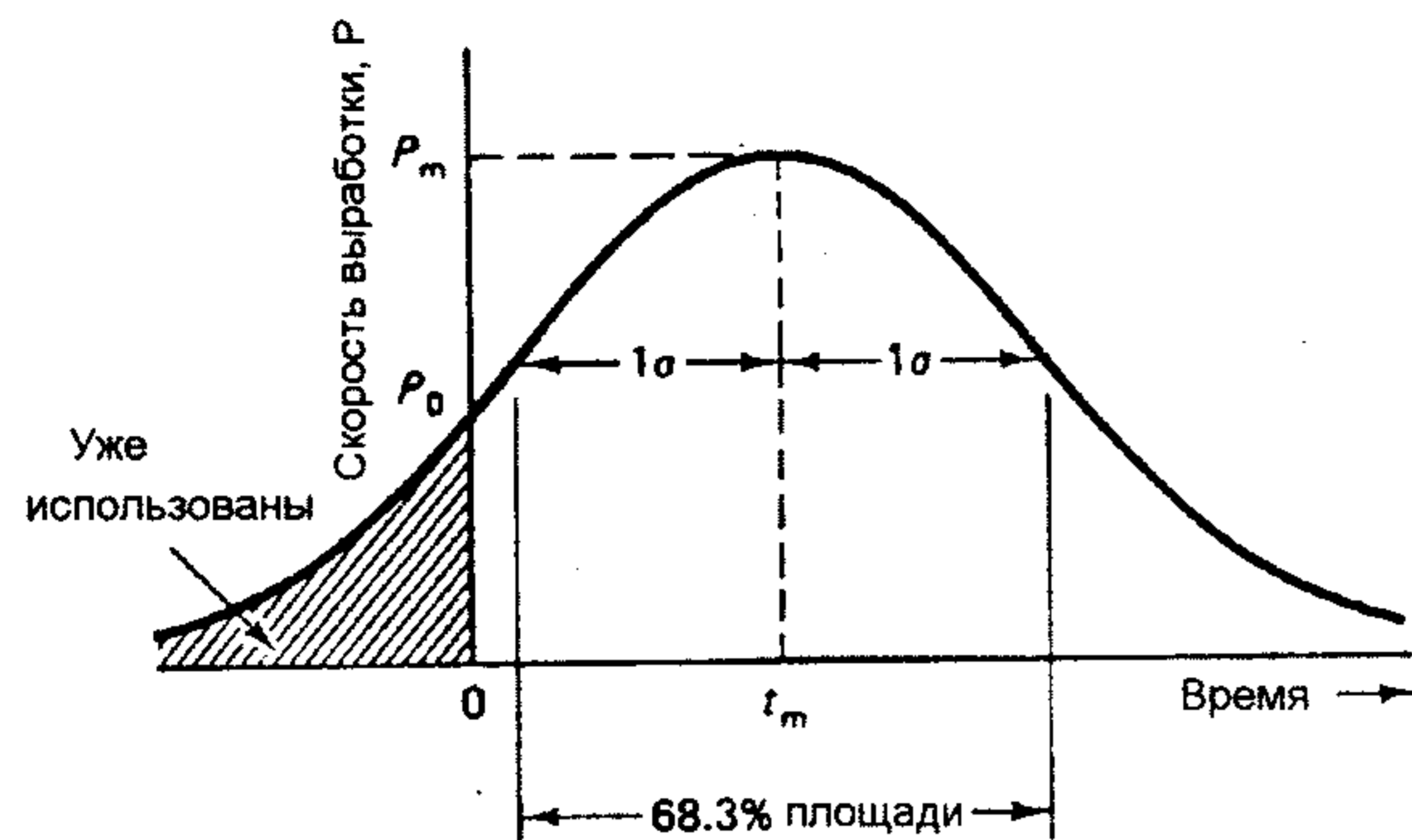


Рис.3.2. Выработка ресурсов в соответствии с гауссовской функцией

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  $Q_\infty$ :

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

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:

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

Ежегодно в процессе фотосинтеза на Земле образуется органическое вещество, согласно реакции фотосинтеза:



где в правой части уравнения в качестве вырабатываемой биомассы представлена молекула глюкозы.

**Задача 3.1.** Сколько тонн условного топлива калорийностью 7000 ккал/кг необходимо ежегодно для обеспечения всего населения (6 млрд чел) Земли 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 доллара ВНП, в последние годы уменьшается экспоненциально. Десять лет назад отношение (энергия/ВНП) составляло 25 МДж/\$, а в настоящее время – 20 МДж/\$. Какова полная скорость роста потребления энергии, если инфляцию доллара можно не учитывать?

**Задача 3.3.** 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 3.4.** Исходя из условий задачи 3.3, 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, то сколько времени потребуется, чтобы содержание углерода в атмосфере удвоилось?

**Задача 3.5.** 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 3.6.** В земной коре содержится около  $5 \cdot 10^{14}$  т 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  $^{235}\text{U}$  выделяет энергию, равную  $8,2 \cdot 10^{13}$  Дж?

**Задача 3.7.** 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 3.8.** По последним данным мировые резервы хрома составляют 800 млн т, при нынешних темпах 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 3.9.** Предположим, что выработка хрома описывается гауссовской кривой. Если функция выработки будет иметь максимум, в 6 раз превышающий текущую скорость потребления в 2 млн т в год, сколько времени потребуется, чтобы достичь максимума выработки? Общее количество ресурсов составляет 4 млрд т.

**Задача 3.10.** Концентрация углекислого газа в атмосфере в 1965 г. составляла 320 ед/млн, а в 1990 г. – 355 ед/млн. Какова скорость роста концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере, если предположить ее экспоненциальное изменение? В каком году концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере удвоится по сравнению с 1965 годом?

**Задача 3.11.** 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 3.12.** 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 составляют  $3 \cdot 10^{22}$  Дж. За сколько дней Солнце «доставит» на Землю такую запасенную энергию?

**Задача 3.13.** 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 3.14.** Найти время обращения атмосферного кислорода через биогенный цикл. Массу атмосферы Земли принять равной  $5,9 \cdot 10^{15}$  т, а доля кислорода по массе составляет 23,1%, ежегодная продуктивность биосферы –  $2,32 \cdot 10^{11}$  т.

**Задача 3.15.** 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.

#### 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. Часто прогнозы численности населения математически моделируются логистической кривой роста, показанной на рис.4.1.

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

$$\frac{dN}{dt} = r \cdot N \cdot \left(1 - \frac{N}{K}\right), \quad (4.1)$$

где  $N$  – размер популяции,  $r$  – скорость роста,  $K$  – потенциальная емкость экологической системы. Множитель  $(1 - N/K)$  часто называют сопротивлением окружающей среды. Решение уравнения (4.1) имеет вид:

$$N = \frac{K}{1 + e^{-r(t-t^*)}} \quad (4.2)$$

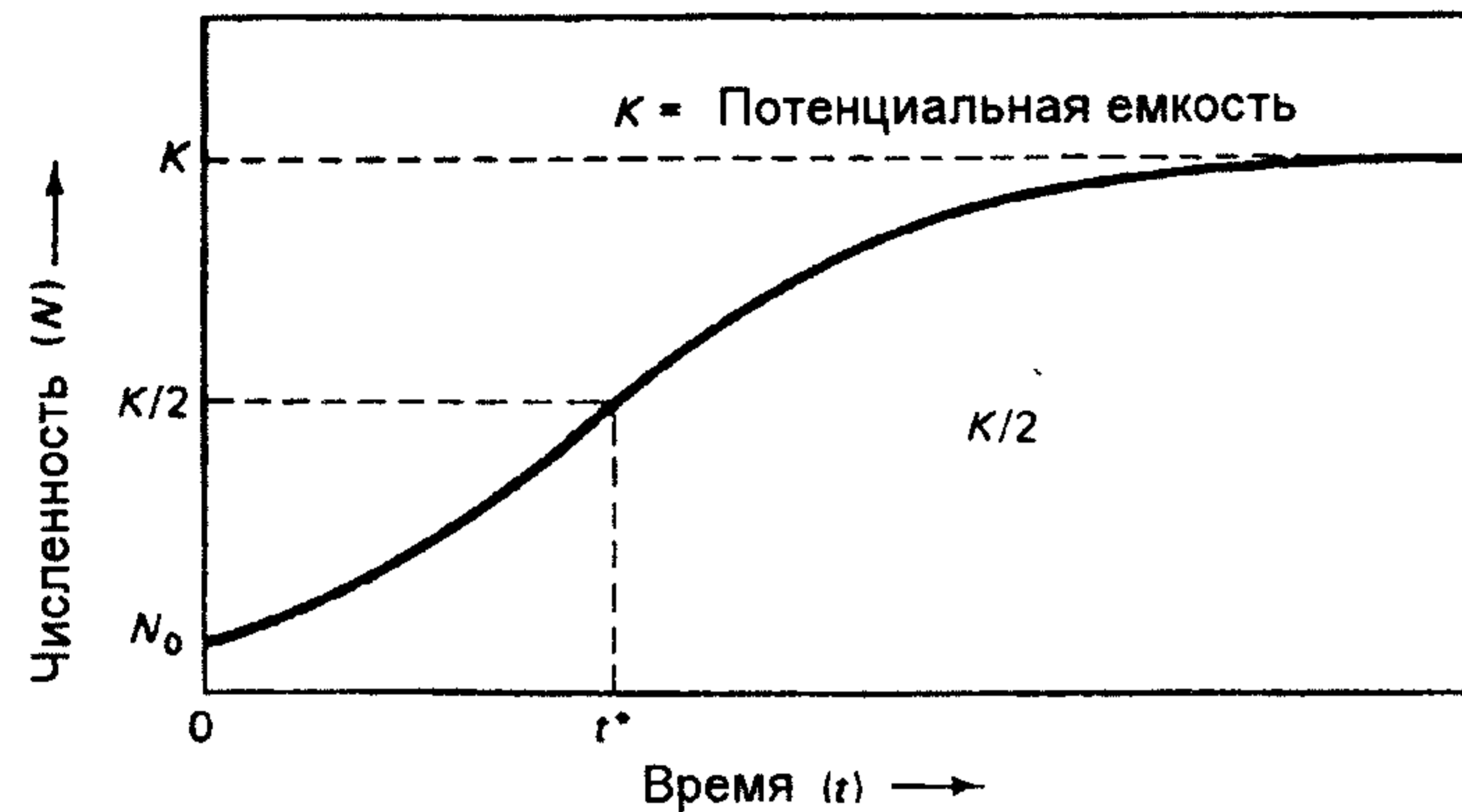


Рис.4.1. Логистическая кривая роста

Отметим, что  $t^*$  соответствует моменту времени, когда  $N = K/2$ . Подставляя  $t = 0$  в (4.2), получим выражение

$$t^* = \frac{1}{r} \ln\left(\frac{K}{N_0} - 1\right), \quad (4.3)$$

где  $N_0$  – численность популяции при  $t = 0$ . В решение (4.2) входит неизвестная скорость роста  $r$ , которую можно найти, если ввести мгновенную скорость роста  $r_0$ , в момент времени  $t = 0$ , т.е.:

$$\frac{dN}{dt}_{t=0} = r_0 \cdot N_0 \quad (4.4)$$

С другой стороны, это же значение можно найти из уравнения (4.1), а, следовательно, из равенства получим искомую скорость роста

$$r = \frac{r_0}{1 - N_0/K} \quad (4.5)$$

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 (4.2) 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 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 за данный год. Коэффициент полного прироста – это среднее количество рожденных живыми детей на одну женщину, 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 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 (4.1)).

**Задача 4.5.** Предположим, что популяция следует простой логистической кривой роста. Найти максимальную 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 максимальную 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 приходится 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 4.11 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.

## 5. РАДИОЭКОЛОГИЯ

Под активностью радионуклида в источнике понимается отношение числа  $dN$  спонтанных ядерных распадов, происходящих в данном 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 в с. внесистемной единицей активности является кюри: 1 Ки =  $3,7 \cdot 10^{10}$  Бк. Отношение активности радионуклида к массе, объему, площади называется удельной, объемной, поверхностной активностью радионуклида соответственно.

Изменение активности радионуклида выражается экспоненциальным законом радиоактивного распада:

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

где  $A_0$  и  $A(t)$  – активности радионуклида в начальный момент времени и по прошествии времени  $t$  соответственно.

Активность определяется как

$$A = \lambda \cdot N, \quad (5.3)$$

где  $N$  – число радиоактивных атомов, имеющих в источнике в данный момент времени;  $\lambda$  – постоянная распада,

характеризующая вероятность распада на один атом в единицу времени

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

В формулах (5.4)  $T_{1/2}$  – период полураспада, т.е. время, в течение которого распадается половина радиоактивных атомов нуклида;  $\tau$  – среднее время жизни радионуклида.

Между активностью  $A$  в 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  $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$  1/моль – 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 естественных радионуклидов с большими атомными номерами, записывается в виде:



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

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



где  $\nu$  – нейтрино.

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

4. Спонтанное деление.

При распаде некоторых радионуклидов часто образуется не один, а несколько дочерних нуклидов. 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

$$\lambda_0 \cdot N_0 = \lambda_1 \cdot N_1 = \lambda_2 \cdot N_2 \text{ и т.д.} \quad (5.8)$$

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. Единица поглощенной дозы в СИ называется грей: 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. Единицей измерения эквивалентной дозы в СИ является зиверт: 1 Зв = 1 Гр/К.

Эквивалентная доза, характеризующая меру ожидаемого эффекта облучения для одного индивидуума, является индивидуальной дозой. 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. Единица 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, получаемая многими поколениями от какого-либо радиоактивного источника за все время его существования.

Основную часть облучения организмы получают от естественных источников радиации, содержащихся в атмосфере, земной коре, воде и биоте. Среди космогенных радионуклидов наибольшую радиэкологическую 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 ряды урана  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  и тория  $^{232}\text{Th}$ . В табл.5.1 представлены периоды полураспадов некоторых радионуклидов.

Таблица 5.1

Периоды полураспадов некоторых радионуклидов.

Радионуклид	$T_{1/2}$ , год
$^3\text{H}$	12,3
$^{14}\text{C}$	5730
$^{40}\text{K}$	$1,28 \cdot 10^9$
$^{226}\text{Ra}$	1622
$^{232}\text{Th}$	$1,39 \cdot 10^{10}$
$^{235}\text{U}$	$7,13 \cdot 10^8$
$^{238}\text{U}$	$4,56 \cdot 10^9$
$^{239}\text{Pu}$	$2,40 \cdot 10^4$

**Задача 5.1.** Что продолжительнее – три периода полураспада или два средних времени жизни радионуклида? Какая часть (в %) 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 ежесекундно, 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  $1 \text{ см}^3$  воздуха. Чему равна поглощенная доза за год, вызывающая

такую ионизацию? Принять плотность воздуха на высоте 6100 м равной  $1,1 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$ . 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  $10^\circ\text{C}$  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.** Вычислить число  $\alpha$ -частиц, выходящих в воздух за 1 мин с  $1 \text{ м}^2$  поверхности озера, загрязненного  $\alpha$ -излучателем, если его концентрация в воде составляет 10 Бк/л и на каждый распад испускается одна  $\alpha$ -частица с энергией 4,2 МэВ. Пробег  $\alpha$ -частицы в веществе определяется по формуле:

$$R_\alpha = 1,78 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt[3]{M} \cdot E_0^{3/2} / \rho, \text{ см; где } \rho - \text{плотность вещества в } \text{г/см}^3,$$

$M$  – атомная масса,  $E_0$  – энергия  $\alpha$ -частицы в МэВ.

**Задача 5.12.** 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 5.13.** 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%, оказалась равной после прекращения прокачки 111 МБк?

**Задача 5.14.** 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 <sup>40</sup>К, массовое содержание которого в естественном калии 0,0119%.

**Задача 5.15.** Рассчитать поглощенную годовую дозу внутреннего облучения гонад естественным источником — радионуклидом <sup>40</sup>К с удельной активностью в гонадах  $8,4 \cdot 10^{-2}$  Бк/г. Эффективная поглощенная энергия равна 0,47 МэВ/расп.

**Задача 5.16.** 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 (население 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  $5,0 \cdot 10^{-2}$  Зв<sup>-1</sup>.

**Задача 5.17.** Для местных жителей, проживавших в районе Чернобыля, полученная доза оценивается в 0,05 Зв. Используя данные предыдущей задачи, оцените риск смерти от рака индивидуума, получившего при аварии такую дозу радиации.

## 6. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

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

Естественный уран содержит 99,28% <sup>238</sup>U, 0,72% <sup>235</sup>U и следы <sup>234</sup>U. Для получения ядерной энергии в реакторах на тепловых нейтронах используется изотоп <sup>235</sup>U. Хотя другие изотопы, например <sup>238</sup>U, делятся на быстрых нейтронах, их нельзя использовать в ядерном реакторе в качестве топлива.

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 грамм-молекулу, что эквивалентно нескольким электрон-вольтам энергии на один атом углерода.

При делении ядра в основном выделяется кинетическая энергия, переносимая осколками деления, а также частицами и квантами с энергиями до нескольких мегаэлектрон-вольт. Вся эта энергия в конце концов переходит в тепловую. При делении <sup>235</sup>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.

**Задача 6.1.** Подсчитать в ваттах мощность, 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 должна быть 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-час 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, равную 10 ккал/(м<sup>2</sup>·ч), оцените 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 г. 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 – 60% (мас), 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.** 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, если она получила при этом всего 8,5 мг  $^{226}\text{Ra}$ .

**Задача 6.13.** 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 ежесекундно превращать в другие формы энергии?

**Задача 6.14.** Возможным источником ядерной энергии в будущем станет тяжелый водород или 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.

## ОТВЕТЫ К ЗАДАЧАМ

		Глава 1	
1.1	25,6 м <sup>3</sup> .	1.2	13,5 г/м <sup>3</sup> .
1.3	Не превышает.	1.4	2,14 л.
1.5	26,7 мг/л.	1.6	0,333
1.7	3,5 мг/л.	1.8	8,64·10 <sup>4</sup> м <sup>3</sup> .
1.9	6,67 мг/л.	1.10	0,117 мг/м <sup>3</sup> .
1.11	0,106 мг/м <sup>3</sup> .	1.12	2,1 мг/л; 1,8 мг/л.
1.13	0,36 мг/м <sup>3</sup> .	1.14	9999 л/ч; 61,5 л/ч.
1.15	2,78 ч.	1.16	Нет.

		Глава 2	
2.1	641 тыс. т.	2.2	1 сутки.
2.3	42,3 кДж.	2.4	0,47
2.5	$B \cdot \rho \cdot S \cdot \alpha \cdot \Delta t / (2 \cdot \sqrt{t})$	2.6	0,91 м; 64 м.
2.7	Соответствует.	2.8	2130 кВт·ч/год; 1700 руб/год.
2.9	2·10 <sup>17</sup> Вт; 10,1 мкм.	2.10	6038 К; 1,23·10 <sup>11</sup> лет.
2.11	40,6 м <sup>3</sup> /с; 24,1 °С.	2.12	12,9 °С.
2.13	Больше в 84 раза.	2.14	3,65·10 <sup>-8</sup> %; 1,56·10 <sup>-19</sup> кал.
2.15	10,1 ± 0,08 мкм.	2.16	0,4 мкм.
2.17	0,258 мкм.		

		Глава 3	
3.1	6,4·10 <sup>10</sup> тун.	3.2	1,3%
3.3	17,3 года.	3.4	62,5 года.
3.5	68,8 года.	3.6	98 кг.
3.7	29,8 лет.	3.8	93,5 года; 152 года.
3.9	250 лет.	3.10	0,42%; 2130 лет.
3.11	7,8·10 <sup>7</sup> т.	3.12	4,7 сут.
3.13	2,41 кг/(м <sup>2</sup> ·год); 0,93 т/га.	3.14	5500 лет.
3.15	8 лет.		

		Глава 4	
4.1	0,012 год <sup>-1</sup> ; 57,8 года.	4.2	1,1 ч <sup>-1</sup> , 0,63 ч.
4.3	14,3 года; 107,2 года.	4.6	700 год <sup>-1</sup>
4.5	$\frac{r_0 \cdot K^2}{4 \cdot (K - N_0)}$	4.8	31%; 33 года.
4.7	1,1%; 11 тысяч.	4.10	3,0 – 3,0 – 2,0 млн; 3,0 – 3,0 – 3,0 млн; 3,0 – 3,0 – 3,0 млн.
4.9	5,0 – 2,5 – 1,5 млн; 5,0 – 5,0 – 2,5 млн; 5,0 – 5,0 – 5,0 млн.		

		Глава 5	
5.1	3T <sub>1/2</sub> ; 63%; 86,5%.	5.2	707; 10 <sup>-3</sup> .
5.3	1,92·10 <sup>8</sup> .	5.4	3,56 мгр.
5.5	3,6%.	5.6	33,3%.
5.7	9,52.	5.8	2950 лет.
5.9	250 суток.	5.10	0,14 фотон/(г·мин).
5.11	6 част/(м <sup>2</sup> ·мин).	5.12	49,4 ч <sup>-1</sup> ·см <sup>-3</sup> .
5.13	6,2·10 <sup>16</sup> л <sup>-1</sup> .	5.14	0,87 Бк/г.
5.15	200 мкгр.	5.16	75 год <sup>-1</sup>
5.17	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	3,26·10 <sup>5</sup> кг/год.
6.5	62%; 6,7%.	6.6	1,4 г; 0,14 г; 85%; 99,5%.
6.7	77%.	6.8	190 км <sup>2</sup> .
6.9	3,6 м <sup>2</sup> .	6.10	1,08·10 <sup>19</sup> Дж; 560 млн т/год.
6.11	1,38 г/м <sup>3</sup> ; 77%.	6.12	0,23%.
6.13	1,0 г.	6.14	10 <sup>10</sup> лет.



**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. Перспективные направления экологических исследований.
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.
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. Минеральные 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. Понятие ОВОС.
32. Структура и развитие мировой энергетики. Энергетические ресурсы. Прогнозы энергопотребления. Энергетические перспективы России.
33. Обычные источники энергии: нефть и природный газ, уголь. Альтернативные источники энергии. Влияние энергетики на природную среду.
34. Ядерный топливный цикл и экологические проблемы, РАО.
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. Экологическая экспертиза.

#### СПИСОК 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. Государственный доклад по экологической обстановке России (ежегодное издание).
5. Бабаев Н.С. и др. Ядерная энергетика, человек и окружающая среда. М.: Энергоатомиздат. 1984.
6. Машкович В.П., Кудрявцева А.В. Защита от ионизирующих излучений: Справочник. М.: Энергоатомиздат. 1995.

Виктор Викторович Болятко

Александр Иванович Ксенофонтов

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

Редактор Т.В.Волвенкова

Корректор И.Н. Маркина

ЛР №20676 от 09.12.97 г.

Подписано в печать 2.08.2002. Формат 60x84 1/16

Гарнитура Таймс. Печать офсетная.

Печ. л. 2,5. Уч.-изд. л. 2,5. Изд. № 036-1. Тираж 1000 экз. *Зак. 690*

Московский инженерно-физический институт  
(государственный университет).

Типография МИФИ.  
115409, Москва, Каширское шоссе, 31