

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Емельянов Сергей Геннадьевич

Должность: ректор

Дата подписания: 19.09.2024 10:00:18

Уникальный программный ключ:

9ba7d3e34c012eba476ffd2d064cf3781953be730df2374d16f3c0ce536f0fc6

## МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра уникальных зданий и сооружений



## СТРОИТЕЛЬНАЯ ФИЗИКА

Методические указания по выполнению практических работ по дисциплине: «Строительная физика» для студентов направления подготовки 08.05.01

Курск 2023

УДК 624.012.4; 721.021:004; 624.011

Составитель: Ю.И. Гладышкина

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент Колесников А.Г.

**Строительная физика:** методические указания по выполнению практических работ / Юго-Зап. гос. ун-т ; сост. Ю.И. Гладышкина - Курск, 2023. - 40 с.- Библиогр.: 40 с.

Содержат задания для выполнения практической работы, которые помогут лучшему пониманию и усвоению теоретического материала, и получению практических навыков в изучении строительной физики.

Методические указания соответствуют требованиям программы, утвержденной учебно-методическим объединением по направлению подготовки строительство уникальных зданий и сооружений.

Предназначены для студентов специальности 08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений» очной формы обучения.

Методические указания содержат описание практических заданий и правила оформления ее результатов

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 15.12.17. Формат 60x84 1/16.

Усл. печ. л. 2,3. Уч.-изд.л. 2,1. Тираж 100 экз. Заказ. Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет.

305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

## ВВЕДЕНИЕ

Строительная физика — прикладная область физики, рассматривающая физические явления и процессы в конструкциях зданий, связанные с переносом тепла, звука и света, а также явления и процессы в помещениях здания, связанные с распространением звука и света.

Основная задача строительной физики — обоснование применения в строительстве материалов и конструкций, выбора размеров и формы помещений, которые обеспечили бы оптимальные температурно-влажностные, акустические и светотехнические условия в помещениях соответственно их функциональному назначению.

Предмет изучения «Строительной физики» — вопросы теплопередачи, воздухопроницаемости и влажностного состояния конструкций, вопросы звукоизоляции, акустики и светотехники, рассматриваемые соответственно в разделах строительная теплотехника, строительная и архитектурная акустика, строительная светотехника.

Традиционно при проектировании ограждающих конструкций отдельно рассматривают вопросы теплозащиты и влажностный режим, вопросы звукоизоляции. Комплексный подход к проектированию позволяет избежать возникающие в процессе эксплуатации здания проблемы.

Ограждающие конструкции, архитектурно-планировочное решение здания должны обеспечивать комфортные условия микроклимата, световой режим помещений. При решении данных архитектурно-строительных задач не обойтись без учета влияния окружающей среды.

Обезвредить отрицательные факторы климата и использовать положительные позволяют сведения о климатических нормативах, которые являются предметом изучения строительной климатологии.

## СТРОИТЕЛЬНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА, ТЕПЛОТЕХНИКА

Строительная теплотехника (теплофизика) изучает процессы теплопередачи, воздухопроницаемости и влажностного режима ограждающих конструкций, разделяющих воздушные среды с отличающимися температурой, влажностью и скоростью перемещения воздуха.

Основная задача строительной теплофизики — обоснование рационального выбора ограждающих конструкций, удовлетворяющих требованиям обеспечения в помещениях благоприятного микроклимата для деятельности или отдыха человека.

Целями изучения данной темы являются:

- получение знаний о теплозащитных свойствах зданий и конструкций;
- получение знаний и навыков методов расчета ограждающих конструкций, обеспечивающих необходимую теплозащиту помещений.

### Основные формулы

1. Уравнение Фурье  $\Delta Q = \lambda \frac{\Delta T}{\delta} \Delta F \Delta \tau$ :

$$q_F = \frac{\Delta Q}{\Delta F \Delta \tau} = \frac{\Delta T}{\delta / \lambda} = \frac{\Delta T}{R_T};$$

2. Закон конвекции Ньютона:  $Q = \alpha(T - \theta) \Delta F \Delta \tau$ ;  $q_N = \alpha \cdot (T - \theta)$ .

3. Полное термическое сопротивление стены:

$$R_O = \frac{1}{\alpha_H} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_B} = R_H + R_T + R_B.$$

4. Закон Стефана-Больцмана:  $\Delta Q = a\sigma(T^4 - \theta^4) \Delta F \Delta \tau$ .

5. Температурная зависимость теплопроводности строительных материалов:

$$\lambda = \lambda_0(1 + bt).$$

6. Коэффициент температуропроводности:  $a = \frac{\lambda}{c\rho}$ .

7. Температура по толщине стены:  $t_x = t_B - \frac{t_B - t_H}{R_O} \left( \frac{1}{\alpha_B} + \frac{x}{\lambda} \right)$ .

8. Значение температуры наружного угла:  $t_y = t_B - \frac{t_B - t_H}{\frac{1}{\alpha_H} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_B}} \cdot \frac{1}{\alpha_{By}}$ ;

$$\alpha_{By} = \frac{\alpha_B}{3}.$$

9. Тепло выделяющееся (поглощающееся) при фазовых превращениях:  
 $Q = rm$ .

10. Количество теплоты при нагреве тела:  $\Delta Q = cm\Delta t$  .

11. Теплопроводность газов:  $\lambda = \frac{1}{3}\langle v \rangle \cdot l_0 \cdot \rho \cdot c_v^{yo}$ ;  $\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8}{\pi} \cdot \frac{R \cdot T}{\mu}}$ ;  $c_v^{yo} = \frac{i \cdot R}{2A_r}$ ,

где  $R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$ .

12. Формулы, связывающие температуры в этих четырех температурных шкалах, имеют вид:

$$1. \quad t^{\circ}C = T^{\circ}K - 273 = \frac{5}{9}(t^{\circ}F - 32) = \frac{4}{9}t^{\circ}R$$

$$2. \quad T^{\circ}K = t^{\circ}C + 273 = \frac{5}{9}t^{\circ}F + 255,22 = \frac{4}{9}t^{\circ}R + 273$$

$$3. \quad t^{\circ}F = \frac{9}{5}t^{\circ}C + 32 = \frac{9}{5}T^{\circ}K - 459,40 = \frac{9}{4}t^{\circ}R + 32$$

$$4. \quad t^{\circ}R = \frac{5}{4}t^{\circ}C = \frac{5}{4}T^{\circ}K - 341,25 = \frac{4}{9}t^{\circ}F - 14,22$$

### Образцы решения задач

1. Стена здания имеет толщину  $\delta = 0,65$  м. Коэффициент теплопроводности материала  $\lambda = 0,75 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ . Температура наружного воздуха  $t_H = -27^{\circ}\text{C}$ , а внутри помещения  $t_B = 23^{\circ}\text{C}$ . Термические сопротивления внешнего и внутреннего пристеночных слоев соответственно равны  $R_H = 0,04 \frac{\text{C} \cdot \text{м}^2}{\text{Вт}}$  и  $R_B = 0,10 \frac{\text{C} \cdot \text{м}^2}{\text{Вт}}$ . Найдите плотность теплового потока  $q$  через стену; температуру наружной  $t_{H,п}$  и внутренней  $t_{B,п}$  поверхностей стен; градиент температуры. Оцените толщину слоя стены (глубина зоны промерзания), в котором  $\text{H}_2\text{O}$  окажется в твердом состоянии.

**Кстати:** Как называется твердое состояние  $\text{H}_2\text{O}$  в зоне промерзания?

Дано:

$$\begin{aligned} \delta &= 0,65 \text{ м} \\ \lambda &= 0,75 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}, \\ t_H &= -27^{\circ}\text{C}, \end{aligned}$$

Решение:

$$\begin{aligned} \text{Из формул (п. 1, 2)} \quad q'_N &= \alpha_B(t_B - t_{B,п}), \\ q'_F &= \lambda \cdot \frac{t_{B,п} - t_{H,п}}{\delta}, \\ q''_N &= \alpha_H(t_{H,п} - t_H), \end{aligned}$$

$$t_B = 23^{\circ}C,$$

$\dot{q}_N = q_F = \dot{q}_N = q$ , т.к. тепло не идет вдоль стен,  $q_V = 0$ .

$$R_H = 0,10 \frac{^{\circ}C \cdot m^2}{Bm},$$

$$t_B - t_H = q \left( R_B + \frac{\delta}{\lambda} + R_H \right),$$

$$R_B = 0,04 \frac{^{\circ}C \cdot m^2}{Bm},$$

$$q = \frac{t_B - t_H}{R_B + \frac{\delta}{\lambda} + R_H},$$

$$q = \frac{23 - (-27)}{0,1 + \frac{0,65}{0,75} + 0,04} = \frac{50}{1,01} = 49,5 \frac{Дж}{m^2 \cdot ^{\circ}C}$$

Найти:  $q$  -?  $t_{НП}$  -?  $t_{ВП}$  -?

$t_{ВП} = t_B - \frac{q}{\alpha_B}$  учитывая, что  $R_B = \frac{1}{\alpha_B}$ , получим

$grad(T)$  -?

$$t_{ВП} = t_B - q \cdot R_B$$

$t(x=0,1)$  -?

$$t_{ВП} = 23 - 49,5 \cdot 0,1 = 18,05^{\circ}C$$

$t_{НП} = t_H + \frac{q}{\alpha_H}$  учитывая, что  $R_H = \frac{1}{\alpha_H}$ ,

получим  $t_{НП} = t_H + q \cdot R_H$

$$t_{НП} = -27 + 49,5 \cdot 0,04 = -25,02^{\circ}C$$

$$grad(T) = \frac{\Delta t}{\Delta x} = \frac{t_{ВП} - t_{НП}}{\delta};$$

$$\frac{\Delta t}{\Delta x} = \frac{18,05 - (-25,02)}{0,65} \approx 66,2 \frac{^{\circ}C}{m}$$

Из формулы (п.7)  $t_x = t_B - \frac{t_B - t_H}{R_0} \left( \frac{1}{\alpha_B} + \frac{x}{\lambda} \right)$  принимая

$$t_x = 0^{\circ}C,$$

$$\text{получим } x = \frac{[R \cdot t_B - R_B(t_B - t_H)] \cdot \lambda}{t_B - t_H}; \quad x = 0,32m.$$

В зоне промерзания образуется лед (иней).

2. Через какое время вода в самоваре охладится от  $100^{\circ}C$  до  $50^{\circ}C$ , когда углей нет, а площадь охлаждения  $400 \text{ см}^2$ .

Постоянная в ньютоновском законе охлаждения  $\alpha = 0,00052 \frac{\text{кал}}{\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{К}}$ .

Емкость самовара  $V = 3000 \text{ см}^3$ , температура в комнате  $15^{\circ}C$ . Плотность воды

$\rho = 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ , удельная теплоемкость воды  $c = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^{\circ}C}$ .

Дано:

Решение:

$$t_1 = 100^{\circ}C,$$

По Ньютону количество тепла  $dQ$ , отдаваемое

$$t_2 = 50^\circ \text{C},$$

$$\Theta = 15^\circ \text{C},$$

$$F = 400 \text{ см}^2,$$

$$\alpha = 5,2 \cdot 10^{-4} \frac{\text{кал}}{\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{К}},$$

$$V = 3000 \text{ см}^3.$$

Найти:  $\tau_k$  - ?

телом за время  $d\tau$ , определяется по формуле

$dQ = \alpha(t - \Theta) \cdot F \cdot d\tau$ , где  $t$  - температура

нагретого тела,  $\Theta$  - температура окружающей

среды,  $F$  - площадь поверхности тела.

$$dQ = m \cdot c \cdot dt = \alpha \cdot (t - \Theta) \cdot F \cdot d\tau,$$

$$\frac{dt}{t - \Theta} = \frac{\alpha \cdot F}{m \cdot c} d\tau,$$

$$-\int_{t_1}^{t_2} \frac{dt}{t - \Theta} = \int_0^{\tau_k} \frac{\alpha \cdot F}{V \cdot \rho \cdot c} d\tau, \quad \ln \frac{t_1 - \Theta}{t_2 - \Theta} = \frac{\alpha \cdot F}{V \cdot \rho \cdot c} \tau_k,$$

$$\tau_k = \frac{V \cdot \rho \cdot c}{\alpha \cdot F} \cdot \ln \frac{t_1 - \Theta}{t_2 - \Theta},$$

$$\tau_k = \frac{3 \cdot 10^{-6} \cdot 1000 \cdot 4200}{217,88 \cdot 4 \cdot 10^{-2}} \cdot \ln \frac{100 - 15}{50 - 15} = 1260 \text{ с} = 21 \text{ мин}$$

### Задачи для самостоятельной работы

**1.1.** Стена здания имеет толщину  $\delta = 0,60 \text{ м}$ . Теплопроводность материала стены  $\lambda = 0,75 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ , площадь стены  $F = 50 \text{ м}^2$ . Температура внутренней поверхности стены  $t_{\text{вн}} = 18^\circ \text{C}$ , наружной поверхности  $t_{\text{нн}} = -18^\circ \text{C}$ . Считая, что установившийся режим теплопереноса через стену достигнут, найдите:

- значение температурного градиента в стене;
- температуру в точке стены на расстоянии 10 см от более нагретой поверхности;
- какова скорость переноса тепла через стенную поверхность?

**1.2.** Сколько теплоты пройдет за 1 час вследствие теплопроводности сквозь окно с двойной рамой, если площадь окна  $F = (1,7 \times 2) \text{ м}^2$ ? Толщина слоя воздуха между рамами 10 см, температура снаружи  $-27^\circ \text{C}$ , а температура внутри  $+23^\circ \text{C}$ . Скачками температуры на границах «улица-окно», «окно-комната» пренебречь.

**1.3.** Определите количество теплоты, передаваемое воздуху за 1 час поверхностью голландской печки (диаметр 1 м, высота 2 м), если коэффициент теплоотдачи при переходе тепла от печи к воздуху равен

$\alpha = 12,54 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}}$ . Температура поверхности печи  $200^\circ\text{С}$ , а температура воздуха  $15^\circ\text{С}$ .

**1.4.** В России окна жилых зданий представлены двойными рамами. Толщина стекол  $d = 3$  мм, теплопроводность стекла  $\lambda_{\text{ст}} = 0,7 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ , расстояние между стеклами  $\delta = 0,125$  м, коэффициент теплопроводности воздуха  $\lambda_{\text{в}} = 0,024 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ . Определите величину термического сопротивления окна. Как рассчитать суточные потери тепла через окно площадью  $F = 4 \text{ м}^2$ ? Почему действительные потери через окно будут значительно больше?

**1.5.** Определите количество теплоты, теряемое одним квадратным метром стены в течение суток. Температура воздуха в помещении  $t_{\text{в}} = 25^\circ\text{С}$ , а температура наружного воздуха  $t_{\text{н}} = -20^\circ\text{С}$ . Толщина стены  $20$  см, теплопроводность материала стены  $\lambda = 0,14 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ , коэффициенты теплоотдачи на границе «стена-воздух»:  $\alpha_{\text{н}} = 23 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}}$  и  $\alpha_{\text{в}} = 8,7 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}}$ . Определите температуру внутренней поверхности стены; рассчитайте значение  $t_{\text{в}} - t_{\text{в.п}}$ .

**1.6.** Внутренняя рама находится при температуре  $t_1 = 10^\circ\text{С}$ , а наружная – при температуре  $t_2 = -20^\circ\text{С}$ . Среднюю температуру воздуха между рамами считать равной  $t = -5^\circ\text{С}$ , давление атмосферное. Какое количество тепла теряется в минуту через окно за счет теплопроводности воздуха, заключенного между рамами? Средняя длина свободного пробега молекулы равна  $0,6$  мкм. Площадь каждой рамы  $F = 4 \text{ м}^2$ , расстояние между рамами  $\delta = 0,125$  м. Почему действительные потери тепла через окно значительно больше? Назовите физические и строительные факторы такого увеличения теплопотерь через окно.

**1.7.** Стена здания состоит из двух слоев: внешнего толщиной  $\delta_1 = 5$  см с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_1 = 0,03 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$  и внутреннего толщиной  $\delta_2 = 0,60$  м с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_2 = 0,75 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ . Температура воздуха в помещении и вне его соответственно равна  $23^\circ\text{С}$  и  $-17^\circ\text{С}$ . Термическое сопротивление внешнего и внутреннего пристеночных слоев соответственно равно  $R_{\text{н}} = 0,04 \frac{^\circ\text{С} \cdot \text{м}^2}{\text{Вт}}$  и  $R_{\text{в}} = 0,10 \frac{^\circ\text{С} \cdot \text{м}^2}{\text{Вт}}$ . Найдите:

- значение температур  $t_{\text{н.п}}$  и  $t_{\text{в.п}}$  и температуру на границе слоев;
- значения температурных градиентов в первом и втором слоях;

в) плотность теплового потока через стену.

**1.8.** а) Сколько каменного угля нужно сжигать в сутки на водяное отопление дома, площадь поверхности стен и крыши которого равна  $F = 10000 \text{ м}^2$ , чтобы поддерживать в помещении температуру  $t_{в} = 18 \text{ }^\circ\text{C}$ , если температура снаружи здания  $t_{н} = -22 \text{ }^\circ\text{C}$ ? Толщина стены  $\delta = 0,64 \text{ м}$ , коэффициент теплопроводности материала стены  $\lambda = 1,05 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ , а утечка тепла с единицы поверхности крыши такая же, как с единицы поверхности стены. Коэффициенты теплоотдачи (тепловосприятости) на границе «воздух-стена» соответственно равны  $\alpha_{н} = 25 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C}}$  и  $\alpha_{в} = 9,75 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C}}$ . Теплотворная способность угля  $3,14 \cdot 10^7 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ . КПД топочного устройства  $\eta = 75 \%$ .

б) Вычислите температуру на внутренней поверхности стены  $t_{в.п}$ .

в) Рассчитайте скачок температуры на внутренней поверхности стены.

г) После ремонта, реставрации дома по шведской технологии, термическое сопротивление стены увеличилось в 16 раз. Сколько угля понадобится сжигать ежедневно для поддержания тех же комфортных условий?

**1.9.** В варианте шведской стены окно вмонтировано в ее конструкцию. Толщина стекла  $d = 4 \text{ мм}$ , теплопроводность стекла  $\lambda_{ст} = 0,7 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ , расстояние между стеклами  $\delta = 0,006 \text{ м}$ , коэффициент теплопроводности воздуха  $\lambda_{в} = 0,024 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ . Рассчитайте термическое сопротивление окна при двойном остеклении.

**1.10.** Солнечная постоянная  $J = 1,35 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2}$ . Какую толщину льда могло бы растопить солнечное тепло за 1 час (1 сутки) на поверхности земного шара? Плотность льда  $\rho = 916 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ , удельная теплота плавления  $Q_{уд} = 80 \frac{\text{кал}}{\text{г}}$ . Радиус земного шара  $R = 6400 \text{ км}$ . Обратным излучением тепла от Земли пренебречь.

**1.11.** Стена толщиной  $\delta = 640 \text{ мм}$  выполнена из железобетона  $\lambda = 1,69 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ , температура на поверхностях поддерживается постоянной и равной  $t_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_2 = -30 \text{ }^\circ\text{C}$ . Вычислите плотность теплового потока через такую стену (толщина значительно меньше ширины и высоты).

**1.12.** Определите часовую потерю тепла через стену из сплошного глиняного кирпича. Длина стены 5 м, высота 4 м и толщина 640 мм. Температура на поверхностях стены поддерживается постоянной и равной

$t_1 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_2 = -25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Коэффициент теплопроводности кирпича  $\lambda = 0,60 \frac{\text{ккал}}{\text{м} \cdot \text{час} \cdot \text{град}}$ . Потерями тепла через торцы стены можно пренебречь.

**1.13.** Определите соотношения между коэффициентами теплопроводности материалов стен, если при толщинах  $\delta_1 = 0,640 \text{ м}$  и  $\delta_2 = 0,08 \text{ м}$  и одинаковой разности температур на граничных поверхностях соотношение между плотностями тепловых потоков  $q_2 = 0,125 q_1$ .

**1.14.** Стена русской печи выполнена из сплошного глиняного кирпича толщиной  $\delta_1 = 250 \text{ мм}$ . Коэффициенты теплопроводности кирпича  $\lambda_1 = 0,60 \frac{\text{ккал}}{\text{м} \cdot \text{час} \cdot \text{град}}$  и слоя штукатурки  $\lambda_2 = 0,14 \frac{\text{ккал}}{\text{м} \cdot \text{час} \cdot \text{град}}$ . Температура на внутренней поверхности кирпича  $t_1 = 110 \text{ }^\circ\text{C}$ , на внешней поверхности штукатурного слоя  $t_2 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Вычислите температуру в плоскости соприкосновения слоев и толщину штукатурного слоя при условии, чтобы тепловые потери через площадь  $F = 1 \text{ м}^2$  стенки в течение часа не превышали  $q = 100 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{час}}$ .

**1.15.** Определите тепловой поток через площадь  $F = 1 \text{ м}^2$  кирпичной стены помещения толщиной  $\delta = 0,510 \text{ м}$  с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_k = 0,60 \frac{\text{ккал}}{\text{м} \cdot \text{час} \cdot \text{град}}$ . Температура воздуха внутри помещения  $t_b = 18 \text{ }^\circ\text{C}$ , коэффициент теплоотдачи  $\alpha_b = 7,5 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{час} \cdot \text{К}}$ , температура наружного воздуха  $t_n = -30 \text{ }^\circ\text{C}$ , коэффициент теплоотдачи стены, обдуваемой ветром,  $\alpha_n = 20 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{час} \cdot \text{К}}$ . Вычислите температуру на поверхностях стены.

**1.16.** Какое количество тепла теряется в минуту через окно за счет теплопроводности воздуха, заключенного между рамами? Площадь каждой рамы  $F = 4 \text{ м}^2$ , расстояние между стеклами  $\delta = 0,125 \text{ м}$ . Внутренняя рама находится при температуре  $t_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , а наружная – при температуре  $t_2 = -20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Средняя длина свободного пробега молекул равна  $l_0 = 0,6 \text{ мкм}$ . Среднюю температуру воздуха между рамами считать  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ , давление равно атмосферному. Как изменится ответ, если учесть наличие стекол в рамах? Толщина стекла  $d = 6 \text{ мм}$ , теплопроводность стекла  $\lambda = 0,60 \frac{\text{ккал}}{\text{м} \cdot \text{час} \cdot \text{град}}$ .

**1.17.** Стена с нормированным сопротивлением  $R = 2,4 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}}$  снаружи покрыта слоем тепловой изоляции толщиной  $50 \text{ мм}$  с коэффициентом

теплопроводности  $\lambda = 0,080 \frac{\text{ккал}}{\text{м} \cdot \text{час} \cdot \text{град}}$ . Сравните потери тепла через изолированную и неизолированную стены.

**1.18.** На Западе для энергосбережения зданий используют не двойные рамы, а двойное остекление, толщина стекол  $d_1 = 6 \text{ мм}$ , коэффициент теплопроводности стекла  $\lambda_{\text{ст}} = 0,76 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ . Расстояние между стеклами  $d_2 = 0,6 \text{ см}$ , и пространство заполнено инертным газом криптоном  $\lambda_{\text{кр}} = 4,53 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$  при давлении 600 мм Нг. Оцените суточные потери тепла через окно площадью  $F = 1,10 \times 1,15 \text{ м}^2$ , если температурный перепад  $\delta T = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ .

*Примечание:* Расстояние между стеклами при двойных рамах 0,125 мм, т.е. много больше, чем при двойном остеклении. Почему западная технология предпочтительнее?

**1.19.** Медный стержень длиной 25 см и площадью  $F = 1 \text{ см}^2$  ( $\lambda = 390 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ ) заключен в теплоизолирующую оболочку. Концы стержня упираются в термостаты с температурами  $t_1 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $t_2 = 125 \text{ }^\circ\text{C}$ . Установившийся режим переноса тепла достигнут. Определите температурный градиент тепла. Какова температура в точке стержня, отстоящей на 10 см от наиболее нагретого конца стержня? Какова скорость переноса тепла?

**1.20.** Покажите, что в пластине, составленной из частей различного материала, температурный градиент в каждой части обратно пропорционален теплопроводности.

**1.21.** Стена многослойна. Внешний слой из теплоизоляционного материала имеет толщину  $\delta_1 = 5 \text{ см}$  и коэффициент теплопроводности  $\lambda_1 = 0,25 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ ; слой сплошного силикатного кирпича имеет толщину  $\delta_2 = 64 \text{ см}$  и коэффициент теплопроводности  $\lambda_2 = 0,70 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ . Внутренний слой из гипсового листа имеет толщину  $\delta_3 = 1,5 \text{ см}$  и коэффициент теплопроводности  $\lambda_3 = 0,2 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ , и далее наклеенный пробковый слой (щит) имеет толщину  $\delta_4 = 10 \text{ мм}$  и коэффициент теплопроводности  $\lambda_4 = 0,05 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ . Определите термическое сопротивление такой сложной стены. Как изменится термическое сопротивление, если внешний теплоизолирующий слой отсутствует?

**1.22.** Вычислите распределение температуры в многослойном ограждении: 1 - листы гипсовые на внутренней поверхности  $\delta_1 = 2 \text{ см}$  и  $\lambda_1 = 0,15 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ ; 2 -

железобетонная плита  $\delta_2 = 40 \text{ см}$  и  $\lambda_2 = 1,69 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ ; 3 - внешний слой пенопласт  $\delta_3 = 10 \text{ см}$  и  $\lambda_3 = 0,052 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ ; температура внутренней поверхности  $t_{\text{в.п}} = 18 \text{ }^\circ\text{C}$ , температура наружной поверхности  $t_{\text{н.п}} = -32 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**1.23.** Два одинаковых  $\delta_1 = \delta_2 = 0,10 \text{ м}$  цилиндра из меди и свинца сложены основаниями. Конец медного поддерживается при температуре  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ , конец свинцового – при температуре  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ . Какова температура места соединения цилиндров?  $\lambda_{\text{Cu}} = 0,920 \frac{\text{кал}}{\text{см} \cdot \text{с} \cdot \text{град}}$ ,  $\lambda_{\text{Pb}} = 0,085 \frac{\text{кал}}{\text{см} \cdot \text{с} \cdot \text{град}}$ . Потерь тепла через боковые поверхности цилиндров не происходит.

**1.24.** В воздушной системе отопления тепло передается с нагретым воздухом. При этом воздух, нагнетаемый вентилятором, продувается над электронагревателем. Посчитайте, сколько тепла передается с воздухом в час, если часовая производительность вентилятора  $5 \frac{\text{м}^3}{\text{мин}}$ , а воздух нагревается над электронагревателем от  $10$  до  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**1.25.** Горячая вода передается потребителям по стальным трубам, покрытым изоляцией. Как показали опыты, в трубах сечением  $150 \text{ дм}^2$  при скорости течения  $1,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$  на каждые  $250 \text{ м}$  трубопровода температура воды понижается на  $3 \text{ }^\circ\text{C}$ . Подсчитайте потерю тепла в теплопроводе на  $1 \text{ км}$  длины в час.

**1.26.** Наружная поверхность стены имеет температуру  $t_{\text{н.п}} = -20 \text{ }^\circ\text{C}$ , а внутренняя поверхность стены  $t_{\text{в.п}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Толщина стены  $\delta = 0,51 \text{ м}$ . Найдите теплопроводность материала стены, если тепломер показывает, что плотность теплового потока через стену  $q = 144 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^2 \cdot \text{час}}$ .

**1.27.** В доме с площадью стен и крыши равной  $F = 7 \cdot 10^3 \text{ м}^2$  сжигается  $1,8 \text{ т}$  условного топлива в сутки, КПД печи  $\eta = 0,6$ . Толщина стен дома  $\delta = 0,5 \text{ м}$ , коэффициент теплопроводности материала  $\lambda = 0,836 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ , теплопроводность материала крыши равна теплопроводности стен. Конвективными теплообменами на ограничивающих поверхностях пренебречь. Температура снаружи здания  $t_{\text{н}} = -15 \text{ }^\circ\text{C}$ . Определите температуру внутри здания, если теплотворная способность условного топлива  $r = 29,26 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ . Можно ли считать эту температуру комфортной для человека?

**1.28.** Пластинки с коэффициентами теплопроводности  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  и  $\lambda_3$  сложены, как показано на рисунке. Рассчитайте теплопроводность системы для двух положений:

- а) в направлении вдоль пластинок  $\lambda_{\parallel}$ ;
- б) в направлении, перпендикулярном к пластинам  $\lambda_{\perp}$ .

Толщина пластинок  $-b$ . Обобщите расчеты на случай пластинок разной толщины.

**1.29.** Стена выполнена из слоя сплошного силикатного кирпича толщиной  $\delta_k = 64$  см с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_k = 0,70 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$  и слоя известково-песчаного раствора толщиной  $\delta_p = 2$  см с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_p = 0,58 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$ . Температура на внешней поверхности кирпича  $t_1 = -30$  °С, на внешней поверхности слоя известково-песчаного раствора  $t_2 = 20$  °С. Вычислите температуру на границе соприкосновения «кирпич-раствор».

**1.30.** Пусть стена состоит из нескольких слоев ( $n = 3$ ), разнородных и плотно прилегающих друг к другу. Толщина первого слоя  $\delta_1 = 125$  мм, теплопроводность первого слоя  $\lambda_1 = 0,79 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ ; толщина второго слоя  $\delta_2 = 250$  мм, теплопроводность второго слоя  $\lambda_2 = 0,26 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ ; толщина третьего слоя  $\delta_3 = 50$  мм, теплопроводность третьего слоя  $\lambda_3 = 0,14 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ . Температура наружных поверхностей соответственно равна  $t_{н.п} = t_1 = -20$  °С,  $t_{в.п} = t_4 = 18$  °С. Скачков температуры на соприкасающихся поверхностях нет, благодаря хорошему тепловому контакту. Найдите температуру граничных слоев  $t_2, t_3$ ; плотность теплового потока через стенку.

**1.31.** Определите плотность теплового потока через кирпичную стену длиной 6 м, высотой 3 м, толщиной 50 см для:

- а) зимних условий  $t_n = -30$  °С,  $t_b = 20$  °С,  $\alpha_n = 23 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ ,  $\alpha_b = 8,5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$  и  $\lambda_k = 0,5 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ ;
- б) летних условий  $t_n = 30$  °С,  $t_b = 20$  °С,  $\alpha_n = 23 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ ,  $\alpha_b = 8,5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$  и  $\lambda_k = 0,5 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ .

Укажите направление тепловых потоков зимой и летом. Во сколько раз они отличаются?

**1.32.** Какой толщины следовало бы сделать деревянную стенку, чтобы она давала такую же потерю тепла, как кирпичная стена толщиной 0,65 м при одинаковой температуре внутри и снаружи здания? Коэффициенты теплопроводности кирпича и дерева  $\lambda_k = 0,70 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ ,  $\lambda_d = 0,17 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ .

**1.33.** Наружная стена жилого дома выполнена в виде крупной панели из бетона на гравии, щебне толщиной 90 см и теплопроводностью  $\lambda_n = 1,30 \frac{\text{ккал}}{\text{м} \cdot \text{час} \cdot \text{К}}$ , покрытиями с наружной ( $\delta_n$ ) и внутренней ( $\delta_b$ ) поверхностями  $\delta_n = 5 \text{ см}$ ,  $\lambda_n = 0,045 \frac{\text{ккал}}{\text{м} \cdot \text{час} \cdot \text{град}}$ ,  $\delta_b = 1,5 \text{ см}$ . Общее сопротивление теплопередачи  $R_0 = 1,43 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{час} \cdot \text{К}}{\text{ккал}}$ . Определите коэффициент теплопроводности внутреннего штукатурного слоя. Как изменится термическое сопротивление, если внутреннюю поверхность стены оклеить дополнительно пробковыми плитами толщиной 1,2 см и теплопроводностью  $\lambda_{пр} = 0,041 \frac{\text{ккал}}{\text{м} \cdot \text{час} \cdot \text{К}}$ ? Приведите численные значения термических сопротивлений отдельных слоев.

**1.34.** Какое количество тепла проходит за 14-часовую ночь сквозь снежный покров толщиной 60 см и площадью  $F = 1 \text{ м}^2$ , если температура верхнего слоя снега  $t_1 = -20 \text{ }^\circ\text{C}$ , а верхнего слоя почвы  $t_2 = -1 \text{ }^\circ\text{C}$ , плотность снега  $\rho = 200 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$  (слегка слежавшийся снег)? Коэффициент теплопроводности снега зависит от его плотности и равен  $\lambda_c = 2,8 \cdot 10^{-6} \cdot \rho^2 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ .

**1.35.** Для расчета отопительной системы необходимо найти потерю теплоты через единицу поверхности ( $F = 1 \text{ м}^2$ ) стены здания в течение суток. Толщина стены 50 см, температура стены изнутри и снаружи здания соответственно равна  $t_b = 18 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $t_n = -30 \text{ }^\circ\text{C}$ . Коэффициент теплопроводности стены  $\lambda_c = 0,20 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ .

**1.36.** Стена здания многослойная. Толщина первого слоя  $\delta_1 = 5 \text{ см}$ , коэффициент теплопроводности  $\lambda_1 = 0,03 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ ; для последующих слоев величины соответственно равны:  $\delta_2 = 0,50 \text{ м}$ ,  $\lambda_2 = 0,75 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ ;  $\delta_3 = 2 \text{ см}$ ,  $\lambda_3 = 0,15 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ ;  $\delta_4 = 2 \text{ мм}$ ,  $\lambda_4 = 0,024 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ ;  $\delta_5 = 1,0 \text{ см}$ ,  $\lambda_5 = 0,06 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ .

Найдите:

- а) термическое сопротивление первого и четвертого слоев;
- б) эффективное значение коэффициента теплопроводности стены;
- в) какие слои определяют термическое сопротивление такой стены.

**1.37.** Пространство между двумя коаксиальными цилиндрами с радиусами  $R_1$  и  $R_2$  ( $R_2 > R_1$ ) заполнено однородным веществом, проводящим тепло, с коэффициентом теплопроводности  $\lambda$ . Температура поверхностей  $t_1$  и  $t_2 < t_1$ .

- а) Определите переданное через такую стену тепло за 1 час;
- б) Определите закон распределения температуры  $t(r)$ .

**1.38.** Найдите распределение температуры в пространстве между двумя концентрическими сферами с радиусами  $R_1$  и  $R_2$  ( $R_2 > R_1$ ), если температура сфер  $t_2 < t_1$ , коэффициент теплопроводности среды между сферами  $\lambda$ .

**1.39.** Вода в пруду имеет температуру  $t_{\text{H}_2\text{O}} = 0^\circ\text{C}$ , температура окружающего воздуха  $t_{\text{в}} = -10^\circ\text{C}$ . Какой слой льда образуется за сутки, считая с момента замерзания воды? Коэффициент теплопроводности льда  $\lambda = 2,22 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ , скрытая теплота замерзания воды  $r = 3,344 \cdot 10^5 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ , плотность льда  $\rho = 916 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ .

**1.40.** Внутри бесконечно длинного стержня радиуса  $R$  производится тепло. Удельная мощность источников  $q_v$ , коэффициент теплопроводности  $\lambda$ . Определите плотность теплового потока через поверхность; тепловой поток с единицы длины стержня.

**1.41.** При реконструкции старых зданий историко-архитектурных памятников нельзя изменять вид прежнего фасада. Для усиления теплоизоляции таких зданий используют плиты из теплоизоляционного материала толщиной 30-100 мм. Насколько эффективно увеличивается термическое сопротивление стены с покрытием из таких плит по сравнению с тем, что было до реконструкции? Теплопроводность материала плит  $\lambda_{\text{пл}} = (0,027 - 0,033) \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ . Сопротивление стены до реконструкции  $R_{\text{исх}} = 1,1 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}}$ .

**1.42.** а) Коэффициент теплоотдачи от металлического тела воздуху  $\alpha = 12,54 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ . Вычислите по закону Ньютона количество тепла, передаваемое поверхностью  $0,5 \text{ м}^2$  железной печи воздуху в течение часа, если температура воздуха  $10^\circ\text{C}$ , а температура печи  $200^\circ\text{C}$ ;

б) произведите тот же расчет, используя закон Стефана-Больцмана. Степень черноты излучающей поверхности  $a \approx 0,8$ . Объясните расхождение полученных чисел.

## ВЛАЖНОСТЬ. КОНДЕНСАЦИЯ

В толщу ограждения влага попадает во время кладки с растворами, а в дальнейшем происходит увлажнение атмосферной влагой, влагой внутреннего воздуха, грунтовой влагой. Для защиты стен от атмосферной влаги наружные поверхности штукатурят или облицовывают. Для защиты стен от грунтовой влаги устраивают в цокольной части гидроизоляцию.

При эксплуатации зданий существует два вида увлажнения: гигроскопическая влага, поглощаемая пористым материалом из окружающего воздуха, и конденсационная влага, образующаяся на внутренней поверхности стен и появляющаяся при конденсации в ограждениях водяных паров воздуха. Степень насыщения воздуха водяным паром определяет относительная влажность.

### Основные формулы

1. Давление насыщенного пара над плоской поверхностью химически чистой воды:

$$p_{нас} = p_0 \exp \frac{\alpha \cdot t}{\beta + t}; \quad p_0 = 6,1121 \cdot 10^2 \text{ Па};$$

$$\alpha_{ж} = 17,5043 \quad \beta_{ж} = 241,2^{\circ}C \quad \text{ж - вода}$$

$$\alpha_{л} = 22,4893 \quad \beta_{л} = 272,881^{\circ}C \quad \text{л - лед}$$

2. Давление насыщенного пара вблизи сферической поверхности:

$$p = p_0 \pm \frac{2\sigma}{r} \frac{\rho_n}{\rho_{ж}};$$

$p_0$  - давление над плоской поверхностью,  $r$  - радиус сферы,  $\rho_n$ ,  $\rho_{ж}$  - плотность пара и жидкости,  $\sigma$  - коэффициент поверхностного натяжения на границе «жидкость-газ».

Знак «+» над выпуклой; «-» над вогнутой поверхностями.

3. Давление идеального газа:  $p = \frac{m}{M} \frac{RT}{V}$  (уравнение Менделеева - Клапейрона).

4. Относительная влажность:  $f = \frac{p_{абс}}{p_{нас}} 100\%$ .

## Образцы решения задач

1. В комнате объемом  $V = 150 \text{ м}^3$  поддерживается температура  $t_1 = 20^\circ \text{С}$ , а точка росы равна  $t_2 = 10^\circ \text{С}$ . Определите относительную влажность воздуха и количество водяного пара, содержащегося в комнате.

Дано:

$$V = 150 \text{ м}^3,$$

$$t_1 = 20^\circ \text{С},$$

$$t_2 = 10^\circ \text{С},$$

$$M_{\text{пара}} = 0,018 \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$$

$$f - ? \quad m_{\text{пара}} - ?$$

Решение:

Если воздух в комнате содержит некоторое количество водяного пара, то при понижении температуры до точки росы этот пар становится насыщенным. По таблице зависимости давления насыщенного пара  $p_{2Н} = 1,22 \text{ кПа}$ . Пусть пар при температуре  $t_1$  создает в комнате давление  $p_1 = \frac{m_{\text{пара}}}{M_{\text{пара}} \cdot V} R \cdot T_1$ , если при этой температуре давление насыщающих паров равно  $p_{1Н}$ , то относительная влажность воздуха в комнате  $f = \frac{p_1}{p_{1Н}} 100\%$ . В случае понижения температуры до  $t_2$  пар в комнате стал бы насыщенным и его давление стало равным  $p_{2Н}$ , тогда  $p_{2Н} = \frac{m_{\text{пара}}}{M_{\text{пара}} \cdot V} R \cdot T_2$ , масса пара в комнате остается неизменной. Решаем уравнения совместно, получаем

$$f = \frac{p_1}{p_{1Н}} 100\% = \frac{T_1}{T_2} 100\% , f \approx 54,5\%$$

$$m_{\text{пара}} = \frac{p_{2Н} \cdot V \cdot M_{\text{пара}}}{R \cdot T_2}$$

$$m_{\text{пара}} = 1,4 \text{ кг}$$

## Задачи для самостоятельной работы

### Задачи

**2.1.** Относительная влажность воздуха днем при температуре  $30^\circ \text{С}$  равна 55%. Ночью температура упала до  $16^\circ \text{С}$ . Выпадет ли роса? Если да, то сколько из каждого  $\text{м}^3$ ?

**2.2.** Каково давление водяного пара вблизи капельки воды, радиус которой  $r = 5 \text{ мкм}$ , при температуре  $t = 10^\circ\text{C}$ , поверхностное натяжение воды  $\sigma = 7,1 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Н}}{\text{м}}$ ;  $\rho_{\text{п}} = 9,4 \frac{\text{г}}{\text{м}^3}$ .

**2.3.** В  $1 \text{ м}^3$  охлаждающегося воздуха находится  $8,3 \text{ г}$  водяного пара.

а) При какой температуре начинается конденсация, если центром конденсации являются пылинки, которые можно принять за шарики с диаметром  $d = 10^{-5} \text{ см}$ ? Поверхностное натяжение воды принять  $\sigma = 7,1 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Н}}{\text{м}}$ .

б) При какой температуре начнется конденсация водяного пара в пористом материале, смачиваемом водой, если диаметр каналов в нем  $d = 10^{-5} \text{ см}$ ?

**2.4.** Относительная влажность воздуха при температуре  $t_1 = 15^\circ\text{C}$  равна  $f = 75\%$ . Какой будет относительная влажность, если воздух нагреть при постоянном объеме до  $t_2 = 23^\circ\text{C}$ ? Давление насыщенного пара воды при  $t_1 = 15^\circ\text{C}$  равно  $p_1 = 1705 \text{ Па}$ , при  $t_2 = 23^\circ\text{C}$  равно  $p_2 = 2809 \text{ Па}$ .

**2.5.** При открывании двери деревянной бани, где воздух насыщен водяным паром, наружу воздух выходит с клубами белого тумана (сконденсированного водяного пара). Какое количество воды оседает в виде тумана на  $1 \text{ м}^3$  выходящего воздуха, если температура в бане  $t_6 = 60^\circ\text{C}$ , а на улице  $t_y = -10^\circ\text{C}$ , причем относительная влажность наружного воздуха  $f_2 = 30\%$ . Давление насыщенного пара при этих температурах соответственно равно  $p_{1.\text{нас}} = 1,99 \cdot 10^4 \text{ Па}$  и  $p_{2.\text{нас}} = 260 \text{ Па}$ .

**2.6.** Может ли в  $1 \text{ м}^3$  воздуха при температуре  $t = 5^\circ\text{C}$  содержаться  $12 \text{ г}$  водяного пара? При какой температуре становится возможным такое содержание насыщенного водяного пара в  $1 \text{ м}^3$  воздуха? Давление насыщенного пара при этой температуре  $1603 \text{ Па}$ .

**2.7.** Стена дома из туфобетона имеет толщину  $\delta = 42 \text{ см}$  и коэффициент теплопроводности  $\lambda = 0,47 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ . Температура наружного воздуха  $t_{\text{н}} = -25^\circ\text{C}$ ,

внутреннего  $t_{\text{в}} = 18^\circ\text{C}$ , коэффициенты теплоотдачи  $\alpha_{\text{н}} = 23 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ ,  $\alpha_{\text{в}} = 8,7 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ .

Определите предельно допустимую влажность воздуха внутри помещения, при которой начинается выделение влаги: а) на поверхности стены; б) в углу.

**2.8.** Весной по металлическим трубам холодного водоснабжения течет вода при температуре  $t = 6^\circ\text{C}$ . Чему равна относительная влажность воздуха в помещении, если внутренняя температура  $t'_{\text{в}} = 20^\circ\text{C}$ ,  $t''_{\text{в}} = 15^\circ\text{C}$ , а на трубе обнаружались признаки «запотевания»?

**2.9.** В замкнутом помещении относительная влажность воздуха при температуре  $t_1 = 18^\circ\text{C}$  равна  $f_1 = 72\%$ . Какова будет относительная влажность  $f_2$ , если этот воздух будет нагрет до температуры  $t_2 = 23^\circ\text{C}$ ? Давление насыщенного пара при этих температурах соответственно равно  $p_1 = 2064\text{ Па}$ ,  $p_2 = 2809\text{ Па}$ .

**2.10.** Температура внутри помещения  $t_b = 22^\circ\text{C}$  и относительная влажность  $f = 70\%$  (повышенная). Температура снаружи помещения  $t_n = -23^\circ\text{C}$ . Общее термическое сопротивление стены  $R_0 = 1,50 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}}$ , внутреннего пристеночного слоя  $R_b = 0,10 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}}$ . Выпадет ли роса на внутренней поверхности; в углу помещения? Точка росы в условиях задачи  $t = 16,3^\circ\text{C}$ .

## ЗВУК. АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНАЯ АКУСТИКА

В жизни мы встречаемся с различными видами колебательных и волновых движений: движение волн на поверхности воды, колебания струны в музыкальном инструменте, распространение радиоволн и т.д.

Звук – разновидность колебательных движений (волн) в воздухе, воде, твердых телах.

Воздух обладает свойством объемной упругости, т.е. сопротивляется сжатию; на свойстве объемной упругости работают автомобильные и велосипедные шины, смягчающие удары при движении.

Подобно всякому телу, воздух обладает массой и инерцией. Сочетание свойств упругости и инерции воздуха приводит к образованию упругих волн, которые возникают при внезапном изменении плотности воздуха.

В воздушной упругой волне частицы колеблются в направлении распространения волны; такие колебания называются продольными.

В природе не существует изолированных колебаний одного тела. Колеблущее тело находится в среде (воздух, вода), обладающей упругими свойствами, поэтому в каждой среде вследствие взаимодействия между частицами колебания передаются прилегающим зонам среды. Этот процесс называется волновым.

Основная характеристика волнового движения – длина волны, т.е. расстояние между двумя точками волны, пребывающими в одной фазе. Другая характеристика – амплитуда волны – расстояние, на которое колеблющаяся частица отклоняется от положения равновесия.

### Основные формулы

1. Связь длины волны  $\lambda$ , скорости волны и частоты колебаний  $\nu(\omega)$ :

$$\lambda = cT = \frac{c}{\nu} = \frac{2\pi c}{\omega}.$$

2. Скорость звука в газах:  $c = \sqrt{\gamma \frac{RT}{M}}$ .

В воздухе  $c = (331,4 \pm 0,6 \cdot t^0)$  м/с.

3. Уравнение волны:  $\xi = \xi_0 \cos(\omega t - kx)$ ;  $c = \frac{\omega}{k}$  – фазовая скорость волны.

4. Скорость волн в твердых телах: продольных  $c_{||}$  и поперечных  $c_{\perp}$ :

$$c_{||} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}; \quad c_{\perp} = \sqrt{\frac{G}{\rho}}.$$

5. Колебательная скорость частиц в звуковой волне:

$$U_{\text{кол}} = \frac{\partial \xi}{\partial t} = 2\pi\nu \xi_a.$$

6. Избыточное давление, интенсивность:  $p_{\text{изб}} = U_{\text{кол}} \delta c = U_{\text{кол}} Z$ ;

$$I = \frac{p_a^2}{2Z} = \frac{P_{\text{эфф}}^2}{Z}; \quad p_a = p_{\text{max}}$$

7. Акустическое сопротивление (импеданс)  $Z = \rho \cdot c$ .

8. Уровни:

- уровень интенсивности звука:  $L_I = 10 \lg \frac{I_1}{I_2}$  [дБ],

- уровень звукового давления:  $L_p = 20 \lg \frac{p_{a2}}{p_{a1}}$  [дБ],

- уровень громкости:  $L_N = 10 \lg \left( \frac{I}{I_{\text{min}}} \right)_\nu$  [фон],

$$L_N = 10 \lg \frac{I_\nu}{I_{\text{min}}^0} \text{ [фон]},$$

$$I_{\text{min}}^0 = 1 \cdot 10^{-12} \text{ Вт/м}^2, \quad \nu = 1000 \text{ Гц}$$

9. Преломление звуковых волн:  $n_{21} = \frac{\sin \Theta_1}{\sin \Theta_2} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$ ;  $\nu_1 = \nu_2$ ;  $\lambda_1 \neq \lambda_2$ .

10. Глубина проникновения волн во вторую среду при выполнении полного отражения:  $x \geq (3 \pm 5)\lambda$ ;  $\Theta_{\text{np}} = \arcsin n_{21}$ .

11. Акустические коэффициенты отражения  $\rho_I$  и поглощения  $\alpha_I$  на границе раздела полубесконечных сред:

$$\rho_I = \frac{I_r}{I_i} = \left[ \frac{1 - \varepsilon}{1 + \varepsilon} \right]^2 \quad \alpha_I = \frac{I_t}{I_i} = \frac{4\varepsilon}{(\varepsilon + 1)^2}, \quad \text{где } \varepsilon = \frac{Z_2}{Z_1}.$$

12. Время реверберации:  $T_0 = 0,162 \frac{V}{\sum \alpha_i F_i}$  при  $\langle \alpha \rangle < 0,2$ .

## Образцы решения задач

1. В воздухе ( $\rho = 1,29 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ) при температуре  $t = 20^\circ\text{C}$  распространяется звуковая волна. Покажите, что акустическое давление звука, вызывающее болевые ощущения и имеющее интенсивность  $I = 10 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ , порядка  $0,66 \cdot 10^{-3}$  атмосферного давления.  $p_{\text{атм}} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$ .

Дано:

Решение:

$$\rho = 1,29 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3},$$

$$t = 20^\circ\text{C},$$

$$I = 10 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2},$$

$$p_{\text{атм}} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Из формулы (п.6)  $I = \frac{P_{\text{эфф}}^2}{Z}$ ,  $P_{\text{эфф}} = \sqrt{I \cdot Z}$ ,  
 акустическое сопротивление  $Z = \rho \cdot c = \rho(331,4 + 0,6 \cdot t)$   
 и тогда  $\frac{P_{\text{эфф}}}{p_{\text{атм}}} = \frac{I \cdot \rho(331,4 + 0,6t)}{p_{\text{атм}}^2} = 0,657 \cdot 10^{-3}$ .

Показать, что  $\frac{P_{\text{эфф}}}{p_{\text{атм}}} = 0,66 \cdot 10^{-3}$

2. Музыкант берет на трубе ноту «ля» первой октавы ( $\nu = 440 \text{ Гц}$ ). Какую ноту мы услышим, если заполнить трубу гелием? Температура в помещении  $t = 20^\circ\text{C}$ .

Дано:

Решение:

$$\gamma = 1,67,$$

$$M = 4 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}},$$

$$t = 20^\circ\text{C},$$

$$\nu = 440 \text{ Гц}.$$

Найдем скорость звука в гелии  $\nu = \sqrt{\gamma \frac{RT}{M}}$ .

$$\nu = \sqrt{1,67 \cdot \frac{8,31 \cdot 293}{4 \cdot 10^{-3}}} = 1008 \frac{\text{м}}{\text{с}}, \text{ при тех же}$$

условиях скорость звука в воздухе  $\nu = 343 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

При смене газа длина трубки остается неизменной, т.е. неизменная длина волны

Найти:  $\nu - ?$

извлекаемого звука. Тогда для частот имеем соотношения

$$\lambda = \frac{\nu}{\nu}, \quad \lambda = \frac{\nu_{\text{He}}}{\nu_{\text{He}}}. \text{ Отсюда } \nu_{\text{He}} = \nu \frac{\nu_{\text{He}}}{\nu}, \nu_{\text{He}} = 440 \frac{1008}{343} = 1293 \text{ Гц}$$

(мы услышим ноту, близкую «ми» третьей октавы).

## Задачи для самостоятельной работы

### Задачи

**3.1.** Амплитуда давления звуковой волны  $p_a = 10$  Па (громкий звук). Площадь уха, перпендикулярную к направлению распространения волны, считать равной  $F = 4 \text{ см}^2$ ; плотность воздуха  $\rho = 1,3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ; скорость звука  $334 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .  
Найдите звуковую энергию, попадающую за 1 секунду в ухо человека.

**3.2.** а) Человек с хорошим слухом может слышать звук с колебанием давления  $p_a = 0,1 \text{ мПа}$  при частоте  $\nu = 2 \cdot 10^3$  Гц. Вычислите амплитуду смещения частиц  $\xi_0$  в такой волне, среда - воздух. Скорость звука в воздухе  $334 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

б) Вычислите амплитуду смещения частиц  $\xi_0$  в такой волне, если среда - вода. Скорость звука в воде  $1490 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

**3.3.** Некоторая акустическая плоская бегущая волна может быть представлена уравнением  $\xi = 0,05 \sin(1980t - 6x)$  (см), где  $\xi$  - смещение частицы в направлении распространения волны,  $t$  - время в секундах,  $x$  - координата на оси, вдоль распространения волны. Найдите частоту колебаний; скорость распространения волны; длину волны; амплитуду скорости колебания частиц.

**3.4.** Эхолот летучей мыши предназначен для определения объекта охоты. Каковы размеры предметов, которые они могут «увидеть»  $\nu = 10^5$  Гц.

**3.5.** Скорость звука в воздухе с плотностью  $\rho = 1,29 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$  можно принять равной  $330 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

а) Покажите, что акустическое эффективное давление звука  $p_{\text{эфф}} = \frac{p_a}{\sqrt{2}}$ , вызывающее болевые ощущения и имеющее интенсивность  $I = 10 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ , будет около  $6,5 \cdot 10^{-4}$  атм.

б) Покажите, что в случае звуковой волны с частотой  $\nu = 500$  Гц, имеющей интенсивность  $I = 10 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$  (такая волна вызывает болевые ощущения), амплитуда смещения «молекулы воздуха» равна  $\xi_a = 0,3 \text{ мм}$ . Сравните это значение с длиной свободного пробега молекул. Давление воздуха

$p_{\text{атм}} = 1,013 \cdot 10^5$  Па при температуре  $20^\circ\text{C}$ . Эффективный диаметр молекулы  $\sigma \approx 3 \cdot 10^{-10}$  м.

**3.6.** Едва слышимый звук в воздухе имеет интенсивность  $I_a = 10^{-10} I_0$ . Рассчитайте для звука с такой интенсивностью и частотой  $\nu = 500$  Гц амплитуду смещения «молекулы воздуха», сравните полученное число с диаметром молекул: кислорода  $\sigma_{\text{O}_2} = 0,35$  нм, азота  $\sigma_{\text{N}_2} = 0,37$  нм. Примечание  $I_0 = 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ .

**3.7.** Высококачественный проигрыватель очень громко играет с интенсивностью  $I = 100 I_0$  в маленькой комнате с площадью поперечного сечения  $(3 \times 3) \text{ м}^2$ . Покажите, что выходная звуковая мощность проигрывателя  $\approx 10$  Вт.

**3.8.** Рассчитайте скорость звука: а) в стекле:  $\rho = 2500 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ,  $E = 5 \cdot 10^{10} \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$ ,  $G = 1,8 \cdot 10^{10} \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$ ; б) в стали:  $\rho = 7800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ,  $E = 21 \cdot 10^{10} \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$ ,  $G = 8 \cdot 10^{10} \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$ .

**3.9.** Два звука разнятся по громкости на 1 дБ. Найдите отношение их интенсивностей и отношение амплитуд давлений.

**3.10.** Звуковой луч падает на границу раздела «вода-воздух» под углом  $\Theta_i = 60^\circ$ , каков угол преломления? Скорость звука в воде  $1450 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ , в воздухе  $340 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

**3.11.** Покажите, что при нормальном падении звуковых волн на плоскую поверхность раздела стали и воды отражается 86 % энергии. Покажите, что в случае волн, распространяющихся в воде и падающих по нормали на плоскую поверхность раздела воды и льда, через границу проходит 82,3 % энергии. Возьмите следующие значения  $Z \left[ \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}} \right]$ : для воды  $Z_{\text{H}_2\text{O}} = 1,43 \cdot 10^6$ , для льда  $Z_{\text{л}} = 3,49 \cdot 10^6$ , для стали  $Z_{\text{с}} = 3,9 \cdot 10^6$ , для воздуха  $Z_{\text{в}} = 340$ ,  $Z_{\text{з}} = 340$ .

**3.12.** а) Найдите предельный угол полного внутреннего отражения звуковых волн на границе «воздух-стекло». Модуль Юнга для стекла  $E = 6,8 \cdot 10^{10} \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$ , плотность стекла  $\rho = 2,6 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$ .

б) Почему летом ( $t = 25^\circ\text{C}$ ) звуковые шумы с улицы проникают через закрытое окно? Толщина оконного стекла  $d = 6$  мм? Рассмотрите интервал частот уличного шума 256-576 Гц; предельную частоту человеческого голоса 2350 Гц.

**3.13.** Какова максимальная акустическая скорость частиц воздуха при плоских волнах:

а) при звуке, дающем максимальное давление  $p'_{\text{изб}} = 900 \text{ Па}$  (сильный звук, вызывающий болевые ощущения) при частоте  $\nu = 400 \text{ Гц}$ ;

б) при звуке, дающем минимальное давление  $p''_{\text{изб}} = 9 \cdot 10^{-4} \text{ Па}$  (еле слышимый звук) при частоте  $\nu = 400 \text{ Гц}$ ;

в) при нормальной слышимости давление  $p'''_{\text{изб}} = 0,9 \text{ Па}$  при частоте  $\nu = 400 \text{ Гц}$ .

Давление воздуха нормальное, температура воздуха  $20^\circ \text{C}$ .

**3.14.** Определите интенсивность звука для всех случаев предыдущей задачи.

**3.15.** Звук распространяется по трубе длиной 50 м. Средний коэффициент поглощения можно принять равным  $k = 10^{-4} \text{ см}^{-1}$ . Каков уровень ощущения звука у конца трубы, если у начала он равен 60 дБ?

**3.16.** Управление некоторыми технологическими процессами на стройке, железной дороге осуществляется голосом живого человека или голосом через репродуктор. Пусть строительство ведется зимой при  $t_1 = -35^\circ \text{C}$  и летом при  $t_2 = 35^\circ \text{C}$ . Как это повлияет на оперативность работы, если расстояние между источником звука и приемником (исполнитель) равно 20 м ( $\approx 100 \text{ м на ж/д}$ ). Время реакции человека на звуковой сигнал  $\tau_0 \approx 0,20 \text{ сек}$ . Для максимально эффективного управления в режиме времени задержка сигнала (источник-приемник) не должна превышать 0,1 сек.

**3.17.** Рассчитайте эквивалентную поверхность поглощения открытого настежь окна, размеры которого соответственно равны  $(1,8 \times 1,70) \text{ м}^2$ . Какой площади поверхности оштукатуренной по железобетону стены соответствует такой оконный проем на частотах: 128; 512 и 2048 Гц.

**3.18.** У. Сэбин допустил, что энергия звуковой волны в помещении со временем спадает по закону экспоненты:  $W_t \sim \exp(-kt)$ . Коэффициент  $k$  может быть сконструирован из величин: объем помещения -  $V$ , эквивалентная поверхность поглощения -  $A$  (основной вклад Сэбина в архитектурную акустику); скорость звука -  $c$ . Найдите выражение для  $k$ . Какое название получила величина, обратная  $k$ ?

## СВЕТ. СТРОИТЕЛЬНАЯ СВЕТОТЕХНИКА

Свет – излучение оптической области спектра, которое вызывает биологические, главным образом зрительные, реакции.

Излучение – понятие, одинаково применимое к различным областям электрических полей (гамма-излучение, рентгеновское, оптическое, радиоизлучение). Электромагнитное излучение представляет собой одну из форм существования материи и состоит из потока элементарных частиц – фотонов. Фотон существует только в непрерывном поступательном движении. Скорость движения фотона равна скорости света в вакууме  $c_0$ . Фотон обладает энергией, массой, скоростью и определёнными волновыми свойствами. Волновые свойства описываются частотой  $\nu$  и длиной волны  $\lambda$ .

Лучистая энергия – это энергия излучения оптической области спектра источника света. В системе СИ может измеряться в Дж.

Приёмником лучистой энергии является тело, преобразующее поглощённую энергию в один из видов энергии: электрическую, биологическую, химическую и т.д. Приёмники лучистой энергии делятся на два класса: физические (фотоэлемент, фотографическая эмульсия и др.) и биологические (глаз, зелёный лист растения, кожа человека, животных и др.).

В светотехнике принято пользоваться мощностью оптического излучения, которая называется лучистым потоком. Единицей измерения лучистого потока служит Вт.

Лучистый поток, состоящий из однородных излучений только одной длины волны  $\lambda$ , называется монохроматическим, т.е. одноцветным. Получить его на практике нельзя. Если же в потоке содержатся излучения различных длин волн, такой поток называется сложным. Пример – дневной свет. Спектр лучистого потока может быть сплошным, полосатым, линейчатым.

Длина волны и мощность являются качественной и количественной характеристикой монохроматического лучистого потока.

Оптическая часть электромагнитного спектра лучистой энергии включает в себя области УФ, видимого и инфракрасного излучения.

Сила света  $I$  – отношение светового потока  $\Phi$  к телесному углу  $\omega$ , в котором он излучается и равномерно распределяется.

Единица измерения – кандела (кд). Кандела – это сила света, излучаемого в перпендикулярном направлении  $1/60000$  м<sup>2</sup> поверхности чёрного тела (полного излучателя). Под чёрным телом понимают тело, поглощающее всю падающую на него энергию.

Световая среда – понятие, характеризующее переменное по характеру комплексное воздействие света на человека.

При оценке качества световой среды решающее значение имеет яркость свечения источника света и освещаемых им поверхностей.

Яркость – световая величина, которая непосредственно воспринимается глазом. Она представляет собой поверхностную плотность силы света в заданном направлении, которая определяется отношением силы света к площади проекции светящейся поверхности на плоскость, перпендикулярную тому же направлению. Единица измерения – кандела на метр квадратный (кд/м<sup>2</sup>).

### Основные формулы

1. Сила света  $I = \frac{d\Phi}{d\omega}$ , [кд], кд  $\equiv$  св.
2. Освещенность  $E = \frac{d\Phi}{dF} \cos \theta$ ,  $E = \frac{I}{r^2} \cos \theta$ , [лк].
3. Светимость  $S = \frac{d\Phi}{dF} = \pi L$ ,  $\left[ \frac{\text{лм}}{\text{м}^2} \right]$ .
4. Яркость  $L = \frac{d\Phi}{d\omega \cdot dF \cdot \cos \theta} = \frac{dI}{dF \cdot \cos \theta} = \frac{dE}{d\omega \cdot \cos \theta}$ ,  $\left[ \frac{\text{кд}}{\text{м}^2} \right]$ .
5. Освещенность, создаваемая небом на открытой площади  $E_n = \pi \cdot L$ .
6. Коэффициент естественного освещения (к.е.о.)  $\varepsilon = \frac{E_p}{E_n} \cdot 100\%$ .

### Образцы решения задач

1. Найдите освещенность на поверхности Земли вызываемую нормально падающими световыми лучами. Яркость Солнца  $L = 1,6 \cdot 10^9 \frac{\text{кд}}{\text{м}^2}$ .

Дано:

Решение:

$$D_C = 1,39 \cdot 10^6 \text{ км},$$

$$R_{C-3} = 1,5 \cdot 10^8 \text{ км}$$

$$L = 1,2 \cdot 10^9 \frac{\text{кд}}{\text{м}^2}.$$

$$L = \frac{d\Phi}{dF \cdot d\omega \cdot \cos \Theta} = \frac{E}{d\omega}, \quad \text{где } E = \frac{d\Phi}{dF},$$

$$\langle E \rangle = L \Delta\omega.$$

$\Delta\omega$  - телесный угол Солнца с Земли,

$$\Delta\omega = \frac{\pi \cdot D_C^2}{4 \cdot R_{C-3}^2}$$

Найти:  $\langle E \rangle$  – ?

$$\Delta\omega = \frac{\pi \cdot D_c^2}{4 \cdot R_{c-3}^2} = 0,684 \cdot 10^{-4} \text{ стер}$$

$$\langle E \rangle = 1,6 \cdot 10^9 \cdot 0,684 \cdot 10^{-4} = 103680 \text{ лк}.$$

2. На лист белой бумаги размером  $10 \times 25 \text{ см}$  нормально к поверхности падает световой поток  $\Phi = 50 \text{ лм}$ . Принимая коэффициент рассеяния бумажного листа  $\rho = 0,7$ , определите для него: освещенность ( $E$ ), светимость ( $S$ ), яркость ( $L$ ).

Дано:

$$S = 250 \text{ см}^2 = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2,$$

$$\Phi = 50 \text{ лм},$$

$$\rho = 0,7.$$

Найти:  $E - ?$   $S - ?$   $L - ?$

Решение:

$$E = \frac{\Phi}{F},$$

$$S = \rho \frac{\Phi}{F},$$

$$S = \pi \cdot L,$$

$$L = \frac{S}{\pi},$$

$$E = \frac{50}{2,5 \cdot 10^{-4}} = 2000 \text{ лк},$$

$$S = 0,7 \cdot \frac{50}{2,5 \cdot 10^{-4}} = 1,4 \cdot 10^3 \frac{\text{лм}}{\text{м}^2},$$

$$L = \frac{2,5 \cdot 10^{-4}}{3,14} = 446 \frac{\text{кд}}{\text{м}^2}$$

## Задачи для самостоятельной работы

### Задачи

**4.1.** Яркость безоблачного неба в солнечный летний день равна  $0,4 \cdot 10^4 \frac{\text{кд}}{\text{м}^2}$ .

Оцените освещенность, которая возникает на открытой поверхности Земли в месте, куда не попадают прямые лучи Солнца.

**4.2.** Как изменятся ваши рассуждения, если говорить об освещенности предметов при ярком безоблачном небе в зимний день, например в декабре или в январе: в степи; в горах. Яркость снега, освещенного Солнцем,  $2,5 \cdot 10^4 \frac{\text{кд}}{\text{м}^2}$ .

**4.3.** Яркость безоблачного неба в солнечный летний день равна  $0,4 \cdot 10^4 \frac{\text{кД}}{\text{м}^2}$ .

Оцените освещенность, которая возникает на поверхности Земли у стены высотного здания. Считайте, что стена здания характеризуется коэффициентом поглощения света  $\alpha = 1$ . Как изменится ваш ответ, если коэффициент поглощения  $\alpha = 0,4$ . Дайте приблизительную оценку.

**4.4.** Электrolампочка накаливания, потребляющая мощность 40 Вт, дает световой поток 380 лм. 40 % этого потока направлено на поверхность  $5 \text{ м}^2$ . Оцените среднюю освещенность поверхности.

**4.5.** Какова сила света в канделах для 25-ваттной лампочки накаливания? Какова сила света в канделах для 25-ваттной люминесцентной лампы?

**4.6.** На лист белой чертежной бумаги падают лучи от лампочки, сила света которой равна 100 св. Определите освещенность ( $E$ ), светимость ( $S$ ) и яркость ( $L$ ) листа бумаги в точке, находящейся на расстоянии 1,5 м от лампочки, если лучи падают на бумагу перпендикулярно, коэффициент отражения 0,75.

**4.7.** Вычислите световой поток  $\Phi$  и силу света  $I$ , испускаемые шаром, если средняя яркость его внешней поверхности  $L = 10 \frac{\text{кД}}{\text{м}^2}$ , а диаметр шара  $d = 125 \text{ мм}$ .

**4.8.** Внутри шара из молочного стекла, диаметр которого  $d = 30 \text{ см}$ , помещена лампа накаливания мощностью 200 Вт, работающая при напряжении 220 В, световой поток такой лампы  $\approx 2500 \text{ лм}$ . Определите яркость внешней поверхности шара, если 25% всего потока источника поглощается в стекле.

**4.9.** Шаровой светильник из молочного стекла, диаметром  $d = 32 \text{ см}$ , при использовании лампы накаливания мощностью 200 Вт, работающей при напряжении 220 В, имеет яркость  $L = 1,7 \frac{\text{кД}}{\text{м}^2}$ , световой поток лампы  $\approx 2500 \text{ лм}$ . Найдите КПД светильника.

**4.10.** Лампа подвешена над столом на высоте 80 см. Освещенность стола в точке под лампой вдвое превышает наиболее благоприятную для чтения освещенность. На каком расстоянии от этой точки по поверхности стола создается нормальная освещенность? Лампу считать точечным источником света.

**4.11.** Люминесцентная лампа мощностью 20 Вт имеет световую отдачу белого света  $45 \frac{\text{лм}}{\text{Вт}}$ . Какой мощности надо взять лампу накаливания на

напряжение 127 В и 220 В для получения того же светового потока? Во сколько раз люминесцентная лампа будет экономичней лампы накаливания? Потери мощности в дросселе 20 %.

**4.12.** На экран площадью  $3\text{ м}^2$  (рассеивающий свет с коэффициентом отражения 0,8) падает световой поток 150 лм. Определите светимость ( $S$ ) и яркость ( $L$ ) экрана.

**4.13.** Какой кривой светораспределения (индикатрисой) должна обладать лампа, чтобы давать равномерную освещенность на плоскости стола, над которым она подвешена, а также световой поток, падающий на стол, если  $I(\varphi=0) = I_0 = 100\text{ кд}$ ?

**4.14.** Согласно стандарту лампа мощностью 100 Вт при напряжении 220 В должна давать световой поток 1275 лм. Определите ее удельную мощность (число ватт на канделу), принимая во внимание, что 40 % светового потока лампы падает на поверхность  $5\text{ м}^2$ . Определите среднюю освещенность.

**4.15.** Точечный источник света находится над поверхностью стола радиусом  $R$ . На какую высоту  $H$  над поверхностью стола необходимо поднять источник света с тем, чтобы освещенность края стола была максимальной?

**4.16.** Над серединой круглого стола радиусом  $R$  на высоте  $H$  от его поверхности висит лампа силой света  $I$ . Определите: среднюю освещенность стола; во сколько раз средняя освещенность меньше максимальной; кривую светораспределения (индикатрису) лампы, при которой освещенность по поверхности стола постоянна.

**4.17.** В центре квадратной комнаты висит лампа. Считая лампу точечным источником света, найдите, на какой высоте от пола должна висеть лампа, чтобы освещенность в углах была максимальной.

**4.18.** Яркость граней светящегося куба одинакова и равна  $L = 5 \cdot 10^3 \frac{\text{кд}}{\text{м}^2}$ , ребро куба 20 см. В каком направлении сила света куба максимальна и чему она равна?

**4.19.** Освещенность поверхности Земли в точке нормального падения лучей  $E_{\text{max}} = 10 \cdot 10^4\text{ лк}$ . Полагая, что излучение Солнца подчиняется закону Ламберта, и пренебрегая поглощением света в атмосфере, определите яркость Солнца и среднюю освещенность Земли. Расстояние от Солнца до Земли  $R_{\text{С-З}} = 1,5 \cdot 10^8\text{ км}$ , диаметр Солнца  $D_{\text{С}} = 1,4 \cdot 10^6\text{ км}$ , коэффициент отражения земной поверхности  $\rho = 0,8$ .

## РАДИОАКТИВНОСТЬ И СТРОИТЕЛЬНОЕ ДЕЛО

После открытия рентгеновских лучей (1895 г.) на эмоциональном подъеме велись поиски других (возможно, неизвестных) видов излучений. Часть вновь открытых излучений была быстро закрыта. Иная судьба ожидала открытие радиоактивного излучения Анри Беккерелем 1 марта 1896 г. Следующие шаги в изучении радиоактивности были сделаны членами семьи Кюри: Мария Склодовская-Кюри, Пьер Кюри, Фредерик и Ирен Жолио-Кюри; Резерфордом и сотрудниками. Физиологическое действие радиоактивности было независимо обнаружено П. Кюри и А.Беккерелем в 1901г.

С производством  $^{234}\text{Pu}$  и  $^{233}\text{U}$  тесно связано получение техногенных радиоактивных нуклидов, которые стали применять для научных исследований в науке и промышленности. Этот метод получил название метода радиоактивных индикаторов (метод меченых атомов). Радиоактивные индикаторы используются при изучении взаимодействия цемента и бетона с водой и различными растворенными в ней веществами ( $^{35}\text{SO}_4$ ;  $^{22}\text{Na}$ ;  $^{45}\text{Ca}$  и др.); кинетики гидратации цементного клинкера; механизма физико-химических процессов при производстве цемента; для исследования пористости искусственного строительного камня. Радиоактивные индикаторы используются для проверки работы вентиляции и отопительных систем; исследования грунта; при строительстве гидросооружений и т.д.

В 60-70-х годах 20-го века было показано, что все строительные материалы в большей или меньшей степени радиоактивны. Были разработаны нормативные документы, регламентирующие удельную активность по нуклидам  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{40}\text{K}$ , а также по поступлению радона из грунта под зданиями и сооружениями.

### Основные формулы

1. Закон радиоактивного распада:  $N_{ост} = N_0 \cdot e^{-\lambda t} = N_0 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}$ .
2. Активность:  $A = \frac{dN}{dt}$ ;  $A_{y0} = \frac{1}{m} \frac{dN}{dt}$ ;  $A_t = A_0 e^{-\lambda t}$ .
3. Постоянная радиоактивного распада:  $\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$ .
4. Поглощенная доза:  $D = \frac{\Delta E}{\Delta M} = \frac{1}{m} (N_\alpha \varepsilon_\alpha + N_\beta \varepsilon_\beta + N_\gamma \varepsilon_\gamma)$ .

## Образцы решения задач

1. Исследование пробы материала на радиоактивность показало, что удельная активность по нуклиду  $^{232}\text{Th}$  равна  $259 \frac{\text{Бк}}{\text{кг}}$ . Посчитайте массу тория в 1 кг пробы. Период полураспада  $T_{1/2} = 1,4 \cdot 10^9 \text{ лет}$ .

Дано:

$$M = 232 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}},$$

$$T_{1/2} = 1,4 \cdot 10^9 \text{ лет},$$

$$A = 259 \frac{\text{Бк}}{\text{кг}}.$$

Решение:

$N = \frac{m}{M} N_A$ ,  $N$  - число атомов  $^{232}\text{Th}$  пробы в момент измерения его активности.

$$m = \frac{M}{N_A} N, \frac{dN}{dt} = A = \lambda \cdot N, \quad \lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$$

Найти:  $m$ -?

$$m = \frac{A \cdot M}{N_A \cdot \ln 2} \cdot T_{1/2}$$

$$m = \frac{259 \cdot 232 \cdot 10^{-3}}{6,02 \cdot 10^{23} \cdot 0,693} \cdot 1,4 \cdot 10^9 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600 = 6,4 \cdot 10^{-6} \text{ кг}$$

2. Зимним днем 1970 г. английский рабочий Раймонд Суит, занятый на торфоразработках, в одной из дренажных канав на большой глубине под торфом обнаружил доску. Так была открыта самая древняя дорога через болото – дорога Суита. Радиоуглеродный анализ показал, что концентрация радиоуглерода  $^{14}\text{C}$  в углеводе, полученном из досок, равна 7,4 распадам в минуту на один грамм углерода. Концентрация  $^{14}\text{C}$  в живых растениях соответствует 15,3 распадам в минуту. Исходя из этих данных, оцените, сколько лет назад была построена «дорога Суита». Период полураспада радиоуглерода  $T_{1/2} = 5730 \text{ лет}$  [3].

Дано:

$$A_0 = (15,30 \pm 0,1) \frac{\text{Бк}}{\text{мин} \cdot \text{г}},$$

Решение:

$$A_t = A_0 e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t}, \quad t = \frac{\ln \frac{A_0}{A_t}}{0,693} \cdot T_{1/2},$$

$$A_t = (7,4 \pm 0,1) \frac{\text{Бк}}{\text{мин} \cdot \text{г}}, \quad t = \frac{\ln \frac{15/3}{7,4}}{0,693} \cdot 5730 \approx 6000(\text{лет}).$$

$$T_{1/2} = 5730 \text{лет}.$$

Найти:  $t = ?$

## Задачи для самостоятельной работы

### Задачи

**5.1.** Начальная удельная активность нуклида  $^{232}\text{Th}$  в образце оказалась равной  $3700 \frac{\text{Бк}}{\text{кг}}$ ;  $2240 \frac{\text{Бк}}{\text{кг}}$ ;  $740 \frac{\text{Бк}}{\text{кг}}$ ;  $370 \frac{\text{Бк}}{\text{кг}}$ . Через какое время она снизится до регламентируемой нормы  $259 \frac{\text{Бк}}{\text{кг}}$ ? Период полураспада  $T_{1/2} = 1,4 \cdot 10^9$  лет.

**5.2.** Начальная удельная активность некоторого материала по нуклиду  $^{226}\text{Ra}$  оказалась равной  $3700 \frac{\text{Бк}}{\text{кг}}$ ;  $2240 \frac{\text{Бк}}{\text{кг}}$ ;  $740 \frac{\text{Бк}}{\text{кг}}$ . Через какое время она снизится до регламентируемой нормы  $340 \frac{\text{Бк}}{\text{кг}}$ ? Период полураспада  $T_{1/2} = 1600$  лет.

**5.3.** Начальная удельная активность горной породы по нуклиду  $^{40}\text{K}$  оказалась равной  $\geq 50 \cdot 10^3 \frac{\text{Бк}}{\text{кг}}$ . Через сколько лет можно будет использовать этот материал в строительстве, если регламентированная норма по нуклиду  $^{40}\text{K}$  –  $48,1 \cdot 10^3 \frac{\text{Бк}}{\text{кг}}$ . Период полураспада  $T_{1/2} = 1,3 \cdot 10^9$  лет.

**5.4.** Значения удельных активностей некоторых материалов, используемых в строительстве, приведены в таблице.

Гранит (Россия)	Зольная пыль (Германия)	Глиноземы (Швеция)	Фосфогипс (Германия)	Кальций-силикатный шлак (США)	Отходы урановых предприятий
$450 \frac{\text{Бк}}{\text{кг}}$	$341 \frac{\text{Бк}}{\text{кг}}$	$496 \frac{\text{Бк}}{\text{кг}}$	$574 \frac{\text{Бк}}{\text{кг}}$	$2140 \frac{\text{Бк}}{\text{кг}}$	$4625 \frac{\text{Бк}}{\text{кг}}$

Считая, что их активность обусловлена главным образом по отдельности нуклидами либо  $^{232}\text{Th}$ , либо  $^{226}\text{Ra}$ , определите время, спустя которое их можно будет использовать после начального получения. Регламентированная норма по  $^{232}\text{Th}$  -  $259 \frac{\text{Бк}}{\text{кг}}$ , период полураспада  $T_{1/2} = 1,4 \cdot 10^9$  лет. Регламентированная норма по  $^{226}\text{Ra}$  -  $340 \frac{\text{Бк}}{\text{кг}}$ , период полураспада  $T_{1/2} = 1600$  лет.

**5.5.** В воздухе помещения обнаружены нуклиды  $^{222}\text{Rn}$  с периодом полураспада  $T_{1/2} = 3,825$  сут и  $^{220}\text{Rn}$  с периодом полураспада  $T_{1/2} = 55,6$  сек. Вычислите, какая доля нуклидов распадается за сутки. Чему равна активность в помещении через сутки, если в начальный момент равновесная объемная активность в воздухе была равна  $10000 \frac{\text{Бк}}{\text{м}^3}$ . Регламентированная норма  $100 \frac{\text{Бк}}{\text{м}^3}$ . Примечание: учесть, что естественная концентрация нуклида  $^{220}\text{Rn}$  приблизительно в 20 раз больше, чем  $^{222}\text{Rn}$ .

**5.6.** Тело среднего человека массой 70 кг содержит примерно 140 г калия, 0,01 % которого радиоактивна. Посчитайте активность радионуклида  $^{40}\text{K}$  и дозу внутреннего облучения за сутки. Период полураспада радиоактивного калия  $T_{1/2} = 1,3 \cdot 10^9$  лет. Энергия  $\beta$ -частицы равна  $\varepsilon_{\beta} = 0,0118$  МэВ.

**5.7.** За 4 суток активность радионуклида уменьшилась в 54,5 раза. Чему будет равен период полураспада?

**5.8.** При распаде крупинки радиоактивного полония  $^{218}_{84}\text{Po}$  массой  $m = 385$  мг в течение 0,5 часа образовался гелий, который при нормальных условиях занял объем  $39,5 \text{ см}^3$ . Определите период полураспада нуклида полония  $^{218}_{84}\text{Po}$ .

**5.9.** В глобальных выпадениях радиоактивных нуклидов больше всех присутствует  $^{137}\text{Cs}$  с периодом полураспада  $T_{1/2} = 30$  лет. Через сколько лет территория окажется практически безопасной?

**5.10.** В комнате радиоактивность, созданная радоном  $^{220}\text{Rn}$  с периодом полураспада  $T_{1/2} = 3,825$  сут, оценивается значениями  $A = 10000 \frac{\text{Бк}}{\text{м}^3}$ ;  $A = 100 \frac{\text{Бк}}{\text{м}^3}$  (норма). Какую дозу облучения получит человек за 1 час, вдыхая воздух, обогащенный этим нуклидом? За сутки? Масса человека 70 кг. Энергия  $\alpha$ -частицы равна  $\varepsilon_{\alpha} = 6,404$  МэВ.

**5.11.** Из ядра атома радия вылетает  $\alpha$ -частица со скоростью  $1,52 \cdot 10^4 \frac{\text{км}}{\text{с}}$ .

При какой температуре атомы гелия  ${}^4_2\text{He}$  будут иметь такую же среднюю скорость поступательного теплового движения?

**5.12.** В пещере Леско вблизи Монтиньяка во Франции сохранились рисунки, сделанные доисторическим человеком. Там же в пещере были обнаружены древесные угли из когда-то горевших очагов. Допуская, что очагами пользовались художники, оцените возраст рисунков. Остаточная активность радиоуглерода  ${}^{14}\text{C}$  в углях очага равна 2,37 распадам в минуту на 1 грамм углерода. Активность  ${}^{14}\text{C}$  в живых растениях соответствует  $15,3 \pm 0,1$  распадам в минуту на 1 грамм углерода. Период полураспада радиоактивного углерода  $T_{1/2} = 5730$  лет. Оцените неопределенность возраста рисунков.

**5.13.** В пещере Форт-Рок (штат Оригона) было обнаружено 300 веревочных сандалий. Эта пещера была засыпана во время извержения вулкана. Для установления времени, когда это произошло, использовали метод радиоактивного датирования по радионуклиду  ${}^{14}\text{C}$ , период полураспада радиоуглерода  $T_{1/2} = 5730$  лет. При этом методе образец, содержащий около 30 граммов углерода, сжигают до двуокиси углерода, который затем восстанавливают до элементарного углерода в виде сажи. После этого определяют  $\beta$ -активность элементарного углерода. Она оказалась равной 5,12 распадам в минуту на 1 грамм углерода. При сравнении с  $\beta$ -активностью углерода, содержащегося в настоящее время в живых организмах, она равна  $15,3 \pm 0,1$  распадам в минуту на 1 грамм углерода. По этим приведенным данным определите, сколько лет назад произошло извержение вулкана.

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ ДЕЛО

Электромагнитные излучения — это распространяющиеся в пространстве электромагнитные волны, излучаемые различными объектами.

Электромагнитное взаимодействие между предметами подчиняется электромагнитной теории, базирующейся на уравнениях Максвелла. Тот предположил, что электрическое и магнитное поля имеют замкнутые силовые линии — вектора напряженности, колеблющиеся перпендикулярно направлению распространения волны. Эти распространяющиеся в пространстве волны создают электромагнитное поле. Позднее их существование и волновая природа были доказаны экспериментально.

Электрические поля возникают при разнице электрических напряжений, например, при появлении в атмосфере заряженных частиц во время грозы. Вокруг движущихся зарядов возникают магнитные поля, которые возбуждают вихревое электрическое поле.

### Основные формулы

1. Плотность тока проводимости  $j_{\text{пр}} = \sigma \cdot E_0 e^{i\omega t}$ .
2. Плотность тока смещения  $j_{\text{см}} = i \cdot \omega \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot E_0 e^{i\omega t}$ .
3. Безразмерное отношение среды (проводник, диэлектрик)  
$$\text{б. о.} = \frac{\gamma_{\text{пр}}}{\gamma_{\text{см}}} = \frac{\sigma}{\omega \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0}$$
4. Толщина скин-слоя  $\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu \cdot \mu_0 \cdot \sigma}}$ .
5. Вектор Пойнтинга (плотность потока энергии электромагнитного поля)  
$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} = w_{EH} \cdot \vec{v}$$
6. Характеристический импеданс среды  $Z = \sqrt{\frac{\mu \mu_0}{\varepsilon \varepsilon_0}}$ .

### Образцы решения задач

1. Удельная проводимость среды  $\sigma = 0,1 \frac{\text{Сименс}}{\text{см}}$ , диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon = 50$  (не зависит от частоты) и магнитная проницаемость

$\mu=1$ . Определите, является ли среда проводником или диэлектриком на частотах: а)  $\nu_1 = 60 \text{ кГц}$ ; б)  $\nu_2 = 10^9 \text{ Гц}$ ; в)  $\nu_3 = 2 \cdot 10^{10} \text{ Гц}$ .

Дано:

Решение:

$$\sigma = 0,1 \frac{\text{Сименс}}{\text{см}},$$

$$\varepsilon = 50,$$

$$\mu = 1,$$

а)  $\nu_1 = 60 \text{ кГц}$ ,

б)  $\nu_2 = 10^9 \text{ Гц}$ ,

в)  $\nu_3 = 2 \cdot 10^{10} \text{ Гц}$ .

Из формулы (п.3)  $\bar{\sigma}.o. = \frac{\sigma}{\omega \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0}$ , где  $\omega = 2\pi \cdot \nu$ , имеем

$$\text{а) } \bar{\sigma}.o. = \frac{0,1}{2\pi \cdot 6 \cdot 10^3 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 50} \approx 6000 (\text{проводник}).$$

$$\text{б) } \bar{\sigma}.o. = \frac{0,1}{2\pi \cdot 10^9 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 50} \approx 0,04 (\text{квазипроводник}).$$

$$\text{в) } \bar{\sigma}.o. = \frac{0,1}{2\pi \cdot 2 \cdot 10^{10} \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 50} \approx 1,8 \cdot 10^{-3} (\text{диэлектрик}).$$

Найти:  $\bar{\sigma}.o.$ -?

2. В некоторой среде распространяется плоская электромагнитная волна частоты  $\omega$ . Диэлектрическая проницаемость при частоте  $\omega$  равна  $\varepsilon = 2$ , и магнитная проницаемость практически равна 1. Найти вектор Пойнтинга  $\vec{S}$  в той точке, в которой электрический вектор  $\vec{E}$  изменяется по закону  $\vec{E} = 10,0 \cos(\omega t + \alpha) \cdot \vec{e}_z \left( \frac{B}{M} \right)$ . Вектор  $\vec{H}$  колеблется вдоль оси  $OX$ .

Дано:

Решение:

$$\varepsilon = 2 ; \quad \varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{M},$$

$$\mu = 1 ; \quad \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Гн}{M},$$

$$\vec{E} = 10,0 \cos(\omega t + \alpha) \cdot \vec{e}_z \left( \frac{B}{M} \right).$$

Из формулы (п. 5)  $\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$ .

Магнитный вектор в волне имеет вид

$$\vec{H} = H_m \cos(\omega t + \alpha) \cdot \vec{e}_x \left( \frac{A}{M} \right)$$

Найти:  $\vec{S}$ -?

Амплитудные значения в волне связаны соотношением  $\varepsilon_0 E_m^2 = \mu \mu_0 H_m^2$ , откуда

$$H_m = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu \mu_0}} \cdot E_m = \frac{E_m}{Z},$$

где  $Z$  - характеристический импеданс.

$$\vec{S} = 10,0 \cos(\omega t + \alpha) \cdot \frac{10,0}{Z} \cos(\omega t + \alpha) (\vec{e}_z \times \vec{e}_x)$$

$$\vec{e}_z \times \vec{e}_x = \vec{e}_y$$

$$\vec{S} = 0,375 \cos^2(\omega t + \alpha) \vec{e}_y \left( \frac{Bm}{M^2} \right)$$

## Задачи для самостоятельной работы

### Задачи

**6.1.** Построены два помещения из материалов, различающихся физическими свойствами. Материал первого помещения характеризуется проводимостью  $\sigma_1 = 5 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Сименс}}{\text{м}}$ ,  $\varepsilon_1 = 4$ . Материал второго помещения характеризуется проводимостью  $\sigma_2 = 1 \cdot 10^7 \frac{\text{Сименс}}{\text{м}}$ ,  $\varepsilon_2 = 1$ . Будет ли работать телевизор с комнатной антенной в таких помещениях? Частота телесигнала  $\nu = 2 \cdot 10^8 \text{ Гц}$ , значение  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}}$ .

**6.2.** Цементный камень (воздушно-сухой) характеризуется проводимостью  $\sigma$  в интервале значений  $(5 \cdot 10^{-9} - 1 \cdot 10^{-4}) \frac{\text{Сименс}}{\text{м}}$  и диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon = 5$ . Найдите значения крайних частот переменного электромагнитного поля, при которых стена из такого материала оказывается непрозрачной; прозрачной.

**6.3.** Удельная проводимость материала стены  $\sigma = 0,1 \frac{\text{Сименс}}{\text{см}}$ , относительная диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon = 50$  и относительная магнитная проницаемость  $\mu = 1$ . Определите, является ли среда проводником или диэлектриком на частотах  $\nu_1 = 50 \text{ кГц}$  и  $\nu_2 = 10^4 \text{ МГц}$ .

**6.4.** Плоская электромагнитная волна  $\nu = 1 \cdot 10^{10} \text{ Гц}$  распространяется в слабо проводящей среде с удельной проводимостью  $\sigma = 0,01 \frac{\text{Сименс}}{\text{см}}$  и диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon = 9$ . Найдите отношение амплитуд плотностей токов проводимости и смещения.

**6.5.** Электрические и магнитные свойства воды в Атлантическом океане характеризуются следующими параметрами:  $\varepsilon = 81$ ,  $\mu = 1$ ,  $\sigma = 4,3 \frac{\text{Сименс}}{\text{м}}$ .

Покажите, что вода в океане ведет себя как проводник на частоте  $\nu \approx 10 \text{ МГц}$ . Какова наибольшая длина электромагнитных волн, которые могут распространяться под водой?

**6.6.** На частоте  $\nu = 1 \cdot 10^{15} \text{ Гц}$  вода ведет себя как диэлектрик. Относительная проницаемость воды на этих частотах  $\epsilon_r = n^2 = (1,33)^2$ , а  $\mu_r = 1$ . Определите численное значение проводимости  $\sigma$ .

**6.7.** Плоская электромагнитная волна распространяется вдоль оси  $OX$ . Амплитуда напряженности электрического поля волны  $E_0 = 0,38 \frac{\text{В}}{\text{м}}$ , амплитуда напряженности магнитного поля волны  $H_0 = 1 \frac{\text{мА}}{\text{м}}$ . Определите энергию, перенесенную волной за время  $\tau = 10 \text{ мин}$  через площадку, расположенную перпендикулярно оси  $OX$ , площадью поверхности  $F = 15 \text{ см}^2$ . Период колебаний  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  в волне  $T \ll \tau$ .

**6.8.** В вакууме вдоль оси  $OX$  распространяется плоская электромагнитная волна. Амплитуда напряженности электрического поля волны  $E_0 = 50 \frac{\text{мВ}}{\text{м}}$ . Определите интенсивность волны  $I$ , т.е. среднюю энергию, проходящую через единицу поверхности в единицу времени.

**6.9.** В вакууме вдоль оси  $OX$  распространяется плоская электромагнитная волна. Амплитуда напряженности магнитного поля волны  $H_0 = 5 \frac{\text{мА}}{\text{м}}$ . Определите интенсивность волны  $I$ , т.е. среднюю энергию, проходящую через единицу поверхности в единицу времени.

**6.10.** Радиолокатор работает в интервале частот  $(1 \div 3) \cdot 10^{10} \text{ Гц}$ . Какова должна быть минимальная толщина скин-слоя из алюминия  $\sigma = 3,5 \frac{\text{Сименс}}{\text{м}}$  для защиты здания от излучения со стороны радиолокационной станции (РЛС)?

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 23-101-2004 Проектирование тепловой защиты зданий [Текст] / Госстрой России. – М.: ФГУП ЦПП, 2004. – 186 с.
2. СП 22.13330.2011 Основание зданий и сооружений.
3. СНиП 23.01-99. Строительная климатология [Текст] - М.: Госстрой РФ, 1999.
4. СНиП 23.02-2003. (СП 55.13330.2011) Тепловая защита зданий. -М.: Госстрой РФ, 2003.
5. Стецкий, С.В. Строительная физика [Электронный ресурс] : краткий курс лекций для студентов бакалавриата, обучающихся по направлению 270800 «Строительство» / М-во образования и науки Рос. Федерации, Моск. гос. строит. ун-т, каф. архитектуры гражданских и промышленных зданий; сост. С.В. Стецкий, К.О. Ларионова. — Москва : МГСУ, 2014. – 57 с. Режим доступа: <https://www.iprbookshop.ru/epd-reader?publicationId=27466>
6. Черныш, Н.Д. Строительная физика: учебное пособие / Н.Д. Черныш, В.Н. Тарасенко. — Белгород: Изд-во БГТУ, 2009. — 238 с.
7. Викторова О.Л. Строительная физика: курс лекций: учеб. пособие по направлению подготовки 08.03.01 «Строительство» / О.Л. Викторова. – Пенза: ПГУАС, 2016. – 88 с.

