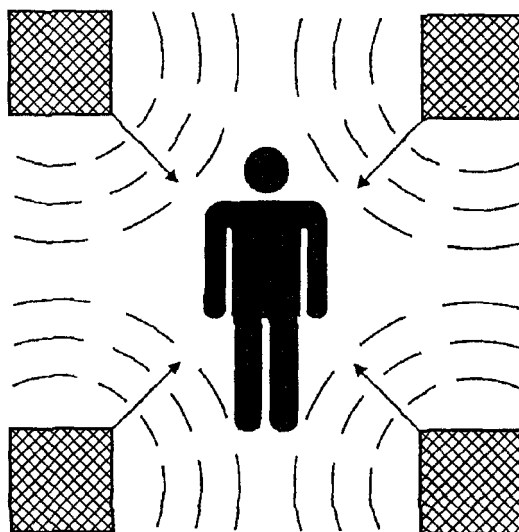


**Е. А. Вощукова**

**ПРАКТИКУМ  
ПО ФИЗИЧЕСКИМ ОСНОВАМ  
СТРОИТЕЛЬНОЙ АКУСТИКИ**



**Брянск 2018**



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Брянский государственный инженерно-технологический университет»

**Вощукова Е.А.**

**ПРАКТИКУМ  
ПО ФИЗИЧЕСКИМ ОСНОВАМ  
СТРОИТЕЛЬНОЙ АКУСТИКИ**

Учебное пособие для студентов направления подготовки бакалавров  
08.03.01 Строительство  
очной и заочной форм обучения

Утверждено в качестве учебного пособия  
научно-методическим советом БГИТУ  
Протокол № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ 2018 г.

Брянск 2018

УДК 534(075.8)

ББК 38.113

В 79

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой  
«Строительное производство» БГИТУ *В.В. Плотников*  
кандидат физико-математических наук, доцент *Г. Д. Алексеева*

Вощукова, Е. А. Практикум по физическим основам строительной акустики: учебное пособие для студентов направления подготовки бакалавров 08.03.01 Строительство (очной и заочной форм обучения)/ Е. А. Вощукова. – Брянск : БГИТУ, 2018. – 89 с.

Учебное пособие представляет собой практикум по использованию теоретических знаний, полученных студентами в процессе изучения дисциплины «Физические основы строительной акустики», для решения конкретных физических и прикладных задач.

В пособии представлены тесты, задачи и задания расчетно-графической работы по основным разделам дисциплины, приведены примеры решения задач и указания по выполнению расчетно-графической работы.

Для студентов направления подготовки бакалавров 08.03.01 Строительство (очной и заочной форм обучения).

Рекомендовано редакционно-издательской и методической комиссиями факультета общенаучной подготовки и повышения квалификации БГИТУ

Протокол № \_\_\_\_ от " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2018 г.

© Брянский  
государственный  
инженерно-  
технологический  
университет, 2018  
© Е.А. Вощукова, 2018

## ОГЛАВЛЕНИЕ

	стр.
ВВЕДЕНИЕ .....	4
ЗАДАЧИ И ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ .....	6
1 Физические основы акустики .....	6
1.1 Звуковые волны .....	6
1.2 Энергия и спектр звуковых волн .....	12
1.3 Восприятие звука человеком .....	20
1.4 Источники и приемники звука .....	26
1.5 Отражение и преломление звуковых волн .....	34
2 Элементы архитектурной акустики .....	47
2.1 Волновая теория распространения звука в ограниченном пространстве .....	47
2.2 Статистический метод расчета звукового поля в помещении .....	52
3 Проблемы борьбы с шумом .....	60
3.1 Источники шума. Классификация шумов .....	60
3.2 Действие шума на организм человека. Контроль уровня шума .....	62
3.3 Методы и средства защиты от шума .....	63
РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКАЯ (КОНТРОЛЬНАЯ) РАБОТА .....	67
1 Определение параметров звуковой волны .....	68
2 Определение суммарного уровня звукового давления для нескольких источников звука .....	71
3 Отражение плоской звуковой волны от плоской поверхности с конечным импедансом .....	73
4 Прохождение звуковой волны через слой материала .....	75
5 Определение собственных (резонансных) частот прямоугольного помещения .....	77
6 Оценка времени реверберации учебной аудитории .....	80
7 Расчет кривой поглощения резонансного звукопоглотителя ...	84
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....	88

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных профессиональных задач инженера-строителя является создание оптимальной среды для жизни и деятельности человека. Важными характеристиками свойств среды, определяющей уровень комфорта, являются качество восприятия звука и уровень шума, возникающего в помещении или проникающего в него извне. Данные вопросы являются предметом архитектурно-строительной акустики.

Целью курса «Физические основы строительной акустики» является изучение основ *физической акустики*: характеристик звуковых волн, процессов их распространения в открытом пространстве и в ограниченном объеме, явлений, связанных с отражением и поглощением звука на границе двух сред, особенностей слухового восприятия, механизмов излучения звука. Понимание физической сущности этих явлений и процессов, освоение физических методов расчета звукового поля в открытом пространстве и в помещении должны стать *научной основой* для решения прикладных задач акустики в области строительства и архитектуры.

В курсе показано, как, используя основные законы и методы физической акустики, можно оценить качество восприятия речи и музыки в различных помещениях, как влияют на акустику залов, студий, аудиторий их форма, размеры и используемые при отделке материалы, как рассчитать уровень шума в помещении и вне его, какие физические явления используются для защиты от шума.

Структура дисциплины выглядит следующим образом:

1. Физические основы акустики (звуковые волны и их основные характеристики, энергия и спектр звуковых сигналов, восприятие звука человеком, источники и приемники звука, отражение и поглощение звуковых волн);
2. Элементы акустики помещений (основные физические методы расчета звукового поля в помещении, определение резонансных частот, оценка времени реверберации);
3. Проблемы борьбы с шумом (классификация шумов, источники шума, влияние шума на организм человека, принципы нормирования шумового воздействия, методы и средства защиты от шума).

Знания, полученные студентами в процессе освоения курса «Физические основы строительной акустики», служат основой для изучения таких дисциплин, как «Экология», «Безопасность жизнедеятельности», «Основы архитектуры и строительных конструкций», «Архитектура гражданских и промышленных зданий и сооружений», «Основы проектирования зданий и сооружений», «Реконструкция зданий, сооружений и застройки» и будущей профессиональной деятельности.

Настоящее издание представляет собой практикум по применению теоретических сведений, изложенных автором в учебном пособии «Физические основы строительной акустики», для решения конкретных физических и прикладных задач.

В первом разделе для каждой темы курса приведены основные определения и формулы, рассмотрены примеры выполнения тестовых заданий и решения задач, предлагаются тесты и задачи для самостоятельного решения.

Второй раздел посвящен расчетно-графической работе, которую выполняют студенты при изучении дисциплины «Физические основы строительной акустики». Расчетно-графическая работа состоит из семи заданий по основным темам курса. Для каждого задания приведены условие, таблица числовых данных (25 вариантов) и подробные указания по выполнению задания.

# ЗАДАЧИ И ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ

## 1 ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АКУСТИКИ

### 1.1 Звуковые волны

• *Звук* (звуковые волны) – это процесс распространения упругих колебаний малой амплитуды в сплошной среде.

• Скорость звука  $c$  зависит от плотности и упругих свойств среды. Скорость звука в газах равна:

$$c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}},$$

где  $\gamma$  – коэффициент Пуассона (для воздуха – 1,4),  $R = 8,31 \text{ Дж/моль} \cdot \text{К}$  – универсальная газовая постоянная,  $M$  – молярная масса газа (для воздуха  $M = 0,029 \text{ кг/моль}$ ),  $T = t + 273$  – температура воздуха (К).

Скорость звука в воздухе при комнатной температуре  $c = 340 \text{ м/с}$ .

• Длина звуковой волны равна:

$$\lambda = \frac{c}{f},$$

где  $f$  – частота звука.

• *Звуковое давление*  $p = p(x, y, z, t)$  – физическая величина, равная разности давления в данной точке звукового поля и равновесного давления (давления в данной точке среды в отсутствие звука).

• Уравнение плоской гармонической звуковой волны, распространяющейся вдоль оси  $Ox$ :

$$p = p_{\max} \cos(\omega t - kx),$$

где  $p_{\max}$  – амплитуда колебаний звукового давления;  $\omega = 2\pi f$  – циклическая частота;  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число.

• *Волновое сопротивление* (акустический импеданс) среды  $\rho_0 c$  – величина, равная произведению плотности среды на скорость звука в данной среде. Для воздуха при комнатной температуре волновое сопротивление равно  $415 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$ .

Волновое сопротивление равно отношению звукового давления к колебательной скорости частиц среды:

$$\rho_0 c = \frac{p}{v}.$$



### **Примеры тестовых заданий**

1. Звуковое давление – это ...

- 1) амплитуда колебаний давления в звуковой волне
- 2) наименьшее давление на барабанную перепонку, вызывающее ощущение звука
- 3) разность между давлением в звуковой волне и давлением в данной среде в отсутствие звука
- 4) сила, с которой звуковая волна действует на препятствие

Решение: Звуковым давлением называется физическая величина, равная разности давления в данной точке звукового поля и равновесного давления (давления в данной точке среды в отсутствие звука).

2. Скорость звука в воздухе при нормальных условиях равна ...

- 1)  $c = 300\,000\text{ км/с}$     2)  $c = 330\text{ км/с}$     3)  $c = 330\text{ км/ч}$     4)  $c = 330\text{ м/с}$

Решение: При нормальных условиях ( $P_0 = 1,013 \cdot 10^5\text{ Па}$  и  $T = 273\text{ К}$ ) скорость звука в воздухе  $c = 330\text{ м/с}$

3. Волновым сопротивлением среды называется ...

- 1) отношение звукового давления к колебательной скорости частиц в волне
- 2) величина, которая показывает, во сколько раз среда ослабляет силу звука
- 3) энергия, переносимая звуковой волной в единицу времени через единицу площади
- 4) масса единицы объема среды

Решение: Волновое сопротивление среды - это величина, равная отношению звукового давления к колебательной скорости частиц в волне. Можно показать, что это величина численно равна произведению плотности среды на скорость звука в данной среде.

4. Длина (в см) звуковой волны с частотой колебаний  $1000\text{ Гц}$ , распространяющейся в воздухе при комнатной температуре, равна...

Ответ: .....

Решение: Длина звуковой волны  $\lambda$  связана с частотой  $f$  и скоростью звука  $c$  соотношением  $\lambda = c/f$ . Так как скорость звука в воздухе при комнатной температуре  $c = 340\text{ м/с}$ , то  $\lambda = 0,34\text{ м} = 34\text{ см}$ .

### **Примеры решения задач**

1. Частотный диапазон слышимого звука от 16 Гц до 20 кГц. Определить соответствующий диапазон длин звуковых волн в воздухе при комнатной температуре.

Решение: Скорость звука в воздухе при комнатной температуре равна  $c = 340 \text{ м/с}$ . Длина звуковой волны  $\lambda$  связана с частотой  $f$  и скоростью звука  $c$  соотношением  $\lambda = c/f$ .

Следовательно,  $\lambda_{\max} = c/f_{\min} = 340/16 = 21,25 \text{ м}$ , а  $\lambda_{\min} = c/f_{\max} = 340/20000 = 0,017 \text{ м} = 17 \text{ мм}$ .

2. Определить скорость звука в воздухе при температурах  $20^\circ\text{C}$  и  $-20^\circ\text{C}$ .

Решение: Скорость звука в газах равна:

$$c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}},$$

где  $\gamma$  - коэффициент Пуассона (для воздуха – 1,4),  $R = 8,31 \text{ Дж/моль} \cdot \text{K}$  – универсальная газовая постоянная,  $M = 0,029 \text{ кг/моль}$  – молярная масса воздуха,  $T = t + 273$  – температура воздуха (K).

Следовательно,

$$c_1 = \sqrt{\frac{\gamma RT_1}{M}} = \sqrt{\frac{1,4 \cdot 8,31 \cdot (20 + 273)}{0,029}} \approx 343 \text{ м/с};$$

$$c_2 = \sqrt{\frac{\gamma RT_2}{M}} = \sqrt{\frac{1,4 \cdot 8,31 \cdot (-20 + 273)}{0,029}} \approx 319 \text{ м/с}.$$

3. Чему равно волновое сопротивление воды, если известно, что скорость звука в воде  $1500 \text{ м/с}$ , а плотность воды составляет  $1000 \text{ кг/м}^3$ ?

Решение: Волновое сопротивление среды равно произведению плотности среды на скорость звука в данной среде:

$$\rho_0 c = 1000 \cdot 1500 = 1,5 \cdot 10^6 \text{ кг/м}^2 \text{с}.$$

4. Определить волновое сопротивление воздуха при комнатной температуре.

Решение: Волновое сопротивление среды равно произведению плотности среды на скорость звука в данной среде.

Из уравнения Менделеева-Клапейрона следует, что плотность воздуха при атмосферном давлении ( $P_0 = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ):

$$\rho_0 = \frac{m}{V} = \frac{P_0 M}{RT},$$

где  $R = 8,31 \text{ Дж/моль}\cdot\text{К}$  – универсальная газовая постоянная,  $M = 0,029 \text{ кг/моль}$  – молярная масса воздуха,  $T$  – температура воздуха (К).

Скорость звука равна:

$$c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}.$$

Следовательно, волновое сопротивление воздуха:

$$\rho_0 c = \frac{P_0 M}{RT} \cdot \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} = P_0 \sqrt{\frac{\gamma M}{RT}}.$$

Учитывая, что комнатная температура  $t = 18^\circ\text{C}$ , получаем:

$$\rho_0 c = P_0 \sqrt{\frac{\gamma M}{RT}} = 1,013 \cdot 10^5 \sqrt{\frac{1,4 \cdot 0,029}{8,31 \cdot (18 + 273)}} = 415 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}.$$

5. Уравнение плоской гармонической звуковой волны, распространяющейся в воздухе при комнатной температуре, имеет вид:

$$p = 0,002 \cos(200\pi t - 0,588\pi x) \text{ Па}.$$

Определить частоту колебаний в волне, длину волны и амплитуду колебательной скорости частиц воздуха.

Решение: Запишем уравнение плоской гармонической волны в общем виде:

$$p = p_{\max} \cos(\omega t - kx).$$

Следовательно, амплитуда колебаний звукового давления равна  $p_{\max} = 0,002 \text{ Па}$ ; циклическая частота  $\omega = 2\pi f = 200\pi \text{ с}^{-1}$ ; волновое число  $k = 2\pi/\lambda = 0,588\pi \text{ м}^{-1}$ .

Таким образом, частота и длина волны равны:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = 100 \text{ Гц},$$

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} = 3,4 \text{ м}.$$

Так как волновое сопротивление среды  $\rho_0 c$  по определению равно отношению звукового давления к колебательной скорости, то амплитуда колебательной скорости частиц воздуха:

$$v_{\max} = \rho_0 c p_{\max} = 415 \cdot 0,002 = 0,083 \text{ м/с}.$$

Значение волнового сопротивления воздуха при комнатной температуре взято из предыдущей задачи.

### **Тестовые задания для самостоятельного выполнения**

#### **1. Звуковые волны**

1.1 Звук не может распространяться ...

- 1) в вакууме
- 2) в твердых телах
- 3) в жидкостях
- 4) в газах

1.2 Звуковые волны в воздухе являются ...

- 1) поперечными
- 2) продольными
- 3) сдвиговыми
- 4) поверхностными

1.3 Поперечные (сдвиговые) звуковые волны могут распространяться только ...

- 1) в жидкостях
- 2) в газах
- 3) в твердых телах
- 4) в вакууме

#### **2. Скорость звука**

2.1 Скорость звука в воздухе при комнатной температуре равна...

- 1)  $c = 300\,000\text{ км/с}$    2)  $c = 300\text{ км/с}$    3)  $c = 340\text{ м/с}$    4)  $c = 340\text{ км/ч}$

2.2 Скорость звука в воздухе при повышении температуры ...

- 1) увеличивается
- 2) уменьшается
- 3) не изменяется

2.3 При понижении температуры воздуха скорость звука ...

- 1) не изменяется
- 2) уменьшается
- 3) увеличивается

#### **3. Волновое сопротивление среды**

3.1 Волновое сопротивление воздуха при нормальных условиях равно ...

- 1)  $42\text{ кг/м}^2\text{с}$    2)  $420\text{ кг/м}^2\text{с}$    3)  $4200\text{ кг/м}^2\text{с}$    4)  $42000\text{ кг/м}^2\text{с}$

3.2 Скорость звука в воде равна  $1500\text{ м/с}$ , плотность воды  $1000\text{ кг/м}^3$ . Волновое сопротивление воды (в  $\text{кг/м}^2\text{с}$ ) равно ...

Ответ: .....

3.3 Волновое сопротивление воды равно  $1,5 \cdot 10^6\text{ кг/м}^2\text{с}$ , а ее плотность -  $1000\text{ кг/м}^3$ . Скорость звука в воде равна ...

Ответ: .....

#### 4. Частота звука и длина звуковой волны

4.1 Длина (в см) звуковой волны с частотой колебаний 100 Гц, распространяющейся в воздухе при комнатной температуре, равна...

Ответ: .....

4.2 Длина звуковой волны, распространяющейся в воздухе при комнатной температуре, равна 3,4 м. Частота колебаний в волне (в Гц) равна ...

Ответ: .....

4.3 Длина звуковой волны, распространяющейся в воздухе при комнатной температуре, равна 34 см. Частота колебаний в волне (в Гц) равна ...

Ответ: .....

#### **Задачи для самостоятельного решения**

1. Длина звуковой волны в воздухе при комнатной температуре для самого низкого мужского голоса достигает 4,3 м, а для самого высокого женского – 25 см. Чему равны частоты звуковых колебаний для этих голосов?

2. При какой температуре (в °С) скорость звука в воздухе удвоится по сравнению со скоростью при 0°С и при какой станет в два раза ниже?

3. Звук взрыва, произведенного в воде вблизи поверхности, приборы, установленные на корабле и принимающие звук, распространяющийся по воде, зарегистрировали на 45 секунд раньше, чем он пришел по воздуху. На каком расстоянии от корабля произошел взрыв?

4. Какая из величин и во сколько раз изменится при переходе звуковой волны из воздуха в воду – частота или длина волны?

5. Во сколько раз волновое сопротивление воды при температуре 0°С отличается от волнового сопротивления воздуха при той же температуре?

6. При какой температуре воздуха его волновое сопротивление равно  $420 \text{ кг/м}^2\text{с}$ ?

7. Влияет ли давление на скорость звука в газах? Ответ пояснить.

8. Зависит ли волновое сопротивление газов от давления? Ответ пояснить.

9. Во сколько раз отличаются скорости звука в воздухе и в гелии при одинаковой температуре?

10. Частота колебаний в плоской гармонической звуковой волне, распространяющейся в воздухе при комнатной температуре, равна 1500 Гц, амплитуда колебательной скорости частиц воздуха 25 мм/с. Найти длину звуковой волны, циклическую частоту, волновое число, амплитуду колебаний звукового давления. Записать уравнение волны (для колебательной скорости и звукового давления).

## 1.2 Энергия и спектр звуковых волн

• *Средняя плотность звуковой энергии* – это физическая величина, равная средней энергии звуковых колебаний в единице объема звукового поля:

$$\varepsilon = \frac{dW}{dV}.$$

Средняя плотность звуковой энергии связана с действующим (эффективным) звуковым давлением  $p = p_{\max}/\sqrt{2}$  и волновым сопротивлением среды  $\rho_0 c$ :

$$\varepsilon = \frac{p^2}{\rho_0 c^2}.$$

• *Интенсивность* звуковой волны (*сила звука*) – физическая величина, равная энергии, переносимой звуковой волной в единицу времени через единицу площади поверхности, перпендикулярной направлению распространения волны:

$$I = \frac{W}{St}.$$

В бегущей волне интенсивность связана со средней плотностью звуковой энергии и скоростью звука соотношением:

$$I = \varepsilon \cdot c.$$

На расстоянии  $r$  от точечного изотропного источника звука мощностью  $N$  интенсивность звуковой волны равна:

$$I = \frac{N}{4\pi r^2}.$$

• *Уровень звукового давления* в децибелах равен:

$$L_p = 20 \lg \frac{p}{p_0},$$

где  $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$  – порог слышимости на частоте  $1000 \text{ Гц}$ .

• *Уровень интенсивности* (силы звука) в децибелах равен:

$$L_I = 10 \lg \frac{I}{I_0},$$

где  $I_0 = 10^{-12} \text{ Вт/м}^2$  – сила звука, соответствующая порогу слышимости на частоте  $1000 \text{ Гц}$ .

• Уровень звукового давления численно равен уровню силы звука и называется *уровнем звука*  $L$  (в децибелах):

$$L = 10 \lg \frac{I}{I_0} = 20 \lg \frac{p}{p_0} \text{ дБ.}$$

• Если звуковое поле создается несколькими некогерентными источниками звука, суммарная интенсивность звука равна:

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_N,$$

где  $I_i$  – интенсивность звука, создаваемая в рассматриваемой точке  $i$ -м источником звука.

В этом случае результирующий (суммарный) уровень звука равен:

$$L = 10 \lg \left( \frac{I_1}{I_0} + \frac{I_2}{I_0} + \dots + \frac{I_N}{I_0} \right) = 10 \lg (10^{L_1/10} + 10^{L_2/10} + \dots + 10^{L_N/10}) \text{ дБ.}$$

• *Спектром* звукового сигнала называется зависимость амплитуд гармонических составляющих, на которые можно разложить звуковой сигнал, от частоты.

Периодические во времени звуковые сигналы (например, музыкальные звуки) имеют *дискретный* (*линейчатый*) спектр. Неупорядоченные во времени звуковые сигналы (шум) характеризуются *сплошным* спектром. В общем случае спектр звукового сигнала может быть *смешанным*: на фоне сплошного спектра выделяются отдельные гармонические составляющие. Такой спектр характерен, например, для речи.

### ***Примеры тестовых заданий***

1. Средняя плотность звуковой энергии – это ...

- 1) громкость звука
- 2) амплитуда звукового давления
- 3) звуковая энергия, переносимая звуковой волной в единицу времени через единицу площади поверхности, перпендикулярной направлению распространения волны
- 4) энергия звуковых колебаний в единице объема среды

Решение: Средняя плотность звуковой энергии  $\varepsilon$  – физическая величина, численно равная средней энергии звуковых колебаний в единице объема среды.

2. Уровень звука, соответствующий звуковому давлению 2 Па, равен ...

- 1) 80 дБ    2) 90 дБ    3) 100 дБ    4) 110 дБ    5) 120 дБ

Решение: Уровень звукового давления в децибелах равен:

$$L_p = 20 \lg \frac{p}{p_0},$$

где  $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$  – порог слышимости на частоте  $1000 \text{ Гц}$ .

Производим вычисления:

$$L_p = 20 \lg \frac{2}{2 \cdot 10^{-5}} = 20 \cdot 5 = 100 \text{ дБ}.$$

3. При увеличении расстояния от точечного источника звука в 2 раза сила звука ...

- 1) уменьшается в  $\sqrt{2}$  раз
- 2) уменьшается в 2 раза
- 3) уменьшается в 4 раза
- 4) уменьшается в 16 раз

Решение: Сила звука в сферической волне обратно пропорциональна

расстоянию от источника звука:  $I = \frac{N}{4\pi r^2}$ , где  $N$  – мощность источника.

Поэтому при увеличении  $r$  в 2 раза сила звука уменьшается в 4 раза.

4. Дискретный спектр характерен для ...

- 1) шума
- 2) периодических звуковых сигналов
- 3) непериодических звуковых сигналов
- 4) звуковых волн большой интенсивности

Решение: Дискретный (линейчатый) спектр характерен для периодических звуковых сигналов.

### ***Примеры решения задач***

1. Звуковое давление, соответствующее болевому порогу на частоте  $1000 \text{ Гц}$ , равно  $p = 200 \text{ Па}$ . Определить среднюю плотность звуковой энергии при данном значении давления в воздухе при комнатной температуре, силу звука и энергию, переносимую звуковой волной через поверхность площадью  $1 \text{ см}^2$  за  $2 \text{ мс}$ .

Решение: Средняя плотность звуковой энергии равна:

$$\varepsilon = \frac{p^2}{\rho_0 c^2},$$

где волновое сопротивление воздуха при комнатной температуре  $\rho_0 c = 415 \text{ кг/м}^2 \text{ с}$  (см. пример 4 из раздела 1.1), а скорость звука  $c = 340 \text{ м/с}$ .



Следовательно:

$$\varepsilon = \frac{4 \cdot 10^4}{415 \cdot 340} = 0,283 \text{ Дж/м}^3.$$

Сила звука (интенсивность звуковой волны):

$$I = \varepsilon c = 0,283 \cdot 340 = 96 \text{ Вт/м}^2,$$

а энергия, которую переносит волна через площадь  $S$  за время  $t$ , равна:

$$W = Ist = 96 \cdot 10^{-4} \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 19,2 \cdot 10^{-6} \text{ Дж} = 19,2 \text{ мкДж}.$$

2. Звуковая мощность голосового аппарата лектора  $N = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Вт}$ . Определить интенсивность прямого звука (речи лектора) и уровень звука в децибелах на расстоянии  $r = 10 \text{ м}$ .

Решение: Интенсивность звуковой волны равна:

$$I = \frac{N}{4\pi r^2} = \frac{2 \cdot 10^{-5}}{12,56 \cdot 100} = 0,16 \cdot 10^{-7} \text{ Вт/м}^2,$$

что соответствует уровню звука:

$$L = 10 \lg \frac{I}{I_0} = 10 \lg \frac{0,16 \cdot 10^{-7}}{10^{-12}} = 42 \text{ дБ}.$$

3. Минимальное звуковое давление, которое воспринимается человеческим ухом (порог слышимости) на частоте  $1000 \text{ Гц}$  равно  $2 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$ , а максимальное звуковое давление (болевой порог) –  $200 \text{ Па}$ . Определить соответствующие уровни звука в децибелах.

Решение: Уровень звука в децибелах равен:

$$L_p = 10 \lg \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \lg \frac{p}{p_0},$$

где  $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$  – порог слышимости на частоте  $1000 \text{ Гц}$ .

Следовательно, уровень звука, соответствующий порогу слышимости на частоте  $1000 \text{ Гц}$ , равен:

$$L_0 = 20 \lg \frac{p_0}{p_0} = 20 \lg 1 = 0 \text{ дБ},$$

а уровень звука, соответствующий болевому порогу, равен:

$$L_6 = 20 \lg \frac{p_6}{p_0} = 20 \lg \frac{200}{2 \cdot 10^{-5}} = 20 \lg 10^7 = 140 \text{ дБ}.$$

4. Определить интенсивность звуковой волны (силу звука), соответствующую уровню звука 67 дБ. Порог слышимости принять равным  $I_0 = 10^{-12} \text{ Вт/м}^2$ .

Решение: Уровень звука в децибелах равен:

$$L = 10 \lg \frac{I}{I_0},$$

где  $I_0 = 10^{-12} \text{ Вт/м}^2$  – сила звука, соответствующая порогу слышимости на частоте 1000 Гц.

Отсюда для интенсивности звука получаем:

$$I = I_0 10^{L/10} = 10^{-12} 10^{6,7} = 5,012 \cdot 10^{-6} \text{ Вт/м}^2.$$

5. Уровень звука увеличился на 20 дБ. Как изменилась при этом сила звука (интенсивность звуковой волны)?

Решение: По условию:

$$L_2 - L_1 = 20.$$

С другой стороны:

$$L_2 - L_1 = 10 \left( \lg \frac{I_2}{I_0} - \lg \frac{I_1}{I_0} \right) = 10 \lg \frac{I_2}{I_1}.$$

Таким образом, получаем, что:

$$10 \lg \frac{I_2}{I_1} = 20 \Rightarrow \frac{I_2}{I_1} = 10^2,$$

то есть сила звука увеличилась в 100 раз.

6. В мастерской одновременно работают два станка с уровнями звука  $L_1 = 70$  дБ и  $L_2 = 80$  дБ. Определить результирующий уровень звука.

Решение: Суммарный уровень звука равен:

$$\begin{aligned} L &= 10 \lg (10^{L_1/10} + 10^{L_2/10}) = 10 \lg (10^7 + 10^8) = 10 \lg [10^7 (1 + 10)] = \\ &= 10 (\lg 10^7 + \lg 11) = 10 (7 + 1,04) = 80,4 \text{ дБ}. \end{aligned}$$

7. Частота второго обертона в спектре музыкального звука равна 1200 Гц. Чему равна частота основного тона (первой гармоники)?

Решение: Частоты гармонических составляющих в спектре периодического звукового сигнала равны:

$$f_n = n f_1,$$

где  $n = 1, 2, 3, \dots$  – номер гармоники,  $f_1$  – частота первой гармоники (основного тона),  $f_2$  – частота второй гармоники (первого обертона),  $f_3$  – частота третьей гармоники (второго обертона).

Таким образом, частота основного тона в рассматриваемом случае равна:

$$f_1 = f_3 / 3 = 1200 / 3 = 400 \text{ Гц}.$$

### **Тестовые задания для самостоятельного выполнения**

#### **1. Средняя плотность звуковой энергии и сила звука**

##### **1.1 Средняя плотность звуковой энергии – это ...**

- 1) громкость звука
- 2) амплитуда звукового давления
- 3) звуковая энергия, переносимая звуковой волной в единицу времени через единицу площади поверхности, перпендикулярной направлению распространения волны
- 4) энергия звуковых колебаний в единице объема среды

##### **1.2 Сила звука...**

- 1) прямо пропорциональна звуковому давлению
- 2) прямо пропорциональна квадрату звукового давления
- 3) обратно пропорциональна звуковому давлению
- 4) обратно пропорциональна квадрату звукового давления

##### **1.3 Интенсивность звуковой волны измеряется в ...**

- 1)  $\text{Вт/м}^2$
- 2)  $\text{Дж/м}^3$
- 3)  $\text{Па}$
- 4)  $\text{дБ}$

#### **2. Уровень звука в децибелах**

##### **2.1 Уровень звука, соответствующий звуковому давлению $0,2 \text{ Па}$ , равен ...**

- 1)  $80 \text{ дБ}$
- 2)  $90 \text{ дБ}$
- 3)  $100 \text{ дБ}$
- 4)  $110 \text{ дБ}$
- 5)  $120 \text{ дБ}$

##### **2.2 Уровень звука, соответствующий силе звука $0,1 \text{ Вт/м}^2$ , равен ...**

- 1)  $10 \text{ дБ}$
- 2)  $110 \text{ дБ}$
- 3)  $20 \text{ дБ}$
- 4)  $120 \text{ дБ}$

##### **2.3 Уровень звука, соответствующий силе звука $0,01 \text{ Вт/м}^2$ , равен ...**

- 1)  $20 \text{ дБ}$
- 2)  $50 \text{ дБ}$
- 3)  $100 \text{ дБ}$
- 4)  $120 \text{ дБ}$

#### **3. Изменение интенсивности звуковой волны (силы звука) с расстоянием**

##### **3.1 При увеличении расстояния от точечного источника звука в 2 раза звуковое давление ...**

- 1) уменьшается в  $\sqrt{2}$  раз
- 2) уменьшается в 2 раза
- 3) уменьшается в 4 раза
- 4) уменьшается в 16 раз

3.2 Звуковое давление на расстоянии 2 м от точечного источника звука отличается от звукового давления в той же волне на расстоянии 10 м от источника в ...

- 1) в 5 раз
- 2) в 10 раз
- 3) в 25 раз
- 4) в 100 раз

3.3 Интенсивность звуковой волны на расстоянии 2 м от точечного источника звука отличается от интенсивности той же волны на расстоянии 10 м от источника в ...

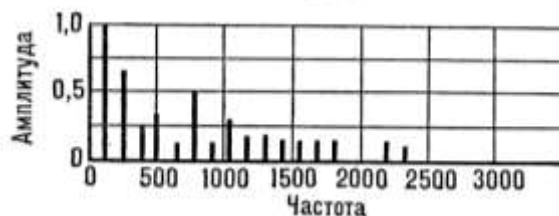
- 1) в 5 раз
- 2) в 10 раз
- 3) в 25 раз
- 4) в 100 раз

#### 4. Спектр звуковых сигналов

4.1 Сплошной спектр характерен для ...

- 1) шума
- 2) периодических звуковых сигналов
- 3) гармонической звуковой волны
- 4) звуковых волн большой интенсивности

4.2 На рисунке изображен спектр музыкального сигнала:



Такой спектр называется...

- 1) сплошным
- 2) линейчатым
- 3) смешанным

4.3 Спектр неупорядоченного во времени звукового сигнала является ...

- 1) сплошным
- 2) смешанным
- 3) дискретным

#### *Задачи для самостоятельного решения*

1. Звуковое давление равно 2 Па. Определить соответствующий уровень звука. Порог слышимости равен  $2 \cdot 10^{-5}$  Па.

2. Интенсивность звуковой волны равна  $10 \text{ Вт/м}^2$ . Определить уровень звука в децибелах. Порог слышимости принять равным  $I_0 = 10^{-12} \text{ Вт/м}^2$ .

3. На сколько децибел увеличится уровень звука, если сила звука (интенсивность звуковой волны) возрастет в 1000 раз?

4. Определить, во сколько раз изменяются интенсивность звука и звуковое давление при увеличении уровня звука на 1 дБ.

5. Звуковое поле в воздухе при комнатной температуре характеризуется средней плотностью звуковой энергии  $0,1 \text{ Дж/м}^3$ . Определить силу звука и уровень звука в децибелах.

6. Во сколько раз уменьшится интенсивность звуковой волны при удалении от точечного источника звука на расстояние от 1 до 12 м? Какова интенсивность звука на расстоянии 1 м от источника, если установлено, что уровень звука на расстоянии 12 м от источника 60 дБ? Чему равна при этом звуковая мощность источника?

7. Уровень интенсивности звукового сигнала автомобиля на расстоянии 7 м от автомобиля равен 100 дБ. На каком расстоянии от автомобиля звуковой сигнал будет явно выделяться на фоне шума проходящего рядом грузовика ( $L > 80 \text{ дБ}$ )? Определить звуковую мощность сигнала.

8. Уровень шума работающего персонального компьютера равен 35 дБ. Чему будет равен результирующий уровень шума в компьютерном классе при одновременной работе 20 компьютеров?

9. Частота основного тона (первой гармоники) в спектре звучания струны равна 440 Гц. Определите частоту первого, второго и третьего обертонов.

### 1.3 Восприятие звука человеком

- *Слухом* называется способность организма получать информацию о внешнем мире, воспринимая звуковые колебания окружающей среды с помощью специального нервного механизма – звукового (слухового) анализатора.

У человека к слуховому анализатору относятся наружное, среднее и внутреннее ухо, слуховой нерв и слуховая область коры головного мозга.

- Человек воспринимает на слух звуки в диапазоне частот от  $16 \text{ Гц}$  до  $20 \text{ кГц}$  (*слышимый звук*). Звуковые волны с частотами ниже  $16 \text{ Гц}$  называются *инфразвуком*, а с частотами выше  $20 \text{ кГц}$  – *ультразвуком*.

- *Область наилучшей слышимости* – интервал частот, соответствующий максимальной чувствительности слухового анализатора.

Для человека область наилучшей слышимости лежит в пределах от  $1000$  до  $5000 \text{ Гц}$ .

- *Порог слышимости* – самый тихий звук, который воспринимается на слух. Порог слышимости зависит от частоты звука.

Для человеческого уха порог слышимости на частоте  $1000 \text{ Гц}$  по звуковому давлению равен  $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$ , что соответствует интенсивности (силе звука)  $I_0 = 10^{-12} \text{ Вт/м}^2$  и уровню звука  $L_0 = 0 \text{ дБ}$ .

- *Болевой порог (порог болевого ощущения)* – максимально громкий звук, который воспринимается на слух.

Для человеческого уха порог слышимости на частоте  $1000 \text{ Гц}$  по звуковому давлению равен  $p_6 = 200 \text{ Па}$ , что соответствует интенсивности (силе звука)  $I_6 = 10^2 \text{ Вт/м}^2$  и уровню звука  $L_6 = 140 \text{ дБ}$ .

- *Чистый (музыкальный) тон* – гармоническая звуковая волна. Высота чистого тона определяется частотой звуковых колебаний: чем больше частота, тем выше тон.

Высота музыкального звука, который не является гармонической волной, определяется частотой первой гармоники (основного тона).

- По высоте звуки принято делить на октавы. *Октавой* называется полоса частот, в которой верхняя граничная частота в два раза больше, чем нижняя:

$$f_2 = 2f_1.$$

В качестве частоты, характеризующей частотную полосу в целом, берется *среднегеометрическая частота*:

$$f = \sqrt{f_1 f_2}.$$

Среднегеометрические частоты октавных полос стандартизованы:  $32, 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 \text{ Гц}$ .

- Громкость звука зависит от уровня звука и частоты звуковых колебаний.

- *Уровень громкости данного звука (в фонах) численно равен уровню звукового давления (в дБ) чистого тона с частотой 1000 Гц, столь же громкого (сравнением на слух), как и измеряемый звук.*

На практике для оценки громкости звука различных частот используют «кривые равной громкости» - геометрическое место точек равногромких тонов различных частот (рисунок 1.1).

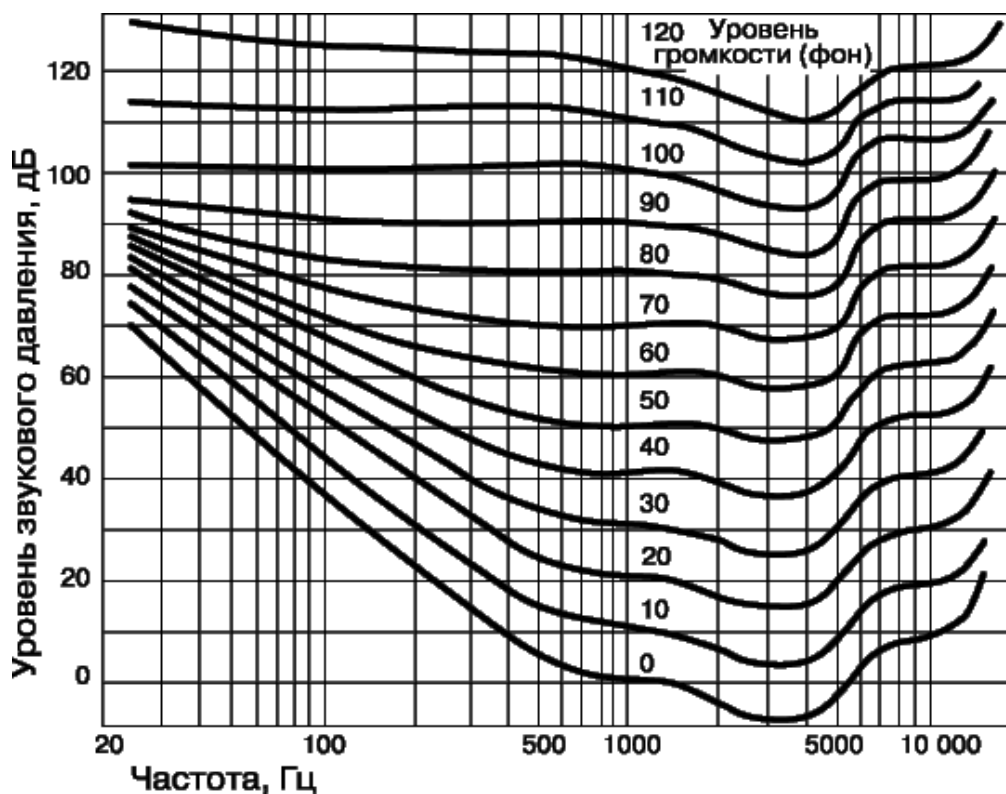


Рисунок 1.1 – Кривые равной громкости

- *Громкость звука в сонах равна*

$$S = 2^{\frac{L-40}{10}},$$

где  $L$  – уровень громкости в фонах.

- Характер воспринимаемого звукового сигнала зависит от его спектра. Дискретный (линейчатый) спектр характерен для *музыкальных звуков*. Звуковые сигналы, имеющие сплошной спектр, воспринимаются на слух как *шум*. Для *речи* характерен смешанный спектр.

### ***Примеры тестовых заданий***

1. Частотный диапазон звуковых колебаний, соответствующий слышимому звуку ...

- 1)  $0 \leq f \leq 100 \text{ Гц}$
- 2)  $1000 \leq f \leq 5000 \text{ Гц}$
- 3)  $0 \leq f \leq 16 \text{ Гц}$
- 4)  $16 \leq f \leq 20000 \text{ Гц}$
- 5)  $f > 20000 \text{ Гц}$

Решение: Для человеческого уха частотный диапазон слышимых звуков от  $16 \text{ Гц}$  до  $20000 \text{ Гц}$ .

2. Высота чистого (музыкального) тона зависит от ...

- 1) амплитуды колебаний звукового давления
- 2) частоты звуковых колебаний
- 3) громкости звука
- 4) силы звука

Решение: Высота чистого тона (гармонической звуковой волны) определяется частотой колебаний: чем больше частота, тем выше тон.

3. Порогом слышимости называется ...

- 1) амплитуда колебаний давления в звуковой волне
- 2) наименьшее звуковое давление на барабанную перепонку, вызывающее ощущение звука
- 3) разность между давлением в звуковой волне и давлением в данной среде в отсутствие звука
- 4) сила, с которой звуковая волна действует на препятствие

Решение: Порог слышимости – это наименьшее звуковое давление на барабанную перепонку, вызывающее ощущение звука. Для человеческого слуха порог слышимости на частоте  $1000 \text{ Гц}$  равен  $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$ .

4. Уровень громкости (в фонах) для звуковой волны с частотой  $200 \text{ Гц}$  и уровнем звука  $40 \text{ дБ}$  равен ...

Ответ: .....

Решение: С помощью кривых равной громкости (см. рисунок 1.1) определяем, что на частоте  $200 \text{ Гц}$  при уровне звука  $40 \text{ дБ}$  уровень громкости равен  $20 \text{ фон}$ .



5. Установите соответствие между звуковыми сигналами и характером их спектра

1) Речь	А Сплошной спектр
2) Музыка	Б Дискретный (линейчатый) спектр
3) Шум	В Смешанный спектр

Решение: Для музыкальных сигналов характерен дискретный (линейчатый) спектр, для шума – сплошной, для речи – смешанный.

### **Тестовые задания для самостоятельного выполнения**

#### **1. Слышимый звук, инфразвук, ультразвук**

1.1 Частотный диапазон звуковых колебаний, соответствующий инфразвуку...

- 1)  $0 \leq f \leq 100 \text{ Гц}$
- 2)  $1000 \leq f \leq 5000 \text{ Гц}$
- 3)  $0 \leq f \leq 16 \text{ Гц}$
- 4)  $16 \leq f \leq 20000 \text{ Гц}$
- 5)  $f > 20000 \text{ Гц}$

1.2 Частотный диапазон звуковых колебаний, соответствующий ультразвуку:

- 1)  $0 \leq f \leq 100 \text{ Гц}$
- 2)  $1000 \leq f \leq 5000 \text{ Гц}$
- 3)  $0 \leq f \leq 16 \text{ Гц}$
- 4)  $16 \leq f \leq 20000 \text{ Гц}$
- 5)  $f > 20000 \text{ Гц}$

1.3 Частота звуковых колебаний 12 кГц относится к диапазону ...

- 1) инфразвука
- 2) слышимого звука
- 3) ультразвука

#### **2. Особенности слухового восприятия. Высота тона.**

2.1 Область наилучшей слышимости лежит в пределах ...

- 1)  $0 \leq f \leq 100 \text{ Гц}$
- 2)  $1000 \leq f \leq 5000 \text{ Гц}$
- 3)  $0 \leq f \leq 16 \text{ Гц}$
- 4)  $16 \leq f \leq 20000 \text{ Гц}$
- 5)  $f > 20000 \text{ Гц}$

2.2 Чистым (музыкальным) тоном называется ...

- 1) звук музыкального инструмента
- 2) голос певца, берущего определенную ноту
- 3) непериодический звуковой сигнал
- 4) гармоническая звуковая волна

2.3 Высота музыкального звука, не являющегося чистым тоном определяется частотой ...

- 1) основного тона (первой гармоники)
- 2) первого обертона (второй гармоники)
- 3) второго обертона (третьей гармоники)
- 4) средним арифметическим значением частот всех гармонических составляющих звукового сигнала

3. Порог слышимости, болевой порог

3.1 Порог слышимости на частоте 1000 Гц равен ...

- 1)  $p_0 = 2 \cdot 10^5 \text{ Па}$
- 2)  $p_0 = 10^5 \text{ Па}$
- 3)  $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$
- 4)  $p_0 = 10^{-5} \text{ Па}$

3.2 Сила звука, соответствующая порогу слышимости на частоте 1000 Гц, равна ...

- 1)  $I_0 = 2 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$
- 2)  $I_0 = 10^5 \text{ Вт/м}^2$
- 3)  $I_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/м}^2$
- 4)  $I_0 = 10^{-12} \text{ Вт/м}^2$

3.3 Болевой порог на частоте 1000 Гц соответствует уровню звука ...

- 1) 0 дБ
- 2) 100 дБ
- 3) 40 дБ
- 4) 140 дБ
- 5) 200 дБ

4. Определение уровня громкости по кривым равной громкости

4.1 Уровень громкости (в фонах) для звуковой волны с частотой 500 Гц и уровнем звука 30 дБ равен ...

Ответ: .....

4.2 Уровень громкости (в фонах) для звуковой волны с частотой 300 Гц и уровнем звука 40 дБ равен ...

Ответ: .....

4.3 Уровень громкости (в фонах) для звуковой волны с частотой 400 Гц и уровнем звука 70 дБ равен ...

Ответ: .....

5. Музыка, речь, шум

5.1 Установите соответствие между звуковыми сигналами и характером их спектра

1) Музыка	А Сплошной спектр
2) Шум	Б Дискретный (линейчатый) спектр
3) Речь	В Смешанный спектр

5.2 На рисунке приведены осциллограммы звуковых сигналов.



К какому типу относятся эти звуки?

- 1) все звуки музыкальные
- 2) а и б – музыкальные, в – шум
- 3) а – речь, б – музыкальный звук, в – шум
- 4) все сигналы шумовые

5.3 Частота, соответствующая ноте «ля» первой октавы равна 440 Гц. Ноте «ля» третьей октавы соответствует частота ....

- 1) 220 Гц    2) 880 Гц    3) 1320 Гц    4) 1760 Гц

## 1.4 Источники и приемники звука

• Любое колеблющееся тело (струна, камертон, голосовые связки и др.), находящееся в сплошной среде, служит источником звуковых волн. Такие источники звука называются *механическими*.

• *Аэрогидродинамические* источники звука (свисток, сирена, духовые музыкальные инструменты и др.) преобразуют кинетическую энергию струи газа или жидкости в энергию акустических колебаний.

• *Струна* представляет собой тонкую, гибкую, сильно натянутую нить с равномерно распределенной по длине массой.

Скорость распространения поперечных упругих волн в струне определяется формулой:

$$V = \frac{2}{d} \sqrt{\frac{F}{\pi \rho}},$$

где  $F$ ,  $d$ ,  $\rho$  – сила натяжения, диаметр и плотность материала струны соответственно.

Частоты собственных колебаний струны:

$$f_m = \frac{m}{Ld} \sqrt{\frac{F}{\pi \rho}},$$

где  $m = 1, 2, 3 \dots$  - номер гармоники.

Наименьшая собственная частота  $f_1$  ( $m = 1$ ) называется *основным тоном*. Более высокие частоты, кратные  $f_1$ , называются обертонами.

• *Мембрана* – это гибкая тонкая пленка, натянутая по периметру. Спектр звука, излучаемого колеблющейся мембраной, определяется ее формой, размерами, натяжением и поверхностной плотностью.

Частоты собственных колебаний прямоугольной мембраны, закрепленной по контуру, равны:

$$f_{mn} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{T}{\sigma}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2},$$

где  $T$  – натяжение по краю мембраны ( $H/m$ ),  $\sigma$  – поверхностная плотность мембраны ( $кг/м^2$ ),  $a$  и  $b$  – стороны мембраны ( $м$ ),  $m$  и  $n$  – целые числа.

• Основной частью духовых музыкальных инструментов является *труба*, заполненная воздухом. Для открытой с обоих концов трубы частоты собственных колебаний определяются соотношением:

$$f_m = \frac{mc}{2L},$$

где  $L$  – длина трубы,  $c$  – скорость звука в воздухе,  $m = 1, 2, 3 \dots$ .

Если труба закрыта с одного конца, то ее собственные частоты равны:

$$f_m = \frac{(2m-1)c}{4L}.$$

• *Приемники звука* – это акустические приборы для восприятия звуковых сигналов и преобразования их с целью измерения, анализа, усиления, записи, передачи или воспроизведения.

• *Микрофоны* – это приемники звука, предназначенные для преобразования акустических сигналов в электрические.

Основные типы микрофонов (по принципу действия): угольные, электромагнитные, электродинамические, конденсаторные, пьезоэлектрические.

### ***Примеры тестовых заданий***

1. Звук сирены по способу возбуждения относится ...

- 1) к звукам электромагнитного происхождения
- 2) к звукам механического происхождения
- 3) к звукам аэрогидродинамического происхождения
- 4) к шумам

Решение: Принцип действия сирены основан на прерывании потока газа или жидкости, поэтому звук сирены имеет аэро- или гидродинамическое происхождение.

2. Укажите источники звука, которые по типу возбуждения звука являются механическими (*Выберите не менее двух ответов*)

- 1) сирена
- 2) струна скрипки
- 3) колокол
- 4) свисток

Решение: В механических источниках звука звуковые волны возбуждаются за счет колебаний поверхности твердого тела, находящегося в упругой среде (например, в воздухе). Следовательно из перечисленных источников звука к механическим можно отнести струну скрипки и колокол.

3. Высота звучания струны увеличивается ...

(*Выберите не менее трех ответов*)

- 1) при уменьшении длины струны
- 2) при уменьшении силы натяжения струны
- 3) при увеличении диаметра струны
- 4) при увеличении силы натяжения
- 5) при уменьшении диаметра

Решение: Частота основного тона струны (и, следовательно, высота ее звучания) определяется соотношением:

$$f_1 = \frac{1}{Ld} \sqrt{\frac{F}{\pi\rho}}.$$

Следовательно звук струны повышается при уменьшении длины струны  $L$  и ее диаметра  $d$ , а также при увеличении силы натяжения струны  $F$ .

4. Самым чувствительным из перечисленных ниже типов микрофонов является...

- 1) конденсаторный микрофон
- 2) угольный микрофон
- 3) электродинамический микрофон
- 4) пьезоэлектрический микрофон

Решение: Самый чувствительный микрофон из перечисленных – конденсаторный микрофон.

5. Установите соответствие между типом микрофона и принципом его действия:

Конденсаторный микрофон	Возникновение ЭДС индукции в связанной с мембраной катушке при ее колебаниях в поле постоянного магнита
Угольный микрофон	Изменение емкости при колебаниях металлической мембраны
Электродинамический микрофон	Изменение электрического сопротивления порошка под действием звукового давления на мембрану

Решение: Принцип действия *угольного микрофона* основан на изменении силы тока, протекающего через капсулу с угольным порошком. Под действием звукового давления колеблется мембрана микрофона. При этом меняется степень уплотнения угольного порошка в капсуле, что приводит к изменению его электрического сопротивления и, следовательно силы тока в цепи микрофона.

В *электродинамическом микрофоне* с мембраной связана катушка. При колебаниях мембраны катушка движется в поле постоянного магнита и в ней возникает ЭДС индукции.

В *конденсаторном микрофоне* легкая металлическая мембрана является одной из обкладок конденсатора, подключенного к источнику постоянного напряжения. При колебаниях мембраны меняется емкость конденсатора и, следовательно, его заряд: в цепи конденсатора протекает ток, величина которого меняется в соответствии с изменением звукового давления.

### **Примеры решения задач**

1. При некотором натяжении струны длиной 1 м частота основного тона струны равна 1000 Гц. Какова скорость распространения изгибной волны в струне?

Решение: Основной тон струны соответствует собственному колебанию (стоячей волне), при котором на длине струны укладывается половина длины волны. Следовательно, длина волны равна:

$$\lambda = 2L.$$

Так как длина волны связана с частотой и скоростью волны соотношением:

$$\lambda = \frac{v}{f},$$

то скорость распространения волны в струне равна:

$$v = \lambda f = 2Lf = 2 \cdot 1 \cdot 1000 = 2000 \text{ м/с}.$$

2. Как изменится частота основного тона струны, если: а) середину струны прижать пальцем к грифу, б) увеличить натяжение струны в два раза?

Решение: Частота основного тона струны равна:

$$f_1 = \frac{1}{Ld} \sqrt{\frac{F}{\pi\rho}}.$$

Если середину струны прижать пальцем к грифу, то эффективная длина струны уменьшится в два раза. Следовательно, частота основного тона в два раза увеличится.

Так как частота прямо пропорциональна  $\sqrt{F}$ , то при увеличении силы натяжения струны в два раза частота колебаний увеличится в  $\sqrt{2}$  раз, то есть примерно в 1,41 раза.

3. Определить силу натяжения стальной струны диаметром 0,5 мм и длиной 0,5 м, при которой частота основного тона будет равна 440 Гц (нота «ля» первой октавы). Плотность стали равна 7800 кг/м<sup>3</sup>.

Решение: Частота основного тона струны равна:

$$f_1 = \frac{1}{Ld} \sqrt{\frac{F}{\pi\rho}}.$$

Отсюда для силы натяжения струны получаем:

$$F = \pi\rho(Ldf_1)^2 = 3,14 \cdot 7800(0,5 \cdot 0,0005 \cdot 440)^2 = 296 \text{ Н}.$$

4. Определить частоту основного тона и двух первых обертонов трубы длиной 1 м, открытой с обоих концов.

Решение: Основной тон (первая гармоника) звука трубы, открытой с обоих концов, соответствует собственному колебанию (стоячей волне), при котором на длине трубы укладывается половина длины волны. Следовательно, длина волны основного тона равна:

$$\lambda_1 = 2L.$$

Так как длина волны связана с частотой и скоростью волны соотношением:

$$\lambda = \frac{c}{f},$$

где  $c = 340 \text{ м/с}$  – скорость звука в воздухе, то частота основного тона трубы равна:

$$f_1 = \frac{c}{\lambda_1} = \frac{c}{2L} = \frac{340}{2 \cdot 1} = 170 \text{ Гц}.$$

Частоты первых двух обертонов (второй и третьей гармоник) соответственно равны:

$$f_2 = 2f_1 = 2 \cdot 170 = 340 \text{ Гц},$$

$$f_3 = 3f_1 = 3 \cdot 170 = 510 \text{ Гц}.$$

5. Определите частоту основного колебания прямоугольной мембраны с поверхностной плотностью материала  $5,4 \cdot 10^{-2} \text{ кг/м}^2$  и натяжением по контуру  $50 \text{ Н/м}$ , если ее размеры  $4 \times 6 \text{ см}$ .

Решение: Частоты собственных колебаний прямоугольной мембраны равны:

$$f_{mn} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{T}{\sigma}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2},$$

где  $T$  – натяжение мембраны по контуру,  $\sigma$  – поверхностная плотность мембраны,  $a$  и  $b$  – стороны мембраны,  $m$  и  $n$  – целые числа (1, 2, 3, ...). Основное колебание – это собственное колебание, соответствующее  $m = n = 1$ . Его частота:

$$f_{11} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{T}{\sigma}} \sqrt{\left(\frac{1}{a}\right)^2 + \left(\frac{1}{b}\right)^2} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{50}{5,4 \cdot 10^{-2}}} \sqrt{\frac{1}{0,04^2} + \frac{1}{0,06^2}} = 457 \text{ Гц}.$$

6. С какой частотой должен вращаться ротор динамической сирены, чтобы ее звук имел частоту  $500 \text{ Гц}$ ? Число отверстий в диске сирены равно 25.



Решение: Частота звука сирены равна произведению числа отверстий в диске  $m$  и частоты  $n$  вращения ротора:

$$f = m \cdot n.$$

Следовательно, частота вращения ротора:

$$n = \frac{f}{m} = \frac{1000}{25} = 40 \text{ об/с}.$$

### **Тестовые задания для самостоятельного выполнения**

#### *1. Способы возбуждения звука*

1.1 Укажите звуки, которые по типу возбуждения относятся к аэрогидродинамическим:

*(Выберите все правильные ответы)*

- 1) сигнал автомобиля
- 2) стук в дверь
- 3) раскаты грома во время грозы
- 4) звон колокольчика

1.2 Укажите, какие из перечисленных музыкальных звуков по способу возбуждения являются механическими:

*(Выберите все правильные ответы)*

- 1) звучание скрипки
- 2) звук органа
- 3) звук волынки
- 4) звук фортепиано

1.3 Шум мощного трансформатора относится ...

- 1) к механическим шумам
- 2) к аэродинамическим шума
- 3) к шумам электродинамического происхождения

#### *2. Частота и мощность источников звука*

2.1 Звук струны понижается ...

*(Выберите не менее трех ответов)*

- 1) при увеличении длины струны
- 2) при уменьшении силы натяжения струны
- 3) при увеличении диаметра струны
- 4) при увеличении силы натяжения
- 5) при уменьшении диаметра струны

2.2 При увеличении плотности материала струны ее звук становится ...

- 1) ниже
- 2) выше
- 3) высота звука не зависит от плотности материала струны

### 2.3 Громкость звука свистка зависит от ...

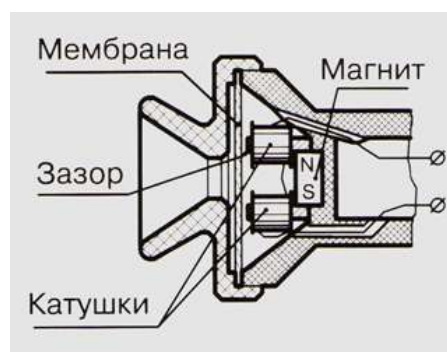
- 1) объема резонансной камеры
- 2) длины сопла
- 3) температуры воздуха
- 4) скорости вдувания воздуха в сопло

## 3. Микрофоны

3.1 Установите соответствие между принципом действия микрофона и его типом:

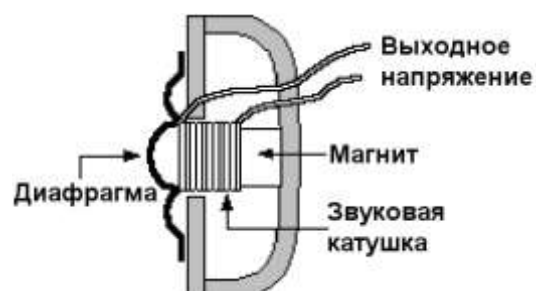
Возникновение ЭДС индукции в связанной с мембраной катушке при ее колебаниях в поле постоянного магнита	Конденсаторный микрофон
Изменение емкости при колебаниях металлической мембраны	Угольный микрофон
Изменение электрического сопротивления порошка под действием звукового давления на мембрану	Электродинамический катушечный микрофон

3.2 На рисунке изображена схема ...



- 1) электродинамического микрофона
- 2) конденсаторного микрофона
- 3) электромагнитного микрофона
- 4) пьезоэлектрического микрофона

3.3 На рисунке изображена схема ...



- 1) угольного микрофона
- 2) конденсаторного микрофона
- 3) электромагнитного микрофона
- 4) электродинамического микрофона

### *Задачи для самостоятельного решения*

1. Частота основного тона струны равна  $440 \text{ Гц}$ . Определите длину струны, если известно, что скорость распространения упругой волны в струне равна  $350 \text{ м/с}$ .
2. Чему равна длина бегущей волны в стальной струне диаметром  $0,25 \text{ мм}$  и натяжением  $10 \text{ Н}$ , если частота возбуждающей силы  $200 \text{ Гц}$ ? Плотность стали равна  $7800 \text{ кг/м}^3$ .
3. Струна скрипки колеблется с частотой  $196 \text{ Гц}$ . С какой частотой она будет колебаться, если ее прижать на расстоянии  $1/4$  от конца?
4. Чему равна длина открытой с обоих концов трубы, если частота ее основного тона  $220 \text{ Гц}$ ? Чему станет равна частота основного тона этой же трубы, если один ее конец закрыть?
5. Медная струна натянута силой  $50 \text{ Н}$ . Диаметр струны  $0,25 \text{ мм}$ , длина струны  $0,6 \text{ м}$ . Определите скорость волны в струне и частоту ее основного тона. Плотность меди равна  $8900 \text{ кг/м}^3$ .
6. Ротор динамической сирены вращается с частотой  $50$  оборотов в секунду. Определите частоту звука сирены, если количество отверстий в ее диске равно  $25$ .

## 1.5 Отражение и преломление звуковых волн

• *Коэффициентом отражения* звуковой волны на границе раздела двух сред называется безразмерная величина, равная отношению звукового давления в отраженной волне к звуковому давлению в падающей волне:

$$r = \frac{P_{\text{отр}}}{P_{\text{пад}}}.$$

• *Коэффициентом прохождения* звуковой волны через границу раздела двух сред называется безразмерная величина, равная отношению звукового давления в прошедшей (поглощенной) волне к звуковому давлению в падающей волне:

$$t = \frac{P_{\text{пр}}}{P_{\text{пад}}}.$$

• В случае нормального падения плоской звуковой волны на плоскую границу раздела двух сред с волновыми сопротивлениями  $\rho_1 c_1$  и  $\rho_2 c_2$  коэффициенты отражения и прохождения равны:

$$r = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1},$$

$$t = \frac{2\rho_2 c_2}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1}.$$

• *Коэффициентом звукопоглощения* поверхности раздела двух сред называется безразмерная величина, численно равная отношению интенсивности звуковой волны, поглощенной поверхностью раздела двух сред, к интенсивности звуковой волны, падающей на эту поверхность:

$$\alpha = \frac{I_{\text{погл}}}{I_{\text{пад}}}.$$

Коэффициент звукопоглощения равен доле звуковой энергии, поглощаемой поверхностью, поэтому его иногда выражают в процентах:

$$\alpha = \frac{I_{\text{погл}}}{I_{\text{пад}}} \cdot 100\%.$$

Коэффициент звукопоглощения связан с коэффициентом отражения  $r$ :

$$\alpha = 1 - |r|^2.$$

При нормальном падении звуковой волны на поверхность раздела двух сред:

$$\alpha = \frac{4\rho_2 c_2 \rho_1 c_1}{(\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1)^2}.$$

• В практически важном случае, когда звуковая волна падает из воздуха ( $\rho_1 c_1 = \rho_0 c \approx 420 \text{ кг/м}^2\text{с}$ ) на поверхность материала с волновым сопротивлением (акустическим импедансом)  $R = \rho_2 c_2$ , коэффициенты отражения и звукопоглощения равны:

$$r = \frac{R/\rho_0 c - 1}{R/\rho_0 c + 1} = \frac{R_1 - 1}{R_1 + 1},$$

$$\alpha = \frac{4R_1}{(R_1 + 1)^2}.$$

Величина  $R_1 = R/\rho_0 c$  называется *безразмерным волновым сопротивлением (импедансом)* среды.

• В общем случае акустический импеданс поверхности, численно равный отношению звукового давления к нормальной составляющей колебательной скорости на данной поверхности, является комплексным числом:

$$Z = \frac{p}{v_n} = R + iY,$$

где  $R$  – *активная часть* импеданса, а  $Y$  – *реактивная часть* импеданса. Безразмерный импеданс:

$$Z_1 = \frac{Z}{\rho_0 c} = R_1 + iY_1.$$

Коэффициент отражения от среды с комплексным импедансом также является комплексным числом:

$$r = \frac{Z_1 - 1}{Z_1 + 1}.$$

Коэффициент звукопоглощения при нормальном падении звуковой волны из воздуха на поверхность с комплексным импедансом равен:

$$\alpha = 1 - |r|^2 = \frac{4R_1}{(R_1 + 1)^2 + Y_1^2}.$$

• При наклонном падении звуковой волны на поверхность раздела двух сред выполняются законы отражения и преломления звука:

$$\varphi_1 = \varphi'_1,$$

$$\frac{\sin \varphi_1}{\sin \varphi_2} = \frac{c_1}{c_2},$$

где  $\varphi_1$  – угол падения,  $\varphi'_1$  – угол отражения,  $\varphi_2$  – угол преломления звуковой волны.

• Коэффициенты отражения и прохождения при наклонном падении звука на поверхность равны:

$$r = \frac{\rho_2 c_2 / \cos \varphi_2 - \rho_1 c_1 / \cos \varphi_1}{\rho_2 c_2 / \cos \varphi_2 + \rho_1 c_1 / \cos \varphi_1},$$

$$t = \frac{2 \rho_2 c_2 / \cos \varphi_2}{\rho_2 c_2 / \cos \varphi_2 + \rho_1 c_1 / \cos \varphi_1}.$$

• Если первая среда – воздух, а вторая – материал с безразмерным акустическим импедансом  $Z_1 = R_1 + iY_1$ , выражение для коэффициента звукопоглощения имеет вид:

$$\alpha = 1 - |r|^2 = \frac{4R_1 \cos \varphi_1}{(R_1 \cos \varphi_1 + 1)^2 + Y_1^2 \cos^2 \varphi_1}.$$

• *Коэффициент прохождения* звуковой волны через слой материала – безразмерная величина, равная отношению звукового давления в волне, прошедшей через слой, к звуковому давлению в падающей волне:

$$t = \frac{P_{np}}{P_{nad}}.$$

• *Коэффициент звукоизоляции* слоя – безразмерная величина, которая показывает, во сколько раз уменьшается интенсивность звуковой волны при прохождении через слой:

$$\eta = \frac{I_{nad}}{I_{np}} = \frac{1}{t^2}.$$

• *Индекс звукоизоляции* (звукоизоляция в децибелах) показывает, на сколько децибел снижается уровень звука при прохождении звуковой волны через слой материала:

$$R_{uz} = 10 \lg \eta.$$

• При нормальном падении звуковой волны из воздуха на плоский однородный слой материала толщиной  $d$  коэффициенты прохождения и звукоизоляции соответственно равны:

$$t = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{\rho_0 c}{\rho_2 c_2} + \frac{\rho_2 c_2}{\rho_0 c}\right)^2 \sin^2 k_2 d + 4 \cos^2 k_2 d}},$$

$$\eta = \frac{1}{4} \left( \frac{\rho_0 c}{\rho_2 c_2} + \frac{\rho_2 c_2}{\rho_0 c} \right)^2 \sin^2 k_2 d + \cos^2 k_2 d,$$

где  $\rho_2 c_2$  – волновое сопротивление материала слоя,  $k_2 = \omega/c_2 = 2\pi f/c_2$  – волновое число звуковой волны в материале.

Для тонкого (по сравнению с длиной звуковой волны) слоя плотного материала ( $k_2 d \ll 1$ ,  $\rho_2 c_2 \gg \rho_0 c$ ):

$$\frac{1}{t} \approx \sqrt{1 + \left( \frac{\pi f M_2}{\rho_0 c} \right)^2},$$

$$\eta \approx 1 + \left( \frac{\pi M_2 f}{\rho_0 c} \right)^2.$$

где  $M_2 = \rho_2 d$  – удельная масса слоя.

### ***Примеры тестовых заданий***

1. Акустический импеданс поверхности – это...

- 1) отношение плотностей сред, границей раздела которых является данная поверхность
- 2) отношение скоростей звука в средах, границей раздела которых является данная поверхность
- 3) отношение звукового давления к нормальной составляющей колебательной скорости на данной поверхности
- 4) отношение волновых сопротивлений сред, границей раздела которых является данная поверхность

Решение: Акустический импеданс поверхности – это физическая величина, численно равная отношению звукового давления к нормальной составляющей колебательной скорости на этой поверхности.

2. Коэффициентом отражения поверхности называется...

- 1) отношение звукового давления в падающей волне к давлению в отраженной волне
- 2) отношение звукового давления в отраженной волне к давлению в падающей волне
- 3) отношение звукового давления в поглощенной волне к давлению в падающей волне
- 4) отношение интенсивности поглощенной волны к интенсивности падающей волны
- 5) отношение интенсивности отраженной волны к интенсивности падающей волны

Решение: Коэффициентом отражения звуковой волны на границе раздела двух сред называется безразмерная величина, равная отношению звукового давления в отраженной волне к звуковому давлению в падающей волне.

3. Коэффициент звукопоглощения поверхности – это...

- 1) отношение звукового давления в падающей волне к давлению в отраженной волне
- 2) отношение звукового давления в отраженной волне к давлению в падающей волне
- 3) отношение звукового давления в поглощенной волне к давлению в падающей волне
- 4) отношение интенсивности поглощенной волны к интенсивности падающей волны
- 5) отношение интенсивности отраженной волны к интенсивности падающей волны

Решение: Коэффициентом звукопоглощения поверхности раздела двух сред называется безразмерная величина, численно равная отношению интенсивности звуковой волны, поглощенной поверхностью, к интенсивности звуковой волны, падающей на эту поверхность.

4. Безразмерный (нормированный) импеданс поверхности равен 1. Коэффициент звукопоглощения этой поверхности равен ...

- 1) 0      2) 0,25      3) 0,5      4) 0,75      5) 1

Решение: Коэффициент звукопоглощения поверхности  $\alpha$  связан с безразмерным акустическим импедансом  $R_1$  соотношением:

$$\alpha = \frac{4R_1}{(R_1 + 1)^2}.$$

При  $R_1 = 1$   $\alpha = 1$ , то есть такая поверхность полностью поглощает звук.



5. Звуковое давление в падающей волне 20 Па. Звуковое давление в волне, прошедшей через перегородку, 4 Па. Коэффициент прохождения звуковой волны через перегородку равен...

- 1) 0,25    2) 0,5    3) 5    4) 25    5) 1

Решение: Коэффициент прохождения звуковой волны через перегородку (слой материала) равен:

$$t = \frac{P_{np}}{P_{пад}} = \frac{4}{20} = 0,25.$$

6. Звукоизоляция перегородки равна 60 дБ. Это означает, что ...

- 1) при прохождении через перегородку интенсивность волны уменьшается в 6 раз
- 2) при прохождении через перегородку интенсивность волны уменьшается в 60 раз
- 3) уровень звука в отраженной от перегородки волне на 60 дБ ниже, чем в падающей волне
- 4) уровень звука в прошедшей через перегородку волне на 60 дБ ниже, чем в падающей волне

Решение: Звукоизоляция перегородки в децибелах показывает, на сколько уменьшается уровень звука в прошедшей через перегородку звуковой волне, то есть в рассматриваемом случае уровень звука в прошедшей волне на 60 дБ ниже, чем в падающей.

7. Коэффициент звукоизоляции слоя материала ...

- 1) уменьшается при увеличении толщины слоя
- 2) увеличивается при увеличении толщины
- 3) не зависит от толщины
- 4) может уменьшаться или увеличиваться в зависимости от плотности материала слоя

Решение: Коэффициент звукоизоляции слоя материала показывает, во сколько раз уменьшается интенсивность звуковой волны при прохождении через слой. При увеличении толщины слоя коэффициент звукоизоляции увеличивается.

### Примеры решения задач

1. Плоская звуковая волна из воздуха нормально падает на поверхность воды. Найти коэффициенты отражения и коэффициент звукопоглощения для этой поверхности. Плотность воды равна  $1000 \text{ кг/м}^3$ , скорость звука в воде  $1450 \text{ м/с}$ . Волновое сопротивление воздуха считать равным  $420 \text{ кг/м}^2\text{с}$ .

Решение: При нормальном падении коэффициенты отражения и звукопоглощения соответственно равны:

$$r = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} = \frac{1000 \cdot 1450 - 420}{1000 \cdot 1450 + 420} \approx 0,9994;$$

$$\alpha = 1 - r^2 \approx 0,0012.$$

Полученный результат означает, что звуковая волна практически полностью отражается от границы воздух-вода.

2. Определить коэффициент отражения и коэффициент звукопоглощения при нормальном падении для границы воздуха с материалом, имеющим безразмерный акустический импеданс  $R_1 = 2,5$ .

Решение: При нормальном падении на границу воздух-материал коэффициенты отражения и звукопоглощения равны:

$$r = \frac{R_1 - 1}{R_1 + 1} = \frac{2,5 - 1}{2,5 + 1} \approx 0,43,$$

$$\alpha = 1 - r^2 \approx 0,82 = 82\%.$$

3. Звуковая волна падает под углом  $30^\circ$  на поверхность материала с безразмерным акустическим импедансом  $Z_1 = 3,2 + 2i$ . Чему равен коэффициент звукопоглощения материала при таких условиях?

Решение: Безразмерный акустический импеданс поверхности в общем случае равен  $Z_1 = R_1 + iY_1$ . По условию активная часть импеданса  $R_1 = 3,2$ , а реактивная часть  $Y_1 = 2$ .

Коэффициент звукопоглощения при наклонном падении звука равен:

$$\alpha = \frac{4R_1 \cos \varphi_1}{(R_1 \cos \varphi_1 + 1)^2 + Y_1^2 \cos^2 \varphi_1} = \frac{4 \cdot 3,2 \cdot \cos 30^\circ}{(3,2 \cdot \cos 30^\circ + 1)^2 + 2^2 \cdot \cos^2 30^\circ} = 0,64.$$

4. При какой плотности материала он будет полностью поглощать звуковую волну, нормально падающую на его поверхность из воздуха? Скорость звука в материале равна 30 м/с.

Решение: Если поверхность полностью поглощает звук, это означает, что коэффициент отражения равен нулю. Так как коэффициент отражения при нормальном падении:

$$r = \frac{R_1 - 1}{R_1 + 1},$$

то для того, чтобы  $r = 0$ , безразмерный акустический импеданс материала  $R_1$  должен быть равен 1, то есть  $R_1 = R/\rho_0 c = 1$ . Отсюда получаем  $R = \rho_0 c$ . С учетом того, что  $R = \rho_2 c_2$ , а волновое сопротивление воздуха можно принять равным  $\rho_0 c = 420 \text{ кг/м}^2 \text{ с}$ , для плотности материала получаем:

$$\rho_2 = \frac{\rho_0 c}{c_2} = \frac{420}{30} = 14 \text{ кг/м}^3.$$

5. После прохождения через стену звуковой волны частотой 200 Гц уровень громкости звука понизился от 100 до 20 фон. Определить, во сколько раз при этом уменьшилась интенсивность звука.

Решение: Используя кривые равной громкости (рисунок 1.1) найдем уровень звука в волне до и после прохождения через стену:  $L_1 = 100 \text{ дБ}$ ,  $L_2 = 40 \text{ дБ}$ . Следовательно, индекс звукоизоляции стены равен

$$R_{из} = 100 - 40 = 60 \text{ дБ}.$$

С другой стороны:

$$R_{из} = 10 \lg \eta = 10 \lg \frac{I_1}{I_2}.$$

Отсюда получаем:

$$\eta = \frac{I_1}{I_2} = 10^{R_{из}/10} = 10^6,$$

то есть интенсивность звука уменьшилась в миллион раз.

6. Определите коэффициент звукоизоляции деревянной перегородки (плотность  $600 \text{ кг/м}^3$ ) толщиной 2,5 см на частотах 100 Гц и 400 Гц. Чему равен индекс звукоизоляции перегородки на этих частотах?

Решение: Так как толщина перегородки на рассматриваемых частотах много меньше длины звуковой волны, то для коэффициента звукоизоляции можно использовать приближенную формулу:

$$\eta \approx 1 + \left( \frac{\pi M_2 f}{\rho_0 c} \right)^2,$$

где  $\rho_0 c = 420 \text{ кг/м}^2$  – волновое сопротивление воздуха,  $M_2 = \rho_2 d$  – удельная масса перегородки,  $f$  – частота звука. Индекс звукоизоляции по определению равен:

$$R_{uz} = 10 \lg \eta.$$

На частоте  $f_1 = 100 \text{ Гц}$ :

$$\eta_1 \approx 1 + \left( \frac{\pi \rho_2 d f_1}{\rho_0 c} \right)^2 = 1 + \left( \frac{3,14 \cdot 600 \cdot 0,025 \cdot 100}{420} \right)^2 \approx 127,$$

$$R_{uz1} = 10 \lg \eta_1 \approx 21 \text{ дБ}.$$

На частоте  $f_2 = 400 \text{ Гц}$ :

$$\eta_2 \approx 1 + \left( \frac{\pi \rho_2 d f_2}{\rho_0 c} \right)^2 = 1 + \left( \frac{3,14 \cdot 600 \cdot 0,025 \cdot 400}{420} \right)^2 \approx 2013,$$

$$R_{uz2} = 10 \lg \eta_2 \approx 33 \text{ дБ}.$$

7. Стальной кожух снижает уровень шума станка на частоте  $500 \text{ Гц}$  на  $40 \text{ дБ}$ . Определите толщину кожуха. Плотность стали равна  $7800 \text{ кг/м}^3$ .

Решение: Индекс звукоизоляции кожуха равен:

$$R_{uz} = 10 \lg \eta = 40 \text{ дБ} \Rightarrow \eta = 10^4.$$

Коэффициент звукоизоляции:

$$\eta = 1 + \left( \frac{\pi \rho_2 d f}{\rho_0 c} \right)^2.$$

Выразим из этой формулы толщину кожуха  $d$ :

$$d = \sqrt{\eta - 1} \frac{\rho_0 c}{\pi \rho_2 f} = \sqrt{10000 - 1} \frac{420}{3,14 \cdot 7800 \cdot 500} \approx 0,0034 \text{ м} = 3,3 \text{ мм}.$$

### **Тестовые задания для самостоятельного выполнения**

#### **1. Акустический импеданс поверхности**

1.1 Акустический импеданс поверхности некоторого материала равен волновому сопротивлению воздуха. Это означает, что поверхность ...

- 1) полностью поглощает падающую на нее из воздуха звуковую волну
- 2) полностью отражает падающую на нее из воздуха звуковую волну
- 3) плотность материала равна плотности воздуха
- 4) скорость звука в материале равна скорости звука в воздухе

1.2 Безразмерным (нормированным) акустическим импедансом поверхности материала называется ...

- 1) отношение плотности данного материала к плотности воздуха
- 2) отношение скорости звука в данном материале к скорости звука в воздухе
- 3) отношение волнового сопротивления материала к волновому сопротивлению воздуха
- 4) отношение волнового сопротивления материала к волновому сопротивлению воды

1.3 Акустический импеданс измеряется в ...

- 1)  $\text{Па}$
- 2)  $\text{кг/м}^2\text{с}$
- 3)  $\text{кг/м}^3$
- 4)  $\text{кг/м}^2$

#### **2. Коэффициент отражения звука на границе двух сред**

2.1 Звуковое давление в падающей волне равно  $2 \text{ Па}$ , а в отраженной от поверхности волне  $0,2 \text{ Па}$ . Коэффициент отражения поверхности равен ...

- 1) 100
- 2) 10
- 3) 0,1
- 4) 0,01

2.2 Коэффициент отражения звуковой волны от границы двух сред равен 0,2.

Это означает, что ...

- 1) звуковое давление в отраженной волне в 5 раз больше, чем в падающей
- 2) звуковое давление в падающей волне в 5 раз больше, чем в отраженной
- 3) уровень звука в отраженной волне в 5 раз больше, чем в падающей
- 4) уровень звука в падающей волне в 5 раз больше, чем в отраженной

2.3 Звуковое давление в отраженной волне в 10 раз меньше, чем в падающей.

Это означает, что коэффициент отражения равен ...

- 1) 100
- 2) 10
- 3) 0,1
- 4) 0,01

### 3. Коэффициент звукопоглощения поверхности

3.1 Интенсивность звука в падающей волне равна  $10 \text{ Вт/м}^2$ , а в отраженной волне  $1 \text{ Вт/м}^2$ . Коэффициент звукопоглощения поверхности равен...

- 1) 0,1      2) 0,3      3) 0,6      4) 0,9

3.2 Звуковое давление в падающей волне  $1 \text{ Па}$ , а в волне, прошедшей через поверхность материала  $0,5 \text{ Па}$ . Коэффициент звукопоглощения поверхности равен ...

- 1) 50 %      2) 25 %      3) 10 %      4) 5 %

3.3 Коэффициент отражения звуковой волны от поверхности материала 0,4.

Коэффициент звукопоглощения поверхности равен ...

- 1) 40 %      2) 60 %      3) 75 %      4) 86 %

### 4. Зависимость коэффициента звукопоглощения от угла падения и акустического импеданса поверхности

4.1 Акустический импеданс поверхности равен 0. Коэффициент звукопоглощения этой поверхности равен ...

- 1) 0      2) 0,25      3) 0,5      4) 1

4.2 При скользящем падении звуковой волны на поверхность (угол падения стремится к  $90^\circ$ ) коэффициент звукопоглощения ...

- 1) не может быть определен  
2) равен 0  
3) равен 100 %  
4) равен 1

4.3 Коэффициент звукопоглощения при нормальном падении равен 100 %, если ...

- 1) волновое сопротивление поверхности равно волновому сопротивлению воздуха  
2) волновое сопротивление поверхности много больше волнового сопротивления воздуха  
3) волновое сопротивление поверхности много меньше волнового сопротивления воздуха  
4) действительная (активная часть) волнового сопротивления поверхности равна нулю

### 5. Коэффициент прохождения звуковой волны через слой материала

5.1 Коэффициентом прохождения звуковой волны через слой материала называется...

- 1) отношение звукового давления в падающей волне к давлению в отраженной волне  
2) отношение звукового давления в отраженной волне к давлению в падающей волне

- 3) отношение звукового давления в прошедшей волне к давлению в падающей волне
- 4) отношение интенсивности прошедшей волны к интенсивности падающей волны

5.2 Коэффициент прохождения звуковой волны через перегородку равен 0,04. Это означает, что ...

- 1) звуковое давление в прошедшей волне в 25 раз больше, чем в падающей
- 2) звуковое давление в прошедшей волне в 25 раз меньше, чем в падающей
- 3) сила звука при прохождении через слой материала уменьшается в 25 раз
- 4) сила звука при прохождении через слой материала уменьшается на 4 %

5.3 Известно, что при прохождении звуковой волны через слой материала звуковое давление уменьшается в 10 раз. Коэффициент прохождения при этом равен ...

- 1) 10      2) 0,1      3) 100      4) 0,01

## 6. Звукоизоляция слоя материала

6.1 Звукоизоляция перегородки равна 40 дБ. Это означает, что ...

- 1) при прохождении через перегородку интенсивность волны уменьшается в 40 раз
- 2) при прохождении через перегородку интенсивность волны уменьшается в 4 раза
- 3) уровень звука в отраженной от перегородки волне на 40 дБ ниже, чем в падающей волне
- 4) уровень звука в прошедшей через перегородку волне на 40 дБ ниже, чем в падающей волне

6.2 Коэффициент звукоизоляции слоя материала ...

- 1) увеличивается при повышении частоты звука
- 2) уменьшается при повышении частоты звука
- 3) не зависит от частоты звука
- 4) может увеличиваться или уменьшаться в зависимости от плотности материала слоя

6.3 Коэффициент прохождения звуковой волны через перегородку равен 0,01. Индекс звукоизоляции перегородки равен ...

- 1) 40 дБ      2) 30 дБ      3) 20 дБ      4) 10 дБ

### *Задачи для самостоятельного решения*

1. Плоская звуковая волна падает нормально на границу раздела воздух-углекислый газ. Найти коэффициент отражения и коэффициент звукопоглощения на этой границе. Волновое сопротивление углекислого газа принять равным  $510 \text{ кг/м}^2\text{с}$ .

2. Коэффициент звукопоглощения поверхности некоторого материала при угле падения звуковой волны  $60^\circ$  равен 80 %. Определить безразмерное волновое сопротивление материала  $R_1$ . (Реактивная часть волнового сопротивления  $Y_1 = 0$ ).

3. Каков должен быть коэффициент звукоизоляции перегородки, чтобы снизить уровень шума, проникающего из соседнего помещения, с 80 дБ до 30 дБ?

4. Определить коэффициент прохождения, коэффициент звукоизоляции и индекс звукоизоляции для кирпичной перегородки толщиной 0,5 м на частоте 400 Гц. Плотность кирпичной кладки  $1700 \text{ кг/м}^3$ .



## 2 ЭЛЕМЕНТЫ АРХИТЕКТУРНОЙ АКУСТИКИ

### 2.1 Волновая теория распространения звука в ограниченном пространстве

- *Звуковое поле в помещении* представляет собой систему стоячих волн, образованных в результате наложения волн, излучаемых источником звука (*прямой звук*), и волн, отраженных от стен, пола, потолка и различных объектов, находящихся в помещении (*отраженный звук*).

- *Волновой метод расчета* звукового поля в помещении, основанный на решении волнового уравнения (уравнения Гельмгольца) с определенными граничными условиями, позволяет найти спектр *собственных (резонансных) частот* помещения, зависящих от его формы и размеров. Каждой из этих частот соответствует собственное колебание воздуха (*мода*) в объеме помещения. При небольших коэффициентах звукопоглощения поверхностей помещения каждая мода представляет собой стоячую волну, волновой вектор которой определенным образом ориентирован в пространстве.

- *Собственные частоты* для помещения, имеющего форму прямоугольного параллелепипеда размерами  $l \times b \times h$  определяются по формуле:

$$f_{mnp} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{l}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{h}\right)^2},$$

где  $m, n, p$  – целые числа,  $c = 340$  м/с – скорость звука в воздухе при комнатной температуре.

- В зависимости от ориентации волнового вектора стоячей волны относительно сторон помещения все моды можно разделить на три группы:

- 1) *осевые*, для которых волновой вектор направлен параллельно одной из сторон прямоугольного помещения: *x-осевые моды* ( $m, 0, 0$ ); *y-осевые моды* ( $0, n, 0$ ); *z-осевые моды* ( $0, 0, p$ ).

- 2) *скользящие (касательные)*, для которых волновой вектор направлен параллельно одной из поверхностей, ограничивающих помещение: *xy-касательные моды* ( $m, n, 0$ ); *xz-касательные моды* ( $m, 0, p$ ); *yz-касательные моды* ( $0, n, p$ ).

- 3) *косые моды* ( $m, n, p$ ), у которых волновой вектор ориентирован под углом ко всем сторонам помещения.

- Под действием источника звука в помещении возникают *вынужденные* звуковые колебания, амплитуды которых зависят от звуковой мощности источника и его частотного спектра. Наибольшими амплитудами обладают при этом те собственные колебания, частоты которых близки к частоте, на которой работает источник звука (*резонанс*).

### ***Примеры тестовых заданий***

1. Мода (2,2,2) является ...

- 1) осевой
- 2) касательной
- 3) косой
- 4) прямой

Решение: Так как все три индекса ( $m$ ,  $n$ ,  $p$ ) отличны от нуля. мода (2,2,2) относится к косым модам.

2. Размеры помещения, имеющего форму прямоугольного параллелепипеда,  $l = 10$  м,  $b = 8$  м,  $h = 4$  м. Собственная частота  $f_{200}$  (в герцах) равна ...

Ответ: ...

Решение: Частота моды (2,0,0) равна:

$$f_{200} = 2 \frac{c}{2l} = \frac{c}{l} = \frac{340}{10} = 34 \text{ Гц}.$$

3. При увеличении длины помещения в два раза, частоты ...

- 1)  $x$ -осевых мод в два раза увеличатся, а  $y$ -осевых и  $z$ -осевых не изменятся
- 2)  $x$ -осевых мод в два раза уменьшатся, а  $y$ -осевых и  $z$ -осевых не изменятся
- 3) частоты осевых мод не изменятся
- 4) частоты всех осевых мод уменьшатся в два раза

Решение: Частоты  $x$ -осевых мод в два раза уменьшатся, так как  $f_{m00}$  обратно пропорциональны  $l$ . Частоты  $y$ -осевых и  $z$ -осевых мод не изменятся, так как они не зависят от  $l$ .

4. Самая низкая собственная частота помещения, имеющего форму прямоугольного параллелепипеда с размерами  $l = 10$  м,  $b = 8$  м,  $h = 4$  м, равна ...

Ответ: .....

Решение: Самая низкая собственная частота помещения равна:

$$f_{100} = \frac{c}{2l} = \frac{340}{20} = 17 \text{ Гц}.$$

### Примеры решения задач

1. Методом акустических измерений были определены резонансные частоты прямоугольного помещения:  $f_{100} = 20$  Гц,  $f_{010} = 30$  Гц,  $f_{001} = 40$  Гц. Определить объем помещения и частоту моды (2,2,1).

Решение: Резонансные частоты прямоугольного помещения равны:

$$f_{mnp} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{l}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{h}\right)^2}.$$

Отсюда для частот, указанных в условии задачи, получаем:

$$f_{100} = \frac{c}{2l}; f_{010} = \frac{c}{2b}; f_{001} = \frac{c}{2h}.$$

Находим длину, ширину и высоту помещения:

$$l = \frac{c}{2f_{100}} = \frac{340}{2 \cdot 20} = 8,5 \text{ м};$$

$$b = \frac{c}{2f_{010}} = \frac{340}{2 \cdot 30} = 5,67 \text{ м};$$

$$h = \frac{c}{2f_{001}} = \frac{340}{2 \cdot 40} = 4,25 \text{ м}.$$

Объем помещения:

$$V = l \cdot b \cdot h \approx 205 \text{ м}^3.$$

Частота моды (2,2,1) равна:

$$\begin{aligned} f_{221} &= \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{2}{l}\right)^2 + \left(\frac{2}{b}\right)^2 + \left(\frac{1}{h}\right)^2} = \sqrt{(2f_{100})^2 + (2f_{010})^2 + (f_{001})^2} = \\ &= \sqrt{40^2 + 60^2 + 40^2} = 82,5 \text{ Гц} \end{aligned}$$

2. Холодильник с частотой вращения вала компрессора 3000 об/мин установлен на небольшой кухне с размерами  $l = b = 3,4$  м,  $h = 2,4$  м. Почему уровень шума холодильника в данной ситуации гораздо выше, чем указано в техническом паспорте?

Решение: Если частота звука, излучаемого компрессором холодильника близка к одной из собственных (резонансных) частот помещения, то амплитуда звукового давления может возрасти в несколько раз. Частота звука холодильника равна  $f = 3000 \text{ 1/мин} = 50 \text{ Гц}$ .

Найдем частоты собственных колебаний помещения:

$$f_{100} = \frac{c}{2l} = \frac{340}{2 \cdot 3,4} = 50 \text{Гц}; f_{010} = \frac{c}{2b} = \frac{340}{2 \cdot 3,4} = 50 \text{Гц}; f_{001} = \frac{c}{2h} = \frac{340}{2,4 \cdot 2} \approx 71 \text{Гц}.$$

Расчеты показывают, что повышенный уровень шума обусловлен резонансными явлениями.

### ***Тестовые задания для самостоятельного выполнения***

#### ***1. Классификация собственных колебаний прямоугольного помещения***

##### ***1.1 Мода (1,2,0) является ...***

- 1) осевой
- 2) касательной
- 3) косой
- 4) прямой

##### ***1.2 Мода (0,2,0) является ...***

- 1) осевой
- 2) касательной
- 3) косой
- 4) прямой

##### ***1.3 Скользящей является ...***

- 1) мода (0,0,5)
- 2) мода (2,0,3)
- 3) мода (2,3,1)
- 4) мода (3,0,0)

#### ***2. Расчет собственных частот помещения***

##### ***2.1 Размеры помещения, имеющего форму прямоугольного параллелепипеда,***

$l = 10 \text{ м}, b = 8 \text{ м}, h = 4 \text{ м}$ . Собственная частота  $f_{100}$  равна ...

- 1) 340 Гц
- 2) 170 Гц
- 3) 17 Гц
- 4) 34 Гц

##### ***2.2 Размеры помещения, имеющего форму прямоугольного параллелепипеда,***

$l = 15 \text{ м}, b = 10 \text{ м}, h = 4 \text{ м}$ . Собственная частота  $f_{020}$  равна ...

- 1) 340 Гц
- 2) 170 Гц
- 3) 17 Гц
- 4) 34 Гц

##### ***2.3 Размеры помещения, имеющего форму прямоугольного параллелепипеда,***

$l = 15 \text{ м}, b = 10 \text{ м}, h = 5 \text{ м}$ . Собственная частота  $f_{001}$  равна ...

- 1) 340 Гц
- 2) 170 Гц
- 3) 17 Гц
- 4) 34 Гц

### *Задачи для самостоятельного решения*

1. Рассчитать первые пять резонансных частот для помещения размерами  $l = 8 \text{ м}$ ,  $b = 6 \text{ м}$ ,  $h = 2,5 \text{ м}$ .
2. Наименьшая собственная частота помещения равна  $f_{100} = 20 \text{ Гц}$ . Определить длину помещения. Будет ли в данном помещении усиливаться вследствие резонанса нота «ля» малой октавы (частота  $220 \text{ Гц}$ )?
3. Размеры прямоугольного помещения  $l = 6 \text{ м}$ ,  $b = 4 \text{ м}$ ,  $h = 2,5 \text{ м}$ . Какая из косых мод будет иметь самую низкую частоту? Найдите ее частоту для данного помещения.

## 2.2 Статистический метод расчета звукового поля в помещении

- Звуковое поле называется *однородным*, если средняя плотность звуковой энергии по всему объему звукового поля одинакова.
- Звуковое поле называется *изотропным*, если все направления потоков энергии волн, проходящих через любую точку поля, равновероятны.
- Однородное и изотропное звуковое поле называется *диффузным*.
- Условие применимости методов статистической акустики:

$$\lambda_{cp} < \frac{l_{min}}{3}, \text{ или } f_{cp} > \frac{1000}{l_{min}},$$

где  $l_{min}$  – наименьший линейный размер помещения,  $f_{cp}$  и  $\lambda_{cp}$  – средняя частота источника звука и, соответственно, средняя длина звуковой волны. При выполнении данного условия звуковое поле в помещении приближается по своим свойствам к диффузному.

• *Удельная мощность облучения границ* помещения  $I$  – это поток звуковой мощности, падающей на единицу площади во всех направлениях полупространства. В диффузном поле эта величина связана со скоростью звука  $c$  и плотностью звуковой энергии  $\varepsilon$  соотношением:

$$I = \frac{c\varepsilon}{4}.$$

• *Эквивалентная (или эффективная) площадь звукопоглощения* данной поверхности – это величина, численно равная произведению коэффициента звукопоглощения поверхности на ее площадь:  $A = \alpha S$  ( $m^2$ ).

Эквивалентная площадь звукопоглощения всех поверхностей помещения:  $A_{общ} = \sum A_i = \sum \alpha_i S_i$

• *Средний коэффициент звукопоглощения* поверхностей помещения – величина, равная  $\alpha_{cp} = A_{общ}/S_{общ}$ , где  $S_{общ}$  – общая площадь всех поверхностей помещения.

• Средняя плотность энергии звукового поля, создаваемого в помещении звуковым источником постоянной мощности  $W$  в стационарном режиме равна:

$$\varepsilon_0 = \frac{4W}{c \alpha_{cp} S_{общ}} = \frac{4W}{c A_{общ}}.$$

Уровень звука в децибелах при этом равен:

$$L = 10 \lg \frac{I}{I_0} = L_w - 10 \lg A_{общ} + 6,$$

где  $L_w$  – уровень мощности источника в децибелах.

- *Реверберацией* называется процесс затухания звука в помещении после выключения источника звука.

- *Стандартным временем реверберации* (временем реверберации помещения)  $T$  называется величина, равная времени, в течение которого средняя плотность звуковой энергии уменьшается в  $10^6$  раз (уровень звука снижается на 60 дБ).

- *Формула Эйринга* для расчета времени реверберации помещения, имеющего объем  $V$ :

$$T = \frac{0,163V}{-S_{\text{общ}} \ln(1 - \alpha_{\text{ср}})}.$$

- При небольших коэффициентах звукопоглощения ( $\alpha_{\text{ср}} < 0,2$ ) можно использовать приближенное выражение

$$T = \frac{0,163V}{\alpha_{\text{ср}} S_{\text{общ}}} = \frac{0,163V}{A_{\text{общ}}},$$

которое называется *формулой Сэбина*.

- Время реверберации является основной характеристикой качества восприятия звука в помещении.

В помещениях большого объема с поверхностями, обладающими невысокими коэффициентами звукопоглощения, время реверберации велико. Такие помещения называются *гулкими*. Небольшие помещения с хорошо поглощающими звук поверхностями характеризуются малым временем реверберации и называются *заглушенными*.

- Рекомендуемые (оптимальные) значения времени реверберации для помещений различного назначения (объемом до  $2000 \text{ м}^3$ ) приведены в таблице 1.1.

**Таблица 1.1** – Оптимальные значения времени реверберации

Тип помещения	$T_{\text{опт}}, \text{с}$		
	Низкие частоты $f < 200 \text{ Гц}$	Средние частоты $200 \leq f \leq 500 \text{ Гц}$	Высокие частоты $f > 1500 \text{ Гц}$
Речевые (классы, аудитории, лекционные залы)	0,3 – 0,5	0,4 – 0,5	0,3 – 0,5
Музыкальные студии и залы	1,6 – 2,0	1,65 – 1,8	0,5 – 1,0
Помещения общего назначения	0,5 – 1,0	0,8 – 1,0	0,5 – 1,0

### **Примеры тестовых заданий**

1. Однородное звуковое поле - это ...

- 1) поле, во всех точках которого средняя плотность энергии звуковых колебаний одинакова
- 2) изотропное звуковое поле
- 3) звуковое поле в открытом пространстве
- 4) звуковое поле в помещении

Решение: Звуковое поле называется однородным, если средняя плотность звуковой энергии во всех его точках одинакова.

2. Размеры помещения, имеющего форму прямоугольного параллелепипеда,

$l = 10 \text{ м}$ ,  $b = 8 \text{ м}$ ,  $h = 4 \text{ м}$ . Методы статистической акустики для расчета звукового поля в этом помещении можно использовать, если средняя длина звуковой волны равна...

- 1) 12 м
- 2) 9 м
- 3) 6 м
- 4) 1 м

Решение: Критерий применимости методов статистической акустики имеет вид:

$$\lambda_{cp} < \frac{l_{min}}{3},$$

где  $l_{min}$  - наименьший из размеров помещения. Для данного помещения  $l_{min} = 4 \text{ м}$ . Следовательно, критерию применимости удовлетворяет  $\lambda_{cp} = 1 \text{ м}$ .

3. Площадь поверхности материала, имеющего коэффициент звукопоглощения 0,6, равна  $20 \text{ м}^2$ . Эквивалентная площадь звукопоглощения этой поверхности равна ...

- 1)  $20 \text{ м}^2$
- 2)  $18 \text{ м}^2$
- 3)  $16 \text{ м}^2$
- 4)  $12 \text{ м}^2$

Решение: Эквивалентная площадь звукопоглощения равна  $A = \alpha S = 0,6 \cdot 20 = 12 \text{ м}^2$ .

4. Стандартным временем реверберации помещения называется...

- 1) время установления звукового поля в помещении
- 2) время работы источника звука в помещении
- 3) время, за которое уровень звука в помещении после выключения источника звука снижается на 60 дБ
- 4) время, в течение которого производятся замеры уровня звука в помещении

Решение: По определению стандартным временем реверберации называется время, за которое уровень звука в помещении после выключения источника звука снижается на 60 дБ



5. Время реверберации аудитории при увеличении ее объема ...

- 1) уменьшается
- 2) увеличивается
- 3) не изменяется
- 4) может уменьшаться, а может и увеличиваться в зависимости от конкретных условий

Решение: Из формулы Сэбина

$$T = \frac{0,163V}{\alpha_{cp} S_{общ}} = \frac{0,163V}{A_{общ}}$$

следует, что при увеличении объема помещения  $T$  увеличивается.

### **Примеры решения задач**

1. При каком значении коэффициента звукопоглощения эквивалентная площадь звукопоглощения ковровина, покрывающего пол комнаты площадью  $20 \text{ м}^2$ , будет такой же, как у образца идеального звукопоглощающего материала площадью  $8 \text{ м}^2$ ?

Решение: Эквивалентная площадь звукопоглощения равна:

$$A = \alpha S.$$

Так как по условию  $A_1 = A_2$ , то

$$\alpha_1 S_1 = \alpha_2 S_2.$$

С учетом того, что коэффициент звукопоглощения идеального звукопоглотителя  $\alpha_2 = 1$ , получаем для коэффициента звукопоглощения ковровина:

$$\alpha_1 = \alpha_2 \frac{S_2}{S_1} = 1 \cdot \frac{8}{20} = 0,4.$$

2. Источник звука мощностью  $0,05 \text{ Вт}$  работает в помещении с эквивалентной площадью звукопоглощения  $20 \text{ м}^2$ . Определить среднюю плотность звуковой энергии. Звуковое поле считать установившимся.

Решение: Стационарное значение средней плотности звуковой энергии:

$$\varepsilon_0 = \frac{4W}{cA_{общ}} = \frac{4 \cdot 0,05}{340 \cdot 20} = 2,9 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3} = 2,9 \frac{\text{мкДж}}{\text{м}^3}.$$

3. Во сколько раз изменится время реверберации помещения, если при неизменном объеме и общей площади поверхностей средний коэффициент звукопоглощения уменьшится в 5 раз?

Решение: В соответствии с формулой Сэбина:

$$T_1 = \frac{0,163V}{\alpha_{cp1}S_{общ}},$$

$$T_2 = \frac{0,163V}{\alpha_{cp2}S_{общ}}.$$

Следовательно:

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{\alpha_{cp1}}{\alpha_{cp2}} = 5,$$

то есть время реверберации увеличится в 5 раз.

4. Определить эквивалентную площадь звукопоглощения для помещения объемом  $100 \text{ м}^3$ , если известно, что стандартное время реверберации в этом помещении равно  $1,2 \text{ с}$ . Известно, что средний коэффициент звукопоглощения поверхностей помещения равен  $\alpha_{cp} = 0,06$ . Во сколько раз нужно увеличить  $\alpha_{cp}$ , чтобы время реверберации соответствовало оптимальному значению для речевой аудитории?

Решение: Так  $\alpha_{cp} < 0,2$ , то для времени реверберации можно использовать формулу Сэбина:

$$T = \frac{0,163V}{A_{общ}}.$$

Следовательно:

$$A_{общ} = \frac{0,163V}{T} = \frac{0,163 \cdot 100}{1,2} = 13,6 \text{ м}^2.$$

Для достижения оптимального значения времени реверберации для речевой аудитории  $T_{опт} = 0,5 \text{ с}$  (см. таблицу 1.1) эквивалентная площадь звукопоглощения должна быть равна:

$$A_{общ}^{опт} = \frac{0,163V}{T_{опт}} = \frac{0,163 \cdot 100}{0,5} = 32,6 \text{ м}^2.$$

Так как общая площадь поверхностей помещения  $S_{общ}$  не меняется, то:

$$\frac{\alpha_{cp}^{опт}}{\alpha_{cp}} = \frac{A_{общ}^{опт}}{A_{общ}} = \frac{32,6}{13,6} = 2,4.$$

### **Тестовые задания для самостоятельного выполнения**

#### **1. Однородность и изотропность звукового поля. Диффузное звуковое поле**

##### **1.1 Изотропное звуковое поле – это ...**

- 1) поле, во всех точках которого средняя плотность энергии звуковых колебаний одинакова
- 2) звуковое поле, в каждой точке которого средняя интенсивность звуковой волны по всем направлениям одинакова
- 3) звуковое поле в открытом пространстве
- 4) звуковое поле плоской гармонической волны

##### **1.2 Диффузное звуковое поле – это ...**

- 1) однородное изотропное звуковое поле
- 2) звуковое поле точечного источника в открытом пространстве
- 3) звуковое поле в длинной трубе (звукопроводе)
- 4) звуковое поле плоской гармонической волны

##### **1.3 Звуковое поле, близкое к диффузному, может быть создано ...**

- 1) в открытом пространстве
- 2) в сферическом объеме
- 3) в длинной трубе (звукопроводе)
- 4) в помещении большого объема

#### **2. Критерий применимости методов статистической акустики**

**2.1** Размеры помещения, имеющего форму прямоугольного параллелепипеда,  $l = 10$  м,  $b = 8$  м,  $h = 4$  м. Методы статистической акустики для расчета звукового поля в этом помещении можно использовать, если средняя частота звуковой волны равна...

- 1) 300 Гц      2) 200 Гц      3) 100 Гц      4) 50 Гц

**2.2** Чему равна минимальная частота звука, при которой можно использовать статистический метод расчета звукового поля в помещении с размерами  $l = 6$  м,  $b = 4$  м,  $h = 2,5$  м?

Ответ: .....

**2.3** Чему равна наибольшая средняя длина звуковой волны, при которой можно использовать статистический метод расчета звукового поля в помещении с размерами  $l = 8$  м,  $b = 6$  м,  $h = 2,4$  м?

Ответ: .....

#### **3. Эквивалентная площадь звукопоглощения**

**3.1** Площадь поверхности материала, имеющего коэффициент звукопоглощения 0,1, равна  $200 \text{ м}^2$ . Эквивалентная площадь звукопоглощения этой поверхности равна ...

- 1)  $20 \text{ м}^2$       2)  $18 \text{ м}^2$       3)  $16 \text{ м}^2$       4)  $14 \text{ м}^2$

3.2 Эквивалентная площадь звукопоглощения образца материала с коэффициентом звукопоглощения 0,25 равна  $5 \text{ м}^2$ . Площадь поверхности образца ...

- 1)  $40 \text{ м}^2$       2)  $30 \text{ м}^2$       3)  $20 \text{ м}^2$       4)  $10 \text{ м}^2$

3.3 Эквивалентная площадь звукопоглощения образца материала площадью  $10 \text{ м}^2$  равна  $5 \text{ м}^2$ . Коэффициент звукопоглощения материала ...

- 1) 0,25      2) 0,5      3) 0,75      4) 1

#### 4. Оценка времени реверберации

4.1 Время реверберации помещения размерами  $l = 10 \text{ м}$ ,  $b = 10 \text{ м}$ ,  $h = 4 \text{ м}$  при эквивалентной площади звукопоглощения  $80 \text{ м}^2$  равно ...

Ответ: .....

4.2 Время реверберации помещения размерами  $l = 20 \text{ м}$ ,  $b = 10 \text{ м}$ ,  $h = 4 \text{ м}$  при эквивалентной площади звукопоглощения  $100 \text{ м}^2$  равно ...

Ответ: .....

4.3 Время реверберации помещения размерами  $l = 20 \text{ м}$ ,  $b = 10 \text{ м}$ ,  $h = 4 \text{ м}$  при эквивалентной площади звукопоглощения  $80 \text{ м}^2$  равно ...

Ответ: .....

#### 5. Стандартное время реверберации как характеристика акустических качеств помещения

5.1 Время реверберации помещения при увеличении эквивалентной площади звукопоглощения ...

- 1) уменьшается  
2) увеличивается  
3) не изменяется  
4) может уменьшаться, а может и увеличиваться в зависимости от конкретных условий

5.2 Помещение небольшого объема с поверхностями, хорошо поглощающими звук является ...

- 1) гулким  
2) заглушенным  
3) реверберационной камерой

5.3 Помещение большого объема с поверхностями, хорошо отражающими звук является ...

- 1) гулким  
2) заглушенным  
3) реверберационной камерой

### ***Задачи для самостоятельного решения***

1. Пол комнаты площадью  $20 \text{ м}^2$  покрыт линолеумом. На полу лежит ковер длиной  $4 \text{ м}$  и шириной  $3 \text{ м}$ . Определить эквивалентную площадь звукопоглощения и средний коэффициент звукопоглощения пола комнаты. Коэффициент звукопоглощения линолеума принять равным  $\alpha_1 = 0,04$ , коэффициент звукопоглощения ковра  $\alpha_2 = 0,25$ .

2. Звуковая мощность вентилятора равна  $40 \text{ дБ}$ . Определить уровень шума, которые создает вентилятор в помещении с эквивалентной площадью звукопоглощения  $15 \text{ м}^2$ . Звуковое поле считать установившимся, резонансные эффекты не учитывать.

3. Для улучшения качества восприятия звука в помещении верхняя часть стен была покрыта звукопоглощающей облицовкой, в результате чего средний коэффициент звукопоглощения в данном помещении увеличился в 2 раза. Как изменились при этом эквивалентная площадь звукопоглощения и стандартное время реверберации?

4. Студия звукозаписи представляет собой прямоугольное помещение размерами  $l = 8 \text{ м}$ ,  $b = 6 \text{ м}$ ,  $h = 2,4 \text{ м}$ . Пол покрыт линолеумом с коэффициентом звукопоглощения  $\alpha_1 = 0,04$ . Стены и потолок отделаны звукопоглощающей облицовкой с  $\alpha_2 = 0,4$ , окна отсутствуют. Оценить стандартное время реверберации для данного помещения.

### 3 ПРОБЛЕМЫ БОРЬБЫ С ШУМОМ

#### 3.1 Шум. Классификация шумов

• *Шум* – это неупорядоченный во времени звуковой сигнал, который характеризуется сплошным или смешанным спектром (с точки зрения физической акустики).

*Шум* – это любой звук, оцениваемый негативно и наносящий вред здоровью (с санитарно-гигиенической точки зрения).

• Шумы принято классифицировать по следующим параметрам:

- по уровню шума;
- по характеру спектра;
- по временным характеристикам;
- по механизму возникновения;
- по способу распространения.

• Уровень звука (в дБ) определяется по формуле:

$$L = 10 \lg \frac{I}{I_0} = 20 \lg \frac{p}{p_0},$$

где  $I$  – сила звука,  $p$  – звуковое давление,  $I_0$  и  $p_0$  – порог слышимости на частоте 1000 Гц ( $I_0 = 10^{-12} \text{ Вт/м}^2$ ,  $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$ ).

• *Корректированный уровень шума* (в дБ(A)) равен:

$$L_A = L_I - \Delta L_A,$$

где  $\Delta L_A$  – зависящие от частоты поправки, приведенные в таблице 1.2.

**Таблица 1.2** – Поправки к уровню шума (коррекция A)

Частота, Гц	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$\Delta L_A$ , дБ	26,3	16,1	8,6	3,2	0	-1,2	-1	1,1

• *Эквивалентный уровень* непостоянного во времени шума определяют по формуле:

$$L_{A_{\text{экв}}} = 10 \lg \frac{1}{T} \sum_{i=1}^m t_i 10^{0,1 L_i},$$

где  $T$  – время усреднения,  $m$  – число измерений,  $L_i$  – результат отдельного измерения,  $t_i$  – интервал времени между измерениями.

• По спектру шумы делят на широкополосные и тональные.

Для *широкополосных* шумов характерен сплошной или смешанный спектр. В зависимости от положения максимума спектра шумы подразделяют на *низкочастотные* ( $f_{\text{max}} < 300$  Гц), *среднечастотные* ( $300 \text{ Гц} < f_{\text{max}} < 800$  Гц) и *высокочастотные* ( $f_{\text{max}} > 800$  Гц).

*Тональные* шумы – это шумы, спектр которых близок к дискретному.

- По временным характеристикам шумы делят на постоянные и непостоянные.

Шум называют *постоянным*, если его уровень в течение 8 часов изменяется не более, чем на 5 дБ(А).

Все остальные шумы - *непостоянные*:

- *колеблющиеся во времени* (уровень звука непрерывно изменяется с течением времени);

- *прерывистые* (уровень звука изменяется ступенчато на 5 дБ(А) и более, причем длительность интервалов, в течение которых уровень звука остается постоянным, составляет одну секунду и более);

- *импульсные*, состоящие из одного или нескольких сигналов, каждый длительностью менее одной секунды.

- По механизму возникновения различают: *механический* шум, *аэрогидродинамический* шум и шум *электромагнитного происхождения*.

По способу распространения различают: *воздушный*, *структурный* и *ударный* шум.

- Источники шума в жилых помещениях можно разделить на *внутренние* и *внешние*:

- к шумам, излучаемым внутренними источниками, относятся бытовые шумы, возникающие в доме, в соседних комнатах и квартирах и шумы инженерного оборудования;

- внешними источниками шума являются транспорт (автомобильный, рельсовый, воздушный), промышленные предприятия, стройки, машины и механизмы службы городского коммунального хозяйства, спортивные, игровые площадки и так далее.

- Основным источником *производственного шума* является работающее оборудование, непосредственно задействованное в производстве (станки, машины, агрегаты) и обслуживающее (системы вентиляции, энергоснабжения, транспорт).

- Любое транспортное средство в процессе движения излучает звук. Поэтому автостреды, мосты, тоннели, аэропорты, а также наземные и подземные железные дороги являются источниками *транспортного шума*.

### 3.2 Действие шума на организм человека. Контроль уровня шума

- *Влияние шума на слух*: кратковременное воздействие шумов высокого уровня приводит к *обратимому сдвигу порога слышимости*, при увеличении длительности воздействия сдвиг порога слышимости становится *необратимым*.

- *Влияние шума на вегетативную нервную систему* проявляется даже при небольших уровнях звука (40-70 дБ(А)) и не зависит от субъективного восприятия шума. Из вегетативных реакций наиболее выраженными являются нарушение периферического кровообращения и повышение артериального давления.

- *Воздействие на центральную нервную систему* вызывает увеличение скрытого периода зрительно-моторной реакции, к нарушению подвижности нервных процессов, нарушает биоэлектрическую активность головного мозга с проявлением общих функциональных изменений в организме.

- *Влияние шума на психоэмоциональное состояние*: психические реакции появляются уже начиная с уровней шума 30дБ(А) и по мере нарастания интенсивности шума становятся все более выраженными: от раздражения и утомления до испуга и стресса.

- *Симптомы «шумовой болезни»*:

- объективные: снижение слуха, изменение функции пищеварения, сердечно-сосудистая недостаточность, нейроэндокринные расстройства;

- субъективные: раздражительность, головокружения, головные боли, ухудшение памяти, быстрая утомляемость, снижение аппетита, боль в ушах.

- *Нормирование шумовых характеристик*: установление научно обоснованных предельно допустимых величин шума, которые при ежедневном систематическом воздействии не вызывают существенных изменений в состоянии здоровья человека и не мешают его нормальной трудовой деятельности и отдыху.

- Основной акустической величиной для описания и оценки уровня шума является *эквивалентный уровень звука*, определяемый для заданного интервала оценки по времени.

- Предельно допустимые и рекомендуемые уровни шума жилых помещений, рабочих мест, различных территорий населенных пунктов устанавливаются соответствующими нормативными документами.

- Основные нормативные документы:

ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности

СП 51.13330.2011 Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003

СН 2.2.4-2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки



### 3.3 Методы и средства защиты от шума

- Основные мероприятия по защите от шума:
  - устранение причин возникновения шума или снижение его в источнике;
  - ослабление шума на путях передачи (глушение, звукоизоляция, звукопоглощение);
  - непосредственная защита людей.
- Методы *коллективной защиты* от шума:
  - *организационно-технические* (применение малошумных технологических процессов; оснащение шумных машин средствами дистанционного управления и автоматического контроля; применение малошумных машин; совершенствование технологии ремонта и обслуживания машин; использование рациональных режимов труда и отдыха работников на шумных предприятиях);
  - *архитектурно-планировочные* (рациональное акустическое решение планировок зданий и генеральных планов объектов; размещение технологического оборудования, машин и механизмов в производственных помещениях с учетом степени их шумности; правильное размещение рабочих мест; рациональное акустическое планирование зон и режимов движения транспортных средств и транспортных потоков; создание шумопоглощающих зеленых зон и защитных экранов);
  - *акустические* (использование глушителей шума; звукоизоляция; звукопоглощение; методы активного глушения шума).
- *Индивидуальные средства защиты* от шума: наушники, закрывающие ушную раковину снаружи; противошумные вкладыши, перекрывающие наружный слуховой проход; специальные защитные шлемы и каски, защищающие не только от воздушного шума, но и от шума, который может распространяться по костям черепа. Для работы в особо шумных условиях используют противошумные костюмы.

#### *Примеры тестовых заданий*

1. Длительное воздействие шума приводит в первую очередь к ...
  - 1) снижению порога слышимости в области низких и высоких частот
  - 2) повышению порога слышимости в области низких и высоких частот
  - 3) снижению порога слышимости в области средних частот
  - 4) повышению порога слышимости в области средних частот

Решение: Воздействие шума приводит к снижению чувствительности слухового аппарата: порог слышимости повышается. В первую очередь повышение порога слышимости происходит в области низких и высоких частот.

2. В соответствии с действующими нормативами в ночное время предельно допустимые уровни шума значительно ниже, чем в дневное.

*Ночным* считается время ...

- 1) с 21 часа до 5 часов
- 2) с 22 часов до 6 часов
- 3) с 23 часов до 7 часов
- 4) с 24 часов до 8 часов

Решение: Ночным считается время с 23 часов до 7 часов.

3. Шум автотранспорта на городских магистралях в дневное время по временным характеристикам является ...

- 1) импульсным
- 2) прерывистым
- 3) колеблющимся
- 4) постоянным

Решение: Так как поток автотранспорта на городских автомагистралях в дневное время практически является сплошным, то создаваемый им шум – постоянный во времени.

4. К внутренним источникам шума в жилых помещениях относится ...

- 1) автотранспорт
- 2) бытовая техника
- 3) лифтовая машина
- 4) машины и механизмы службы коммунального хозяйства

Решение: По отношению к помещениям внутри квартиры внутренним источником шума является бытовая техника. Все остальные перечисленные источники шума – внешние.

5. К структурным шумам относится ...

- 1) шум работающего компьютера
- 2) звук работающего в соседней комнате телевизора
- 3) стук в дверь
- 4) сигнализация автомобиля во дворе

Решение: Структурный шум возникает при механическом воздействии на конструкции помещения. Поэтому структурным шумом является стук в дверь.

6. Резонансные звукопоглотители (РЗП) используются для поглощения ...

- 1) тонального или узкополосного шума
- 2) широкополосного шума
- 3) шума автотранспорта
- 4) структурного шума

Решение: РЗП предназначены для поглощения тонального шума.

## **Тестовые задания для самостоятельного решения**

### **1. Действие шума на организм человека**

1.1 Наиболее неблагоприятное воздействие на нервную систему оказывает

...

- 1) постоянный широкополосный шум
- 2) импульсный тональный шум
- 3) колеблющийся узкополосный шум
- 4) постоянный тональный шум

1.2 К объективным симптомам «шумовой болезни» относятся ...

*(Выберите не менее двух ответов)*

- 1) снижение слуха
- 2) быстрая утомляемость
- 3) сердечно-сосудистая недостаточность
- 4) изменение функции пищеварения
- 5) головокружение

1.3 К субъективным симптомам «шумовой болезни» относятся ...

*(Выберите не менее двух ответов)*

- 1) снижение слуха
- 2) головные боли
- 3) сердечно-сосудистая недостаточность
- 4) нейроэндокринные расстройства
- 5) головокружение

### **2. Нормирование уровня шума**

2.1 Действующими правилами и стандартами нормируется ...

- 1) частота звуковых колебаний
- 2) длина звуковой волны
- 3) уровень звука
- 4) спектр звуковых сигналов

2.2 Основным акустическим параметром, используемым для нормирования шума, является эквивалентный скорректированный уровень шума  $L_A$ , который измеряется в ...

- 1) Па
- 2) дБ
- 3) Вт/м<sup>2</sup>
- 4) дБ(А)

### **3. Классификация источников шума**

3.1 Шум работающего компьютера по временным характеристикам является ...

- 1) импульсным
- 2) прерывистым
- 3) колеблющимся
- 4) постоянным

3.2 К внешним источникам шума в жилых помещениях относится ...

- 1) автотранспорт
- 2) сантехническое оборудование
- 3) бытовая техника
- 4) стук в дверь

3.3 К воздушным шумам относится ...

- 1) наполнение ванны водой
- 2) стук в дверь
- 3) перестановка мебели в соседней квартире
- 4) звонок мобильного телефона

4. *Методы и средства защиты от шума*

4.1 Наиболее эффективным методом борьбы с шумом является ...

- 1) использование звукопоглощающих материалов
- 2) применение индивидуальных средств защиты от шума
- 3) снижение уровня шума в источнике
- 4) звукоизоляция

4.2 Для снижения уровня шума оборудования в производственных помещениях наиболее эффективным является использование ...

- 1) объемных звукопоглотителей
- 2) звукопоглощающей облицовки стен и потолка
- 3) резонансных звукопоглотителей
- 4) звукопоглощающих конструкций кулисного типа

4.3 Использование зеленых насаждений и защитных экранов вдоль автомагистралей относится к ...

- 1) индивидуальным методам защиты от шума
- 2) архитектурно-планировочным методам защиты от шума
- 3) акустическим методам защиты от шума
- 4) организационно-техническим методам защиты от шума

## РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКАЯ (КОНТРОЛЬНАЯ) РАБОТА

В соответствии с учебными планами подготовки бакалавров по направлению «Строительство» студенты **очной формы** обучения БГИТУ выполняют расчетно-графическую работу, содержащую семь заданий (**задания 1-7 данного раздела**). Для каждого задания приведены условие, таблица числовых данных для различных вариантов и методические указания по выполнению задания. Номер варианта для каждого студента задает преподаватель на первом практическом занятии. Защита расчетно-графической работы проходит в форме собеседования на практических занятиях и консультациях.

Студенты **заочной формы** обучения выполняют контрольную работу, содержащую четыре задания (**задания 1, 2, 5, 6**). Номер варианта определяет преподаватель на установочной лекции. Защита контрольной работы проходит в форме собеседования на консультациях в течение семестра или на практических занятиях во время зачетно-экзаменационной сессии.

При оформлении расчетно-графической (контрольной) работы должны быть выполнены следующие требования:

1. Выполненные задания располагаются в порядке нумерации. Каждое задание начинается с новой страницы. Условие каждого задания должно быть приведено **полностью**, без сокращений. Далее нужно записать условие в краткой форме, перевести числовые данные в единицы СИ, а затем переходить к решению. В тех случаях, когда это возможно, следует сделать чертёж, выполненный с помощью чертёжных принадлежностей.

2. Решение должно сопровождаться подробными **пояснениями** (см. Методические указания по выполнению задания). В частности, необходимо записать исходную общую формулу, указать названия и физический смысл входящих в нее величин, затем выразить искомую величину в виде рабочей формулы.

3. После получения рабочей формулы в нее следует подставить числовые значения величин (в соответствии с таблицей вариантов), выраженные в единицах СИ, и произвести вычисления. При этом конечный результат должен быть округлен с точностью до третьей значащей цифры (например:  $0,00362341 \approx 0,00362 = 3,62 \cdot 10^{-3}$ ).

4. Результат вычислений (ответ) записывается с использованием кратных и дольных приставок (например:  $0,00362 \text{ м} = 3,62 \text{ мм}$ ).

5. Графики должны быть построены на миллиметровой бумаге.

## 1 Определение параметров звуковой волны

Плоская звуковая волна в воздухе с частотой  $f$  при температуре  $t^{\circ}\text{C}$  имеет уровень звукового давления  $L_p(\text{дБ})$  (см. табл.2.1).

Вычислить:

- скорость звука  $c$  и волновое сопротивление среды  $\rho_0 c$ ,
- длину звуковой волны  $\lambda$ ,
- амплитуду звукового давления  $p_{\max}(\text{Па})$ ,
- амплитуду колебательной скорости  $v_{\max}$  и смещения  $\xi_{\max}$  частиц воздуха в волне,
- амплитуду колебаний температуры в волне  $\delta T_{\max}$ ,
- уровень громкости в фонах.

Принять порог слышимости  $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{Па}$ .

**Таблица 2.1** – Числовые данные к заданию 1

Вариант	$f, \text{Гц}$	$t, ^{\circ}\text{C}$	$L_p, \text{дБ}$
1	300	0	70
2	400	5	80
3	500	10	90
4	600	15	100
5	700	20	110
6	800	25	120
7	900	-5	130
8	1000	-10	140
9	200	-15	60
10	100	-20	50
11	300	5	90
12	400	10	100
13	500	15	110
14	600	20	120
15	700	25	130
16	800	-5	140
17	900	-10	60
18	1000	-15	50
19	200	-20	70
20	100	0	80
21	1100	0	80
22	1200	5	90
23	1300	10	100
24	1400	15	110
25	1500	20	120

**Указания по выполнению:**

Скорость звука в воздухе определяется соотношением:

$$c = \sqrt{\frac{\gamma P_0}{\rho_0}},$$

где  $\gamma$  - коэффициент Пуассона (для воздуха – 1,4),  $P_0$  – атмосферное давление (принять  $P_0 = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ),  $\rho_0$  – плотность воздуха в отсутствие звука.

Из уравнения Менделеева- Клапейрона следует, что:

$$\rho_0 = \frac{m}{V} = \frac{P_0 M}{RT},$$

где  $R = 8,31 \text{ Дж/моль} \cdot \text{К}$  – газовая постоянная,  $M = 0,029 \text{ кг/моль}$  – молярная масса воздуха,  $T$  – температура воздуха (К).

Таким образом, для скорости звука получаем:

$$c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}.$$

Волновое сопротивление воздуха:

$$\rho_0 c = \frac{P_0 M}{RT} \cdot \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} = P_0 \sqrt{\frac{\gamma M}{RT}}.$$

Длина звуковой волны:

$$\lambda = \frac{c}{f},$$

где  $f$  – частота звука.

Уровень звука определяется соотношением:

$$L_p = 10 \lg \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \lg \frac{p}{p_0},$$

где  $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$  – порог слышимости на частоте 1000 Гц,  $p$  – эффективное звуковое давление ( $p = p_{\max} / \sqrt{2}$ ).

Следовательно, если задано значение уровня звука  $L_p$ , то амплитуда звукового давления в волне:

$$p_{\max} = \sqrt{2} p = 1,41 p_0 \cdot 10^{L_p / 20}.$$

Зная  $p_{max}$ , можно определить амплитуду скорости колебаний частиц воздуха в звуковой волне:

$$V_{max} = \frac{p_{max}}{\rho_0 c}.$$

Так как  $V_{max} = \omega \xi_{max} = 2\pi f \xi_{max}$ , то амплитуда смещения частиц в волне:

$$\xi_{max} = \frac{V_{max}}{2\pi f}.$$

Амплитуда колебаний температуры:

$$\delta T_{max} = \frac{(\gamma - 1)TV_{max}}{c}.$$

Для определения уровня громкости следует использовать кривые равной громкости (рисунок 2.1).

Например: при частоте колебаний 500 Гц и уровне звукового давления 30 дБ уровень громкости примерно равен 25 фон.

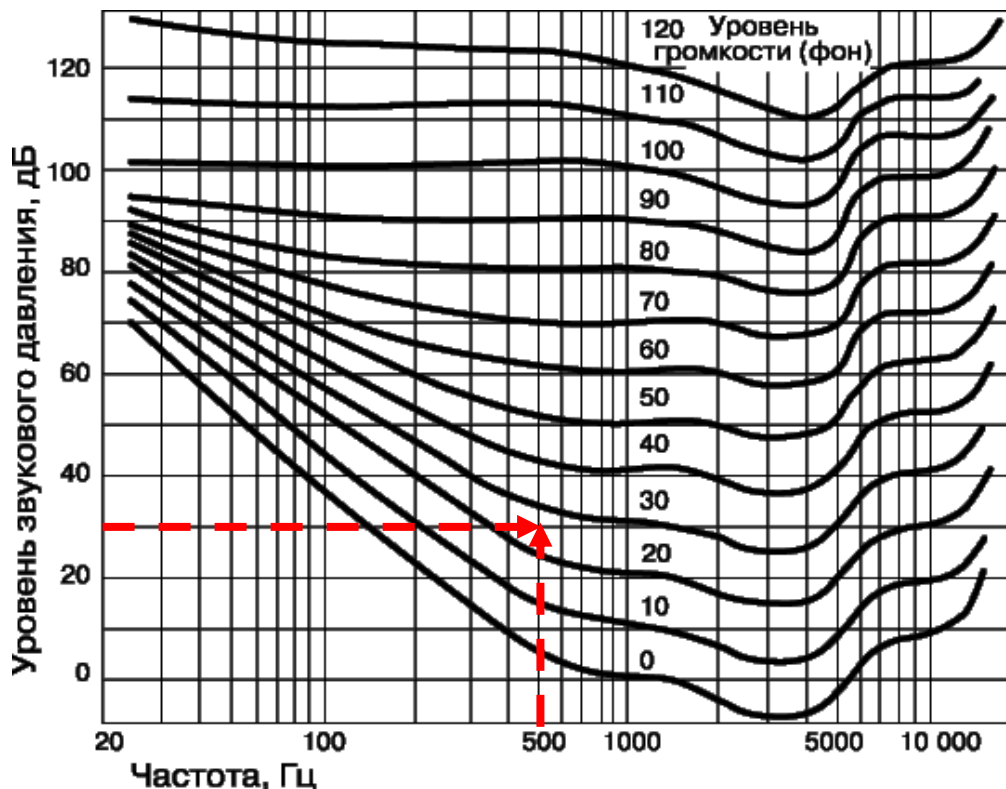


Рисунок 2.1 – Кривые равной громкости



## 2 Определение суммарного уровня звукового давления для нескольких источников звука

Определить суммарный уровень звукового давления для четырех источников звука с уровнями звука  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  и  $L_4$  (см. табл. 2.2).

**Таблица 2.2** – Числовые данные к заданию 2

Вариант	$L_1, \text{дБ}$	$L_2, \text{дБ}$	$L_3, \text{дБ}$	$L_4, \text{дБ}$
1	105	110	90	95
2	104	112	98	100
3	85	103	94	108
4	86	95	101	106
5	100	94	102	105
6	84	89	98	99
7	91	92	107	80
8	90	96	109	100
9	102	100	93	88
10	101	103	105	98
11	105	112	90	100
12	104	110	98	95
13	85	95	94	106
14	86	103	101	108
15	100	89	102	99
16	84	94	98	105
17	91	96	107	100
18	90	92	109	80
19	102	103	93	98
20	101	100	105	88
21	104	110	98	95
22	105	112	90	100
23	86	103	101	108
24	100	95	102	106
25	84	94	98	105

**Указания по выполнению:**

При рассмотрении звукового поля, создаваемого несколькими некогерентными источниками звука, суммарная интенсивность звука равна:

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_N,$$

где  $I_i$  – интенсивность звука, создаваемая в рассматриваемой точке  $i$ -м источником звука.

Так как уровень звука в децибелах определяется соотношением:

$$L = 10 \lg \frac{I}{I_0},$$

где  $I_0 = 10^{-12} \text{ Вт/м}^2$  – порог слышимости на частоте 1000 Гц, то результирующий (суммарный) уровень звука равен:

$$L = 10 \lg \left( \frac{I_1}{I_0} + \frac{I_2}{I_0} + \dots + \frac{I_N}{I_0} \right) = 10 \lg \left( 10^{L_1/10} + 10^{L_2/10} + \dots + 10^{L_N/10} \right) \text{ дБ}$$

### 3 Отражение плоской звуковой волны от плоской поверхности с конечным импедансом

Плоская звуковая волна падает под углом  $\varphi$  на плоскую поверхность с импедансом  $Z_1 = R_1 + Y_1$ , выраженным в единицах волнового сопротивления воздуха  $\rho_0 c$  (см. табл. 2.3). Построить графики угловой зависимости коэффициента отражения  $r(\varphi)$  и коэффициента поглощения  $\alpha(\varphi)$  в пределах от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ .

**Таблица 2.3** – Числовые данные к заданию 3

Вариант	$R_1$	$Y_1$
1	1,50	0,50
2	0,48	-0,65
3	1,04	0,40
4	0,30	0,30
5	2,15	-0,04
6	5,50	1,50
7	0,60	0,08
8	3,25	-0,12
9	0,80	0,02
10	1,80	1,25
11	1,50	-0,65
12	0,38	0,40
13	1,04	0,30
14	0,30	-0,04
15	2,15	1,50
16	5,50	0,08
17	0,60	-0,12
18	3,25	0,02
19	0,80	1,25
20	1,80	0,50
21	2,5	-0,3
22	3,0	0,2
23	1,2	0,12
24	1,6	-0,2
25	2,0	0,2



#### 4 Прохождение звуковой волны через слой материала

Построить графики зависимости коэффициента прохождения звуковой волны через плоский однородный слой материала и индекса звукоизоляции слоя (в дБ) от частоты звука в пределах от 100 Гц до 1000 Гц. Толщина слоя  $d$ , плотность материала  $\rho_2$ , скорость звука в материале слоя  $c_2$  (см. табл. 2.5).

**Таблица 2.5** – Числовые данные к заданию 4

Вариант	$d, м$	$\rho_2, кг/м^3$	$c_2, м/с$
1	0,3	1300	3500
2	0,1	1300	3500
3	0,25	2500	3700
4	0,8	2500	3700
5	0,35	3100	4000
6	0,15	1800	2300
7	0,05	2500	3700
8	0,4	1300	3500
9	0,02	3100	4000
10	0,12	1800	2300
11	0,2	1300	3500
12	0,4	1300	3500
13	0,35	2500	3700
14	0,45	2500	3700
15	0,25	3100	4000
16	0,45	3100	4000
17	0,2	1800	2300
18	0,5	1800	2300
19	0,55	2500	3700
20	0,65	2500	3700
21	0,55	3100	4000
22	0,65	3100	4000
23	0,3	1800	2300
24	0,4	1800	2300
25	0,65	2500	3700

**Указания по выполнению:**

Коэффициент прохождения звуковой волны через слой материала толщиной  $d$  при нормальном падении звуковой волны равен:

$$t = \frac{2}{\sqrt{\left(R_1/R_2 + R_2/R_1\right)^2 \sin^2 k_2 d + 4 \cos^2 k_2 d}},$$

где  $R_1 = \rho_0 c$  – волновое сопротивление воздуха (принять  $R_1 = 420 \text{ кг/м}^2 \text{с}$ ),

$R_2 = \rho_2 c_2$  – волновое сопротивление материала,

$k_2 = \omega/c_2 = 2\pi f/c_2$  – волновое число звуковой волны в материале.

Коэффициент звукоизоляции слоя определяется формулой:

$$\eta = \frac{1}{t^2}.$$

Звукоизоляция слоя в дБ (индекс звукоизоляции слоя):

$$R_{из} = 10 \lg \eta.$$

Для построения графиков  $t(f)$  и  $R_{из}(f)$  расчет производится в диапазоне частот от 100 до 1000 Гц с шагом 100 Гц. Результаты вычислений удобно представить в виде таблицы (см. табл. 2.6).

**Таблица 2.6** – Результаты расчетов к заданию 4

$f, \text{ Гц}$	$k_2 d$	$\sin^2 k_2 d$	$\cos^2 k_2 d$	$t$	$\eta$	$R_{из}, \text{ дБ}$
100						
200						
300						
400						
500						
600						
700						
800						
900						
1000						

## 5 Определение собственных (резонансных) частот прямоугольного помещения

Построить спектр собственных частот помещения, имеющего форму прямоугольного параллелепипеда длиной  $l$ , шириной  $b$  и высотой  $h$  (см. табл. 2.7) в пределах от 0 до 100 Гц.

**Таблица 2.7** – Числовые данные к заданию 5

Вариант	$l, м$	$b, м$	$h, м$
1	6	6	4
2	12	6	4
3	7	5,5	3,5
4	10	5	3,5
5	10	10	4
6	12	8	4
7	6	6	3,5
8	10	6	3
9	15	8	4
10	15	10	4
11	6	6	3
12	10	8	4
13	8	6	3
14	8	6	4
15	8	8	4
16	7	5	3,5
17	12	6	5
18	8	5	4
19	9	6	4
20	9	6	3
21	9	9	4
22	15	12	4
23	7	7	3,5
24	7	6	3,5
25	10	7	4

**Указания по выполнению:**

Собственные (резонансные) частоты прямоугольного параллелепипеда размерами  $l \times b \times h$  определяются по формуле:

$$f_{mnp} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{l}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{h}\right)^2},$$

где  $m, n, p$  – целые числа,  $c = 340$  м/с – скорость звука в воздухе при комнатной температуре.

Для построения спектра собственных частот в пределах от  $f_{\min}$  до  $f_{\max}$  сначала следует рассчитать лежащие в указанных пределах частоты **осевых мод**  $f_{m00}, f_{0n0}, f_{00p}$ .

Так, например, частоты  $x$ -осевых мод ( $n = p = 0; m = 1, 2, 3, \dots$ ) равны:

$$f_{m00} = \frac{c}{2l} m.$$

Для  $m = 1$  получаем:  $f_{100} = \frac{c}{2l}$ , для  $m = 2$ :  $f_{200} = \frac{c}{2l} \cdot 2 = 2f_{100}$ , и так далее.

Расчет ведется для всех значений  $m$ , при которых полученная частота попадает в заданный интервал (от 0 до 100 Гц).

Аналогично рассчитываются лежащие в заданном интервале частоты  $y$ -осевых и  $z$ -осевых мод:

$$f_{0n0} = \frac{c}{2b} n,$$

$$f_{00p} = \frac{c}{2h} p.$$

На следующем этапе находят попадающие в заданный интервал частоты касательных мод:

$xy$  – касательные

$$f_{mno} = \sqrt{f_{m00}^2 + f_{0n0}^2},$$

$xz$  – касательные

$$f_{mop} = \sqrt{f_{m00}^2 + f_{00p}^2},$$

$yz$  – касательные

$$f_{onp} = \sqrt{f_{0n0}^2 + f_{00p}^2}.$$

При этом нужно перебрать все возможные сочетания индексов  $m$  и  $n$ ;  $m$  и  $p$ ;  $n$  и  $p$ .



И, наконец, определяют лежащие в заданном интервале частоты косых мод:

$$f_{mnp} = \sqrt{f_{moo}^2 + f_{ono}^2 + f_{oor}^2}.$$

С учетом того, что

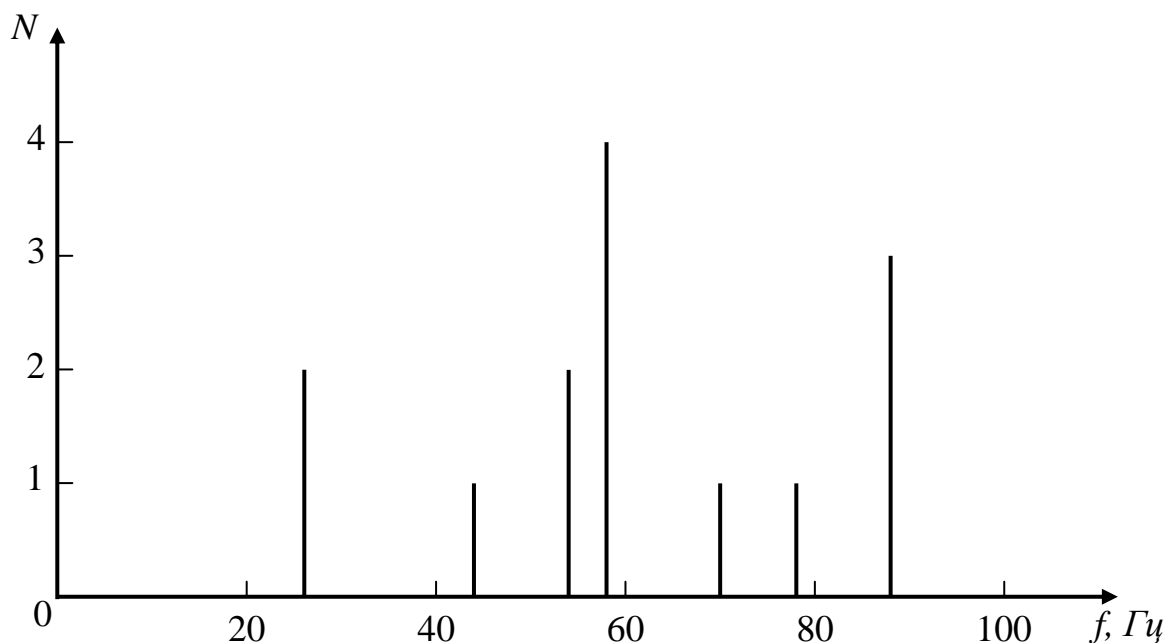
$$f_{mno} = \sqrt{f_{moo}^2 + f_{ono}^2},$$

проще использовать формулу:

$$f_{mnp} = \sqrt{f_{mno}^2 + f_{oor}^2}.$$

*Примечание: В связи с большим объемом вычислений рекомендуется использовать различные программные средства (MathCad, таблицы Excel и т.п.)*

Все рассчитанные значения следует представить в виде спектра собственных частот помещения. Примерный вид спектра представлен на рисунке 2.2. ( $N$  – число собственных колебаний с одинаковыми частотами).



**Рисунок 2.2** - Спектр собственных частот прямоугольного помещения

## 6 Оценка времени реверберации учебной аудитории

Определить время реверберации для пустой аудитории размерами  $l \times b \times h$  (см. табл. 2.8) на частотах 125, 500 и 2000 Гц.

Пол аудитории – паркет по деревянному основанию.

Потолок и верхняя часть стен (с высоты 2 м) – сухая штукатурка.

Стены (до высоты 2 м) оштукатурены и покрашены масляной краской. Количество окон в аудитории при  $l = 6$  м и 7 м – 2, при  $l = 8$  м, 9 м и 10 м – 3, при  $l = 12$  м и 15 м – 4. Ширина окна 1,5 м, высота 2 м. Высота подоконника над полом 0,5 м.

Как изменится время реверберации, если аудитория заполнена слушателями на жестких стульях? Принять удельную площадь  $1,5 \text{ м}^2/\text{чел.}$

Сравнить полученные значения времени реверберации с оптимальными и дать рекомендации по изменению эквивалентной площади звукопоглощения в данном помещении.

**Таблица 2.8** – Числовые данные к заданию 6

Вариант	$l, \text{ м}$	$b, \text{ м}$	$h, \text{ м}$
1	6	6	4
2	12	6	4
3	7	5,5	3,5
4	10	5	3,5
5	10	10	4
6	12	8	4
7	6	6	3,5
8	10	6	3
9	15	8	4
10	15	10	4
11	6	6	3
12	10	8	4
13	8	6	3
14	8	6	4
15	8	8	4
16	7	5	3,5
17	12	6	5
18	8	5	4
19	9	6	4
20	9	6	3
21	9	9	4
22	15	12	4
23	7	7	3,5
24	7	6	3,5
25	10	7	4

**Указания по выполнению:**

Время реверберации определяется соотношениями:

$$T = \frac{0,163V}{A_{общ}} = \frac{0,163V}{\alpha_{ср} S_{общ}} \quad \text{при } \alpha_{ср} \leq 0,2$$

и

$$T = -\frac{0,163V}{S_{общ} \ln(1 - \alpha_{ср})} \quad \text{при } \alpha_{ср} > 0,2.$$

Здесь  $V$  – объем помещения;  $S_{общ}$  – общая площадь поверхностей, ограничивающих помещение (стен, пола и потолка);  $\alpha_{ср}$  – средний коэффициент звукопоглощения этих поверхностей;  $A_{общ} = \alpha_{ср} S_{общ}$  – эквивалентная площадь звукопоглощения данного помещения.

Объем помещения, имеющего форму прямоугольного параллелепипеда со сторонами  $l, b, h$ , равен:

$$V = l \cdot b \cdot h$$

Общая площадь всех поверхностей:

$$S_{общ} = 2(l \cdot b + l \cdot h + b \cdot h).$$

Эквивалентную площадь звукопоглощения для пустого помещения определяют по формуле:

$$A_{общ} = \sum \alpha_i S_i + \alpha_{доб} S_{общ},$$

где  $\sum \alpha_i S_i$  – сумма произведений коэффициентов звукопоглощения  $\alpha_i$  отдельных поверхностей на их площади  $S_i$ ;  $\alpha_{доб}$  – средний коэффициент добавочного звукопоглощения, учитывающий звукопоглотители, фактически существующие в помещениях (осветительная арматура, приборы отопления, щели и трещины, вентиляционные решетки и др.). Значение  $\alpha_{доб}$  обычно принимают равным 0,08-0,09 на частоте 125 Гц и 0,04-0,05 на частотах 500-2000 Гц. Результаты промежуточных вычислений заносят в таблицу (см. табл. 2.9).

Заполнив таблицу, рассчитывают эквивалентную площадь звукопоглощения  $A_{общ}^o$  и средний коэффициент звукопоглощения  $\alpha_{ср}^o = A_{общ}^o / S_{общ}$  на частотах 125, 500 и 2000 Гц.

**Таблица 2.9** - Определение эквивалентной площади звукопоглощения поверхностей помещения

Поверхности, материалы	Площадь, $m^2$	$\alpha$ и $\alpha S, m^2$ на частотах, Гц					
		125		500		2000	
		$\alpha$	$\alpha S$	$\alpha$	$\alpha S$	$\alpha$	$\alpha S$
Потолок – сухая штукатурка		0,02		0,06		0,05	
Стены (с высоты 2 м) – сухая штукатурка		0,02		0,06		0,05	
Стены (до высоты 2 м) – оштукатуренные и покрашенные масляной краской		0,01		0,02		0,03	
Пол – паркет по деревянному основанию		0,10		0,10		0,06	
Остекление (окна)		0,35		0,18		0,07	
Добавочное звукопоглощение		0,08		0,04		0,04	

В зависимости от полученного значения  $\alpha_{cp}^o$  выбирают формулу для расчета времени реверберации и находят время реверберации пустого помещения  $T^o$  на каждой частоте. Полученные значения времени реверберации принято округлять с точностью до 0,05 с.

Для определения времени реверберации аудитории, заполненной слушателями, необходимо учесть дополнительную площадь звукопоглощения. Для этого заполняют таблицу 2.10.

**Таблица 2.10** – Дополнительная площадь звукопоглощения

Слушатели, стулья	Количество $n$	Значения $A, m^2$ и $An, m^2$					
		125		500		2000	
		$A$	$An$	$A$	$An$	$A$	$An$
Сидящие слушатели (70% заполнения)		0,20		0,30		0,35	
Свободные стулья (деревянные, жесткие)		0,02		0,03		0,04	

Для определения количества мест в аудитории нужно площадь пола разделить на удельную площадь ( $1,5 m^2/чел.$ ). Количество слушателей при расчете принимают равным 70% от числа мест. Остальные места

считаются незанятыми (свободные стулья). Значения эквивалентной площади звукопоглощения  $A$ , соответствующей одному слушателю или свободному стулу, приведены в таблице 2.10.

Рассчитав эквивалентную площадь звукопоглощения аудитории с учетом занятых и свободных мест  $A_{общ}$ , можно найти  $\alpha_{ср}$  и рассчитать время реверберации аудитории со слушателями  $T$ .

Полученные значения времени реверберации следует сравнить с оптимальными. Для речевых аудиторий оптимальные значения времени реверберации равны:

- на низких (до 200 Гц) и высоких (выше 1500 Гц) частотах:  $0,3 \div 0,5$  с;
- на средних частотах (от 200 до 1500 Гц):  $0,4 \div 0,5$  с.

Обычно получается, что  $T > T_{опт}$ , поэтому необходимо увеличить звукопоглощение в аудитории. Для этого, исходя из  $T_{опт} = 0,5$  с, вычисляют оптимальное значение эквивалентной площади звукопоглощения:

$$A_{общ}^{опт} = \frac{0,163V}{T_{опт}}.$$

Сравнивая полученное значение с найденным ранее  $A_{общ}$ , определяют, на сколько необходимо увеличить эквивалентную площадь звукопоглощения для достижения нужного времени реверберации.

## 7 Расчет кривой поглощения резонансного звукопоглотителя

Резонансный звукопоглотитель (РЗП) представляет собой жесткую, перфорированную круглыми отверстиями панель, отстоящую от жесткой стенки на расстояние  $l$ . Толщина панели  $t$ , диаметр отверстия  $d$ , шаг перфорации  $a$  (см. табл. 2.11)

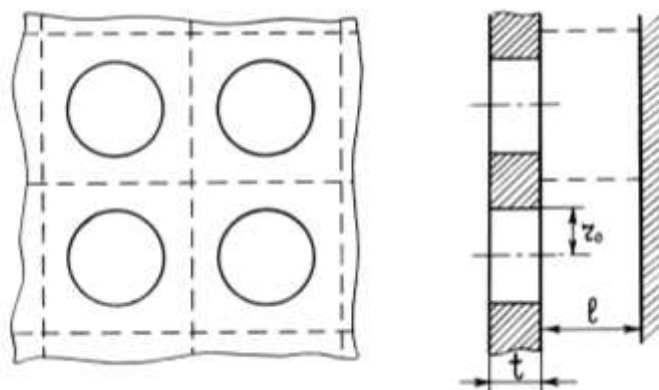
Рассчитать резонансную частоту поглотителя и построить зависимость коэффициента звукопоглощения  $\alpha$  от частоты  $f$  в пределах от  $f_{\text{рез}}/2$  до  $3f_{\text{рез}}/2$ .

**Таблица 2.11** – Числовые данные к заданию 7

Вариант	$l, \text{ см}$	$t, \text{ см}$	$d, \text{ см}$	$a, \text{ см}$
1	1,1	0,18	0,8	8
2	2,0	0,2	0,25	2
3	1,0	0,2	0,2	2
4	2,5	0,14	0,35	1,8
5	1,5	0,15	0,8	6
6	0,8	0,15	0,2	1
7	1,0	0,25	0,3	2
8	3,0	0,18	0,8	6
9	4,0	0,5	0,35	1,8
10	1,0	0,3	0,5	2
11	1,3	0,18	0,8	4
12	2,2	0,2	0,25	2
13	1,2	0,2	0,2	2
14	2,7	0,14	0,35	1,8
15	1,7	0,15	0,8	6
16	1,0	0,15	0,2	1
17	1,2	0,25	0,3	2
18	3,2	0,18	0,8	6
19	3,5	0,5	0,35	1,8
20	1,3	0,3	0,5	2
21	1,8	0,25	0,25	2,5
22	2,4	0,15	0,35	2
23	3,5	0,35	0,25	1,5
24	0,9	0,12	0,2	1
25	0,9	0,15	0,15	1

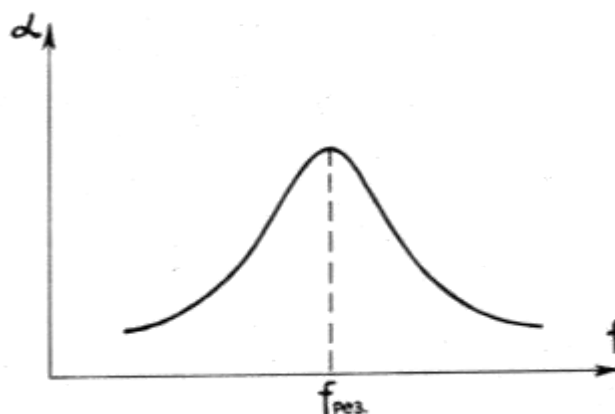
**Указания по выполнению:**

Простейший резонансный звукопоглотитель (РЗП) представляет собой панель, перфорированную отверстиями, расположенную на некотором расстоянии от жесткой стенки (см. рисунок 2.3).



**Рисунок 2.3** – Схема РЗП

Коэффициент звукопоглощения резонансного поглотителя имеет максимум на частоте, соответствующей резонансной частоте резонаторов, составляющих систему, а максимальное значение коэффициента поглощения и ширина кривой поглощения  $\alpha(f)$  определяется вязкостью воздуха, колеблющегося в отверстиях панели (см. рис. 2.4).



**Рисунок 2.4** – Кривая звукопоглощения РЗП

Коэффициент звукопоглощения РЗП равен:

$$\alpha = \frac{4R_1}{(R_1 + 1)^2 + Y_1^2},$$

где  $R_1$  и  $Y_1$  – соответственно активная и реактивная составляющие безразмерного удельного импеданса РЗП.

Реактивная составляющая импеданса РЗП определяется инерционностью воздуха, колеблющегося в отверстиях панели, и упругостью, сосредоточенной в объеме поглотителя:

$$Y_1 = \frac{\omega(t + 2\delta)}{\eta c} - ctg \frac{\omega l}{c}.$$

Здесь:

- $\omega = 2\pi f$  – циклическая частота звуковой волны,
- $c$  – скорость звука в воздухе,
- $l$  – глубина полости РЗП (расстояние от панели до жесткой стенки),
- $\eta$  – коэффициент перфорации лицевой панели, равный отношению площади отверстия  $S_o = \pi d^2/4$  к площади квадратной ячейки, приходящейся на одно отверстие,  $S = a^2$ ,
- $t$  – толщина лицевой панели РЗП,
- $2\delta$  – концевая поправка, позволяющая учесть дифракционные эффекты при прохождении звуковой волны через отверстия панели.

При  $d/a \leq 0,4$

$$2\delta = 0,96\sqrt{S_o} (1 - 1,25d/a).$$

При резонансе  $Y_1 = 0$ . Таким образом, для определения резонансной частоты  $f_{рез}$  следует решить уравнение:

$$\frac{2\pi f_{рез}(t + 2\delta)}{\eta c} = ctg \frac{2\pi f_{рез}l}{c}.$$

Если длина звуковой волны  $\lambda \gg l$  (или  $2\pi \cdot f \cdot l/c \ll 1$ ), то

$$ctg \frac{2\pi fl}{c} \approx \frac{c}{2\pi fl}.$$

Таким образом:

$$\frac{2\pi f_{рез}(t + 2\delta)}{\eta c} \approx \frac{c}{2\pi f_{рез}l} \quad \text{и}$$

$$f_{рез} \approx \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\eta}{(t + 2\delta)l}}.$$



[illegible]

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Архитектурная физика: Учеб. для вузов: Спец. «Архитектура» / В. К. Лицкевич, Л. И. Макриненко, И. В. Мигалина и др.; Под ред. Н. В. Оболенского. – М. : «Архитектура», 2007. – 448 с.
- 2 Вощукова, Е.А. Физические основы строительной акустики: учебное пособие для студентов очного и заочного обучения (направление подготовки бакалавров «Строительство») / Е. А. Вощукова. – Брянск: БГИТА, 2011. – 96 с.
- 3 Заборщикова, Н. П. Шум города. Оценка и регулирование шумового режима селитебных территорий: учеб. пособие для вузов по специальности «Гор. стр-во и хоз-во/ Н. П. Заборщикова, С. В. Пестрякова; С.-Петерб. гос. архитектур.-строит. ун-т. – М. : Изд-во АСВ, 2004. – 112 с.
- 4 Иванов, Н. И. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом : учебник / Н. И. Иванов . – М. : Логос, 2008 . – 423 с.
- 5 Кнудсен, В. О. Архитектурная акустика: пер. с англ. / В. О. Кнудсен ; под ред. Е. А. Копиловича, Л. Д. Брызжева. – 3-е изд., стер. – М. : КомКнига, 2007. – 525 с.
- 6 Соловьев, А. К. Физика среды: учеб. [для вузов] по специальности 270114 «Проектирование зданий» / А. К. Соловьев. – М. : Изд-во АСВ, 2011. – 341 с.
- 7 Щевьев, Ю. П. Основы физической акустики : учеб. пособие/ Ю. П. Щевьев. – СПб. : Изд-во Лань, 2017. – 367 с.
- 8 Яковлев, Р. В. Тихий дом: шумо- и звукоизоляция жилища /Р.В.Яковлев. – Ростов н/Д. : Феникс, 2005. – 219 с.

Вощукова Елена Анатольевна

ПРАКТИКУМ  
ПО ФИЗИЧЕСКИМ ОСНОВАМ  
СТРОИТЕЛЬНОЙ АКУСТИКИ

Учебное пособие для студентов направления подготовки бакалавров  
08.03.01 Строительство  
очной и заочной форм обучения

Формат 60×94 1/16. Тираж 50 экз. Печ. л. – 5,5  
Брянский государственный инженерно-технологический университет  
241037. г. Брянск, проспект Станке Димитрова, 3