

534.2(07)
M - 545

№3869

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ



ТАГАНРОГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
И МЕДИЦИНСКОЙ ТЕХНИКИ

Методические указания
к практическим занятиям
по курсу
АКУСТИЧЕСКИЕ ПОЛЯ

для специальностей

- 200102 - Приборы и методы контроля качества и диагностики
- 200105 - Акустические приборы и системы
- 200401 - Биотехнические и медицинские аппараты и системы
- 180301 - Морская акустика и гидрофизика

УДК 534.2 (07.07)

Составители: Тимошенко В.И., Куценко А.Н.

Методические указания к практическим занятиям по курсу
«Акустические поля». – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2006. – 39 с.

В настоящих методических указаниях представлены материалы для проведения практических занятий по курсу «Акустические поля» по темам: «Распространение акустических волн», «Затухание акустических волн в вязких, теплопроводящих средах», «Электромеханические аналогии», «Электроакустические аналогии», «Отражение и преломление акустических волн», «Распространение акустических волн в слоисто-неоднородной среде». В каждой теме представлены краткие теоретические сведения в виде базовых задач и задачи, рекомендуемые для самостоятельного решения. Данные методические указания будут полезны при изучении курса «Акустические поля» студентам дневного и вечернего факультетов.

Табл. 2. Ил. 19. Библиогр.: 8 назв.

Рецензент

канд. техн. наук, старший научный сотрудник ФГУП НИИ
«Бриз» В.Ю. Дорошенко.

ПРЕДИСЛОВИЕ

При движении (периодическом или разовом) любой материальной субстанции в среде возникают акустические колебания или волны. В задачи курса «Акустические поля» входит рассмотрение теоретических вопросов распространения акустических волн в различных средах при разнообразных начальных и граничных условиях. Для закрепления навыков использования теоретического материала в учебном плане имеются лабораторные работы и расчетный практикум.

Данное учебное пособие содержит набор задач и заданий практически по всем разделам названного учебного курса. Задачи и задания апробированы авторами в течении ряда лет. При решении задач студентам рекомендуется использовать учебный материал из учебников, конспектов, книг и пособий, список которых приводится. Задачи в пособии относятся к разделам типовой учебной программы курса. Пособие содержит несколько типов задач. Предлагаемые задачи решаются в аудитории. Для самостоятельного тренинга студент выбирает себе (или ему выдаются в виде заданий) задачи из этого пособия.

Авторы с благодарностью примут отзывы и замечания.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН

1. Вывести формулу для скорости звука в идеальном газе.

$$\text{Ответ: } c = \left(\gamma \frac{p_0}{\rho_0} \right)^{\frac{1}{2}} = \left(\gamma \frac{R \cdot T_0}{\mu} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

2. Получить приближенную формулу для скорости звука в воздухе, учитывая, что для воздуха показатель адиабаты равен $\gamma=1,4$, молекулярная масса – $\mu = 28,8 \text{ г/моль}$ и универсальная газовая постоянная $R=8,314 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$.

3. При какой температуре $t = {}^{\circ}\text{C}$ скорость звука в воздухе удвоится по сравнению со скоростью звука при $t=0 {}^{\circ}\text{C}$ и в два раза уменьшится, если бы воздух оставался идеальным газом (*справочные данные*: для воздуха при $t=0 {}^{\circ}\text{C}$ $c_0=331,45 \text{ м/с}$).

4. Рассчитать «звуковой барьер» самолета (когда скорость его равна скорости звука) на высоте 9 км, где температура равна $-70 {}^{\circ}\text{C}$, и сравнить его со звуковым барьером при $0 {}^{\circ}\text{C}$ на уровне моря. Зависит ли барьер от атмосферного давления? Ответ дать в км/ч.

5. Какова скорость звука внутри цилиндра двигателя внутреннего сгорания сразу же после вспышки, когда давление p равно 200 атм и температура $1000 {}^{\circ}\text{C}$, если для газовой смеси $\gamma=1,35$, а плотность смеси при $0 {}^{\circ}\text{C}$ и атмосферном давлении $p_0=10^5 \text{ Па}$ равна $\rho_0=0,0014 \text{ г/см}^3$? Процесс считать адиабатическим.

6. Определить изменение температуры в звуковой волне, распространяющейся в воздухе при нормальных условиях, если давление в волне равно $p=10^3 \text{ Па}$ (*нормальные условия*: $P_0=10^5 \text{ Па}$; $\rho_0=1,3 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$; $\gamma=1,4$; $T_0 \approx 270 {}^{\circ}\text{K}$).

7. Определить длину продольной волны в стали, зная, что продольная волна распространяется в стали со скоростью 6100 м/с, а частота колебаний $f=20 \text{ кГц}$.

8. Найти длину звуковой волны в воздухе на частоте $f=500 \text{ Гц}$ при температуре $t=15 {}^{\circ}\text{C}$ (*справочные данные*: для воздуха $\rho_0=1,26 \text{ кг/м}^3$; $\gamma=1,4$; $\mu=2,9 \cdot 10^{-2} \text{ г/моль}$).

9. Определить длины продольной и поперечной волн при распространении их в чугуне. Частота колебаний равна $f=1 \text{ МГц}$ (*справочные данные*: $c_{\text{прод}}=4500 \text{ м/с}$, $c_{\text{попер}}=2400 \text{ м/с}$).

10. Смещение частиц в плоской бегущей волне задано выражением $\xi=5 \cdot 10^{-8} \sin(1980t - 6x)$.

Найти:

- 1) частоту колебаний f ;
- 2) скорость распространения волны c ;
- 3) длину волны λ ;
- 4) амплитуду скорости колебаний частиц среды в волне v ;
- 5) амплитуду ускорения частиц среды в волне;
- 6) амплитуду звукового давления P_0' .

11. Волна распространяется вдоль резинового шнура со скоростью 3 м/с. В каких фазах находятся точки, удаленные друг от друга на расстоянии 1,5 м, если частота колебаний 4 Гц?

12. Решить задачу №11 при распространении колебаний с частотой $f=100$ кГц в стальном стержне (справочные данные: скорость звука в стальном стержне 5050 м/с).

13. Амплитуда колебательной скорости плоской гармонической звуковой волны в воде $v_0 = \dot{\xi} = 5 \cdot 10^5$ см/с. Вычислить амплитуду смещения и звукового давления на частоте $f=1$ кГц. Температура воды $t=25$ °C (справочные данные: при 25 °C для обычной воды $c=1497$ м/с; $\rho_0=10^3$ кг/м³).

14. Человек с хорошим слухом воспринимает звуковое давление амплитудой $P_0=10^3$ дин/см² на частоте $f=2$ кГц.

Определить:

- 1) ξ_0 – амплитуду смещения частиц в такой волне;
- 2) v_0 – колебательную скорость в распространяющейся волне;
- 3) $\ddot{\xi}$ – амплитуду ускорения частиц в такой волне;
- 4) I – интенсивность волны (в предположении, что волна плоская).

Волна распространяется в воздухе (перевод Па в $\frac{\text{дин}}{\text{см}^2}$:

$$1 \frac{\text{дин}}{\text{см}^2} = 0,1 \text{ Па}.$$

15. Решить задачу 14 для случая, если волна распространяется в воде при $t=25$ °C.

16. Плоская звуковая волна частотой $f=400$ Гц распространяется в воздухе. Интенсивность волны равна $I=1,2 \cdot 10^{-2}$ Вт/м². Определить плотность энергии и амплитуду колебаний. Температура воздуха $t=0$ °C (справочные данные: $\rho_0=1,2928$ кг/м³).

17. В плоской звуковой волне с частотой 1 кГц в воздухе экстремумы давления отличаются на 1 дин/см² от среднего атмосферного давления,

равного 10^6 дин/см². Вычислить, чему равны:

- изменение плотности, сопровождающее распространение такой волны;
- интенсивность волны;
- максимальное смещение частиц.

Скорость звука равна 340 м/с, $\rho_0 \cdot c = 420$ кг/(м²·с).

18. В атмосферной акустике принято характеризовать уровень интенсивности $B = 10 \cdot \lg \left(\frac{I}{I_{ct}} \right)$ относительно стандартного нулевого уровня с интенсивностью $I_{ct} = 10^{-12}$ Вт/м². Чему равняется среднее звуковое давление \bar{p}_{ct} в воздухе при нормальных условиях (атмосферное давление 1 атм, $t = 0^\circ\text{C}$) волны нулевой интенсивности ($c = 332$ м/с, $\rho_0 = 1,26$ кг/м³)? Записать выражение для уровня звукового давления относительно стандартного давления \bar{p}_{ct} .

19. Интенсивность звука равна $2 \cdot 10^{-4}$ Вт/м². Найти уровень интенсивности относительно стандартного нулевого уровня $I_{ct} = 10^{-12}$ Вт/м².

20. Амплитуда звукового давления в плоской звуковой волне $p'_0 = 0,1$ Па. Найти уровень интенсивности в воздухе при температуре 20°C и давлении 1 атм.

21. Уровень интенсивности плоской звуковой волны в воздухе равен 100 дБ по отношению к стандартному нулевому уровню интенсивности. Вычислить амплитуды колебательной скорости v_0 и ускорения $\ddot{\xi}$ частиц на частотах 500 Гц и 5 кГц.

22. Плоская волна, распространяющаяся в воздухе с частотой 1 кГц, имеет амплитуду звукового давления $p'_0 = 2 \cdot 10^{-4}$ дин/см² (порог слышимости). Определить амплитуду смещения ξ_0 и амплитуду скорости v_0 частиц среды (в единицах СГС). Тот же расчет сделать для уровня интенсивности в 160 дБ над порогом слышимости.

23. В воздухе при температуре 27°C и нормальном атмосферном давлении распространяется звуковая волна, уровень интенсивности которой равен 150 дБ (сильный звук, вызывающий боль в ушах). Определить температуру в месте максимального давления и амплитуду ее колебаний. Как

изменится эта величина, если мощность волны уменьшается в 10 раз?

24. Вычислить изменение температуры в звуковой волне, имеющей интенсивность $I = 0,01 \frac{Bm}{M^2}$, при температуре воздуха $20^\circ C$ и нормальном атмосферном давлении.

25. В гидроакустике уровень звукового давления принято отсчитывать относительно давления $\bar{p}_H = 1 \text{ мкПа} = 10^{-6} \text{ Па}$, $B_H = 20 \cdot \lg\left(\frac{p}{\bar{p}_H}\right)$. Найти формулу пересчета от B_H к стандартному уровню интенсивности $I_{ct} = 10^{-12} \frac{Bm}{M^2}$, соответствующему в воде ($\rho_0 = 10^3 \frac{\text{кг}}{M^3}$, $c = 1500 \frac{M}{s}$) эффективному давлению \bar{p}_{ω} .

26. Уровень интенсивности звука составляет 120 дБ (громкий звук). Найти звуковое давление и мощность-поток энергии, попадающий за 1 с в ухо человека. Считать площадь уха равной 4 см^2 и ухо перпендикулярным направлению распространения волны.

27. Какова полная мощность ненаправленного источника звука небольших размеров, если на расстоянии $r=100 \text{ м}$ амплитуда давления в воздухе равняется $0,1 \text{ Па}$? Поглощением звука пренебречь.

28. Малый по размерам источник звука излучает в воздухе при нормальном атмосферном давлении и температуре $0^\circ C$ волну частотой $f=500 \text{ Гц}$. Мощность источника $N=5 \text{ Вт}$. Какова амплитуда смещения, колебательной скорости и ускорения частиц в звуковой волне на расстоянии 100 м от источника? Поглощением звука пренебречь. Вычислить эти величины также в воде.

ЗАТУХАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН

29. Получить волновое уравнение для акустической волны в вязкой теплопроводящей среде.

Решение:

Исходными для решения поставленной задачи (вязкой среды) являются линеаризованные уравнения гидродинамики для возмущений плотности ρ' и колебательной скорости v :

уравнение непрерывности:

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} + p_0 \cdot \operatorname{div}(v) = 0 \quad (29.1)$$

и уравнение Навье-Стокса:

$$\rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} + c_0^2 \nabla p' - \left(\xi + \frac{4}{3} \eta \right) \Delta v = 0 ; \quad (\nabla p = c_0^2 \cdot \nabla \rho) \quad (29.2)$$

где η и ξ - коэффициенты сдвиговой и объемной вязкости. Взяв производную по времени от выражения (29.2) и подставив в получившееся уравнение выражение (29.1), получим волновое уравнение для колебательной скорости

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} - c_0^2 \Delta v - \frac{b}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial t} (\Delta v) = 0 . \quad (29.3)$$

И если волна плоская и распространяется в направлении x , то уравнение (29.3) принимает вид

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} - c_0^2 \frac{d^2 v}{dx^2} - \frac{b}{\rho_0} \frac{d^3 v}{dx^2 dt} = 0 . \quad (29.4)$$

Здесь введено обозначение $b = \xi + \frac{4}{3} \eta$. Следует отметить, что в вязкой теплопроводящей среде уравнение для колебательной скорости имеет такой же вид, но $b = \xi + \frac{4}{3} \eta + k \left[\frac{1}{c_v} - \frac{1}{c_p} \right]$, где k -коэффициент теплопроводности, а c_v и c_p - удельные теплопроводности при постоянном объеме и давлении.

30. Вывести формулу для коэффициента затухания звука, обусловленного вязкостью и теплопроводностью среды.

Решение:

Решение волнового уравнения (29.4) будем искать в виде

$$v = v_0 \cdot \exp[i \cdot k \cdot x - i \cdot \omega \cdot t] . \quad (30.1)$$

Подставляя это решение в (29.4), получим закон дисперсии:

$$-\omega^2 + c_0^2 \cdot k^2 - \frac{b}{\rho_0} i \cdot \omega \cdot k^2 = 0 , \quad (30.2)$$

откуда получаем, что

$$k^2 = \frac{\omega^2}{c_0^2 - i \frac{b}{\rho_0} \omega} .$$

И при $\frac{b\omega}{c_0^2 \rho_0} \ll 1$, что соответствует малым затуханием по длине волны, имеем

$$k^2 = \frac{\omega^2}{c_0^2} \left[1 + i \frac{b \cdot \omega}{\rho_0 \cdot c_0^2} \right] \equiv (k_0 + i \cdot \beta)^2 . \quad (30.3)$$

Таким образом, в решение добавляется член, отвечающий за затухание
 $v = v_0 \exp(-\beta \cdot x) \exp[i(k_0 - \omega \cdot t)],$ (30.4)

a

$$\beta = \frac{b \cdot \omega^2}{2 \cdot \rho_0 \cdot c_0^3} = \frac{\omega^2}{2 \rho_0 c_0^3} \left[\left(\frac{4}{3} \eta + \xi \right) + k \left(\frac{1}{c_v} - \frac{1}{c_p} \right) \right]. \quad (30.5)$$

Величина β имеет размерность обратной длины и называется коэффициентом затухания звука. При оценке β по формуле (30.5) следует учесть, что часто можно пренебречь вторым членом ввиду малости коэффициента теплопроводности k в жидкостях и газах.

Коэффициент сдвиговой вязкости η характеризует касательно - диссипативное напряжение, возникающее при скольжении слоев жидкости относительно друг друга (имеет размерность в системе СГС пуз 1Пз=0,1Па). Коэффициент объемной вязкости ξ характеризует диссипацию, возникающую при всестороннем сжатии среды. В основе объемной вязкости обычно лежит один какой-то релаксационный процесс, влияющий на поглощение звука в ограниченной полосе частот в зависимости от характерных времен релаксации. Поэтому при вычислении коэффициента затухания вне области релаксационного поглощения достаточно учитывать только сдвиговую вязкость η .

31. В гидроакустике принято характеризовать поглощение коэффициентом α , имеющим размерность $\text{дБ}/\text{м}$. Определить его связь с коэффициентом β , имеющим размерность $\text{Непер}/\text{м}$.

Решение:

Интенсивность волны уменьшается в зависимости от пройденного расстояния r :

$$I = I_0 \cdot 10^{-0.1\alpha r}, \quad (31.1)$$

откуда соответственно

$$\alpha = -\frac{1}{r} \cdot 10 \cdot \lg \frac{I}{I_0}. \quad (31.2)$$

Так как $p = p_0 \cdot e^{-\beta r}$ и учитывая то, что $I \sim p^2$, получим

$$I = I_0 \cdot \exp[-2 \cdot \beta \cdot r] \text{ или } \beta = -\frac{1}{2 \cdot r} \ln \frac{I}{I_0}. \quad (31.3)$$

Поделим (31.3) на (31.2):

$$\frac{\beta}{\alpha} = \frac{1}{20} \frac{\ln \frac{I}{I_0}}{\lg \frac{I}{I_0}} = \frac{1}{20 \cdot \lg(e)}.$$

Таким образом,

$$\alpha = (20 \lg e) \beta \approx 8,7 \beta . \quad (31.4)$$

Ответ: $\alpha = (20 \lg e) \beta \approx 8,7 \beta .$

32. Найти связь между коэффициентом поглощения плоской волны β и толщиной половинного поглощения $l_{1/2}$ (по интенсивности).

33. Интенсивность звука в плоской волне вследствие поглощения уменьшается в воздухе в несколько раз на расстоянии $l_1=1 \text{ м}$. Определить расстояние l_2 , на котором во столько же раз уменьшится интенсивность звука данной частоты в воде. Вязкость в воздухе $\eta=0,19 \cdot 10^{-4} \text{ Па}\cdot\text{с}$, в воде $\eta=10^3 \text{ Па}\cdot\text{с}$. Скорость звука и плотность равны $330 \text{ м}/\text{с}$ и $1,3 \text{ кг}/\text{м}^3$ (для воздуха) и $1500 \text{ м}/\text{с}$ и $1000 \text{ кг}/\text{м}^3$ (для воды).

34. Найти в децибелах ослабление $G=10 \lg(I_0/I)$ в воздухе плоской звуковой волны на участке пути длиной 100 м , если вязкость равна $\eta=0,19 \text{ мПз}$. Частота звука 20 кГц .

35. Найти ослабление звука в децибелах на расстоянии 100 м , если вязкость воды $\eta=0,19 \cdot 10^{-2} \text{ Пз}$. Частота 20 кГц .

36. Записать выражение для уровня акустической сферической и цилиндрической волн в слабо поглощающей среде.

37. Вычислить в децибелах ослабление G в воде звуковой сферической волны при ее распространении на расстоянии от 2 до 10 км от источника звука. Коэффициент поглощения звука по давлению равен $8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$.

38. Интенсивность звука в морской воде согласно эмперической формуле убывает вследствие поглощения на величину $\alpha=0,036 f^{3/2} [\text{дБ}/\text{км}]$, где f – в кГц. Определить, на каком расстоянии r от источника затухание уменьшит амплитуду волны по давлению в 100 раз при частотах 10 и 100 кГц .

39. Интенсивность звука на расстоянии 20 м от сферического источника звука равна $I_1=0,03 \text{ эрг}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$. Какова интенсивность звука I_2 на расстоянии 100 м от источника, если коэффициент поглощения звука β равен $5 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1}$?

40. Найти переходное расстояние, на котором в сферической волне потери энергии на расходжение равны потерям на поглощение. Вычислить это расстояние в пресной воде при температуре 14°C на уровне моря, когда коэффициент вязкости равен $1,14 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$. Частота звука 10 кГц .

41. Цилиндрическая волна распространяется в воздухе. Вычислить коэффициент поглощения звука по давлению, если на дистанции от 1 км до 1,5 км от источника звука интенсивность звука уменьшится на 5 дБ.

42. В средах с поглощением скорость звука иногда удобно считать комплексной величиной $c = c_0 \cdot \exp[-i \cdot \delta] = c_0 \cdot [\cos(\delta) - i \cdot \sin(\delta)]$, где δ - угол потерь. Выразить коэффициент поглощения β через δ .

43. Найти связь между углом потерь и текущим импедансом среды.

44. Скорость звука в газе равна 351 м/с, угол потерь $\delta=0,004^\circ$. Найти коэффициент поглощения звука по энергии на частоте 100 кГц.

45. Кислород при $20^\circ C$ имеет следующие акустические характеристики. $\rho_0=1,33 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$, $c_0=1328 \text{ м/с}$, коэффициент поглощения $\beta=1,49 \cdot 10^{-13} \times f^2$. Найти угол потерь и удельный комплексный импеданс среды при частоте 1 МГц.

46. Вывести формулу для коэффициента поглощения, связанного наличием в среде релаксационного процесса.

Решение:

Примером релаксационного процесса может служить молекулярная диссипация, обмен энергией между внутренними и поступательными движениями многоатомных молекул, фазовые переходы в среде. Распространение звука влияет на внутренние процессы, которые в свою очередь влияют на поглощение и скорость волны.

При наличии в среде релаксационных процессов связь между прращениями давления и плотности перестает быть алгебраической $p' = c_0^2 \rho'$; давление в момент времени t зависит от значений плотности в предшествующие моменты времени:

$$p' = c_0^2 \rho' + m \cdot c_0^2 \int_{-\infty}^t \exp\left[-\frac{t-t'}{\tau}\right] \frac{\partial \rho'}{\partial t'} dt', \quad (46.1)$$

здесь τ - время релаксации.

Это уравнение (46.1) рассмотрим совместно с уравнением гидродинамики идеальной среды:

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} + \rho_0 \cdot \operatorname{div}(v) = 0 \quad \text{и} \quad \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\nabla p'}{\rho_0} = 0, \quad (46.1')$$

Исключая из (46.1) и (46.1') p' , получаем

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} + \rho_0 \cdot \operatorname{div}(v) = 0; \quad (46.2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{c_0^2}{\rho_0} \nabla(\rho' + m \int_{-\infty}^{t'} e^{\frac{t-t'}{\tau}} \frac{\partial \rho'}{\partial t'} dt') = 0. \quad (46.3)$$

Для приращения плотности ρ' уравнения (46.2), (46.3) сводятся к одному уравнению

$$(\rho' + m \int_{-\infty}^0 \exp(-\frac{t-t'}{\tau}) \frac{\partial \rho'}{\partial t'} dt - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 \rho'}{\partial t^2}) = 0. \quad (46.4)$$

Решение уравнения (46.4) ищем в виде плоской гармонической волны, бегущей вдоль оси x : $\rho' = \rho_0' \exp(-i\omega t + ikx)$. Получаем дисперсионное уравнение

$$k^2 = \frac{\omega^2}{c_0^2} \left[1 - m \frac{i \cdot \omega \cdot \tau}{1 - i \cdot \omega \cdot \tau} \right]^{-1}. \quad (46.5)$$

m обычно мало, поэтому из (46.5) следует, что

$$k = \pm \frac{\omega}{c_0} \left[1 - \frac{m}{2} \frac{\omega^2 \tau^2}{1 + \omega^2 \tau^2} + i \frac{m}{2} \frac{\omega \cdot \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \right]. \quad (46.6)$$

В этом выражении мнимая часть определяет коэффициент поглощения

$$\beta = \frac{m}{\tau 2 \epsilon_0} \frac{\omega^2 \tau^2}{1 + \omega^2 \tau^2} = \frac{m}{2 c_0 \tau} \frac{\omega^2 \tau^2}{1 + \omega^2 \tau^2}. \quad (46.7)$$

$$\text{Ответ: } \beta = \frac{m}{\tau 2 \epsilon_0} \frac{\omega^2 \tau^2}{1 + \omega^2 \tau^2} = \frac{m}{2 c_0 \tau} \frac{\omega^2 \tau^2}{1 + \omega^2 \tau^2}.$$

47. Показать, что в области релаксационной дисперсии квадрат скорости звука выражается формулой $c^2 = c_0^2 \left[1 + \frac{c_\infty^2 - c_0^2}{c_0^2} \frac{\omega^2 \tau^2}{1 + \omega^2 \tau^2} \right]$, где c_0 – скорость звука при $\omega \tau \ll 1$, а c_∞ – скорость звука на высоких частотах ($\omega \tau \gg 1$).

48. Найти максимальное значение коэффициента релаксационного поглощения, происходящего на длине волны.

49. Используя формулу для дисперсии скорости звука, обусловленной релаксационным процессом, найти область наиболее быстрого изменения скорости в зависимости от частоты.

50. Скорость звука в уксусной кислоте на частоте 250 кГц при температуре 20°C и атмосферном давлении равна 1194 м/с . При увеличении частоты до 3 МГц относительная дисперсия скорости звука составляет около 1% . Найти максимальный безразмерный коэффициент релаксационного поглощения, отнесенный к длине волны.

55. Вычислить коэффициент поглощения, обусловленный вязкостью и

теплопроводностью на частоте 500 кГц , а также максимальный релаксационный коэффициент поглощения, отнесенный к длине волны, в углекислом газе, если его плотность $\rho_0 = 1,85 \text{ кг/м}^3$, коэффициент сдвиговой вязкости $\eta = 1,4 \cdot 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$, $\frac{c_p}{c_v} = 1,3$, $c_p = 8,5 \cdot 10^2 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$, $k = 1,63 \cdot \eta \cdot c_v$. Скорость звука в углекислом газе при 20°C и при атмосферном давлении на частоте около 100 кГц равна $c_0 = 268 \text{ м/с}$, при увеличении до 1000 кГц она возрастает на 4%.

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ АНАЛОГИИ

56. Установить аналогию, существующую между уравнениями, описывающими колебания в электрических цепях и механических системах. Рассмотрения провести на примере линейных колебательных систем: механической с одной степенью свободы (рис. 1, а) и одиночной электрического контура (рис. 1, б).

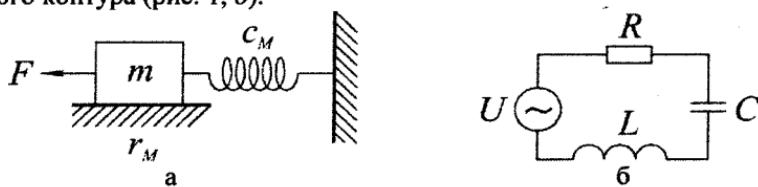


Рис. 1

Решение:

Рассмотрим механическую колебательную систему, состоящую из груза массой m на пружине, упругость которой S (рис. 1, а). К грузу приложим силу F . Смещение груза из положения равновесия обозначим через x . Воспользовавшись вторым уравнением Ньютона, запишем уравнение движения:

$$m \cdot \ddot{x} + r_M \cdot \dot{x} + S \cdot x = F, \quad (56.1)$$

где $r_M \cdot \dot{x}$ - сила трения, r_M - механическое сопротивление системы, Sx - сила упругого противодействия пружины. Линейность уравнения (56.1) является следствием двух предположений:

- 1) деформации невелики и упругая сила следует линейному закону, т.е. система подчиняется закону Гука;
- 2) сила трения есть линейная функция скорости $v = \dot{x}$.

Заменив упругость пружины ее гибкостью $c_M = \frac{1}{S}$, можно записать уравнение (56.1) в виде

$$m \frac{d^2v}{dt^2} + r_M \cdot v + \frac{1}{c_M} \int v \cdot dt = F. \quad (56.2)$$

Запишем теперь уравнение, описывающее колебательный процесс в электрическом контуре, к которому приложено внешнее ЭДС (см. рис. 1, б). Согласно второму закону Кирхгофа, сумма падений напряжений на всех элементах должна равняться:

$$L \frac{di}{dt} + R \cdot i + \frac{1}{C} \int i \cdot dt = U. \quad (56.3)$$

Если вместо тока i вести заряд, то (3) перепишется в виде:

$$L \cdot \dot{q} + R \cdot \dot{q} + \frac{q}{C} = U. \quad (56.4)$$

Сравнивая уравнения, которыми описываются колебания в механической системе и электрической цепи, видим их полную аналогию. Эта аналогия имеет практическое значение, так как она позволяет сопоставить сложным механическим системам их электрические аналоги и использовать эффективные методы расчета электрических цепей.

Аналогия выражений (56.1), (56.2) и (56.3), (56.4) позволяет составить таблицу аналогов механических величин электрическим (см. табл. 1).

Для изображения механических систем вводят идеализированные элементы: массу, гибкость (пружина нулевой массы), активное сопротивление (пропорциональное скорости) и по аналогии с индуктивностью, емкостью и сопротивлением в электрических цепях представляют в виде двухполюсников (рис. 2). Тогда под переменными x, v в табл. 1 понимают относительное смещение $x=x_1-x_2$ и скорости $V=V_1-V_2$ концов элемента упругости или элемента трения. Аналогом напряжения при этом является сила, приложенная к одному из полюсов механического элемента, причем предполагается, что к другому полюсу (концу) приложена такая же по модулю и противоположная по направлению сила (так как эти идеальные элементы имеют нулевую массу).

Для элемента массы естественной точкой отсчета является неподвижная (инерциальная) система координат, и поэтому ее можно считать вторым «полюсом» и изображать штриховой линией (рис. 2), а первый полюс есть сама масса. Формальное закрепление второго полюса элемента массы отражает тот факт, что законы движения записаны в инерциальной системе координат.

57. Показать, что аналогии между электрическими и механическими величинами сохраняются и в энергетических соотношениях.

Таблица 1

Механическая величина	Электрическая величина
x - смещение	q - заряд
$v = \dot{x}$ - колебательная скорость	$i = \dot{q}$ - ток
F - сила	U - ЭДС
c_M - гибкость	C - емкость
m - масса	L - индуктивность
r_M - эквивалентное механическое сопротивление	R - активное сопротивление
\ddot{x} - ускорение	$\frac{\partial i}{\partial t}$ - скорость изменения тока
$Z_M = \frac{F}{v}$ - полное механическое сопротивление	$Z = \frac{U}{i}$ - полное электрическое сопротивление
Для рассмотренных систем	
$Z_M = r_M + i \cdot \omega \cdot m + \frac{1}{i \cdot \omega \cdot c_M}$	$Z = R + i \cdot \omega \cdot L + \frac{1}{i \cdot \omega \cdot C}$
$i \cdot \omega \cdot m$ - инерциальное сопротивление	$i \cdot \omega \cdot L$ - индуктивное сопротивление
$\frac{1}{i \cdot \omega \cdot c_M}$ - упругое сопротивление	$\frac{1}{i \cdot \omega \cdot C}$ - емкостное сопротивление
$\omega_0 = (m \cdot c_M)^{1/2}$ - собственная частота механической системы	$\omega_0 = (L \cdot C)^{1/2}$ - собственная частота электрической системы

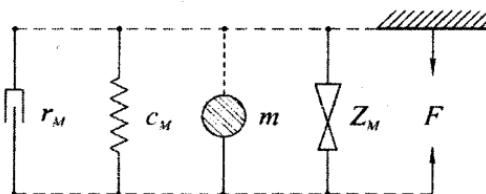


Рис. 2

58. Установить аналоги в способах соединения механических и электрических элементов.

Решение:

Способы соединения механических элементов определяются характером распределения сил и перемещений. Основными являются два способа:

- 1) соединение в цепочку (рис. 3, а);

2) соединение в узел (рис. 3, б).

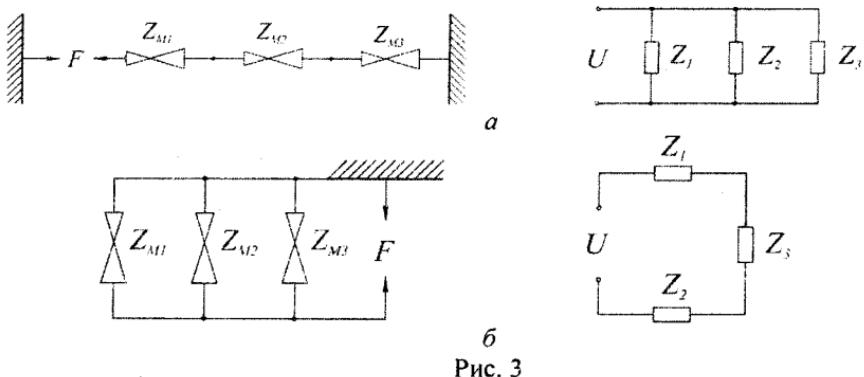


Рис. 3

При соединении цепочкой относительная скорость концов всей системы равна сумме относительных скоростей концов отдельных двухполюсников

$$(\dot{x}_0 - \dot{x}_1) + (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + \dots + (\dot{x}_{n-1} - \dot{x}_n) = \dot{x}_0 - \dot{x}_n \text{ или } v = v_1 + v_2 + \dots + v_n \quad (58.1)$$

и через все элементы передается одна и та же сила (на основании закона равенства действия и противодействия)

$$F = F_1 = F_2 = \dots = F_n. \quad (58.2)$$

Так как электрическим аналогом скорости является ток, а силы аналогичны напряжению, то соотношения (58.1), (58.2) показывают, что электрическим аналогом цепочки является параллельное соединение электрических двухполюсников, при котором

$$i = i_1 + i_2 + \dots + i_n \text{ и } u = u_1 = u_2 = \dots = u_n.$$

При соединении механических двухполюсников в узел все они имеют одинаковые относительные скорости концов:

$$v = v_1 = v_2 = \dots = v_n, \quad (58.3)$$

а сила, приложенная ко всей системе, равна сумме сил, приложенных к каждому элементу:

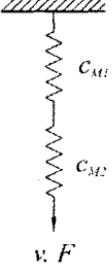
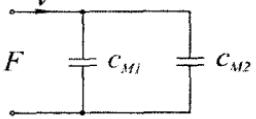
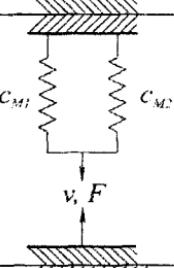
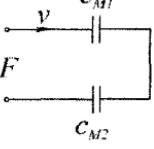
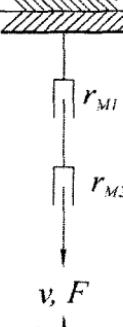
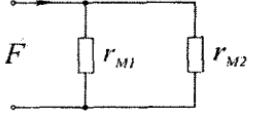
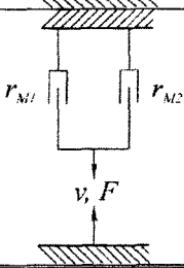
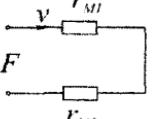
$$F = F_1 + F_2 + \dots + F_n. \quad (58.4)$$

Очевидно, что электрическим аналогом узла является последовательное соединение электрических двухполюсников, при котором

$$i = i_1 = i_2 = \dots = i_n \text{ и } u = u_1 + u_2 + \dots + u_n.$$

Таким образом, при составлении аналоговой схемы пользуются следующими правилами: элементы, образующие узел, соединяются в электрической схеме последовательно; элементы, образующие цепочку, соединяются в электрической схеме параллельно (см. табл. 2).

Таблица 2

Механическая система	Электрический аналог	Формула
		$C_M = C_{M1} + C_{M2}$
		$\frac{1}{C_M} = \frac{1}{C_{M1}} + \frac{1}{C_{M2}}$ $s = s_1 + s_2$
		$\frac{1}{r_M} = \frac{1}{r_{M1}} + \frac{1}{r_{M2}}$
		$r_M = r_{M1} + r_{M2}$

59. Для механических систем, изображенных на рис. 4, определить полное сопротивление и построить схему электрического аналога.

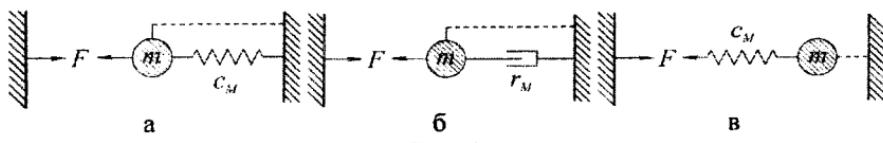


Рис. 4

60. Для механических систем, изображенных на рис. 5, определить полное сопротивление и построить схему электрического аналога.

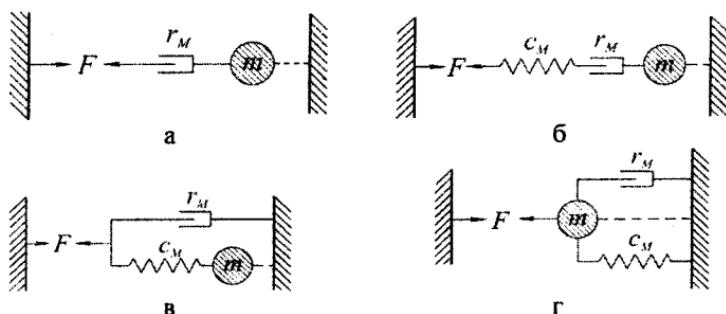


Рис. 5

61. Для каждой из механических систем, изображенных на рис. 6 построить схему электрического аналога и определить ее импеданс.

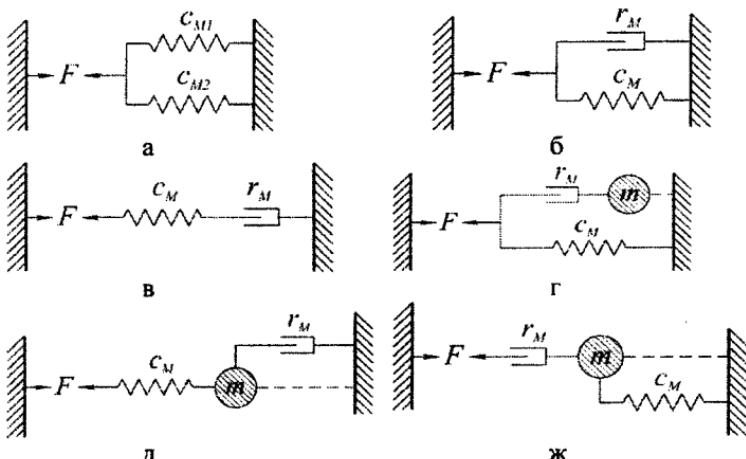
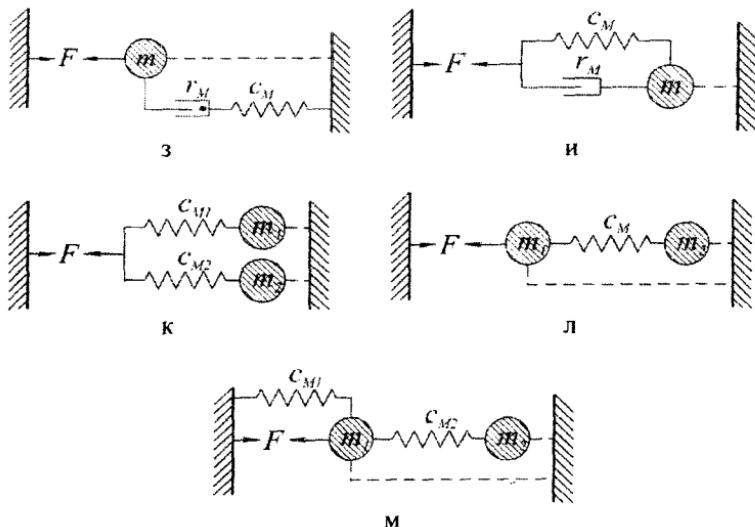


Рис. 6



Окончание рис. 6

62. На рис. 7 приведены механические системы. Построить их механические схемы и схемы электрических аналогий.

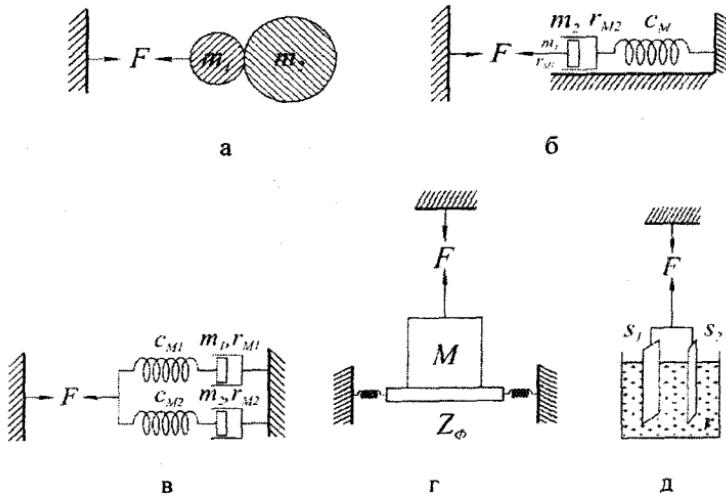
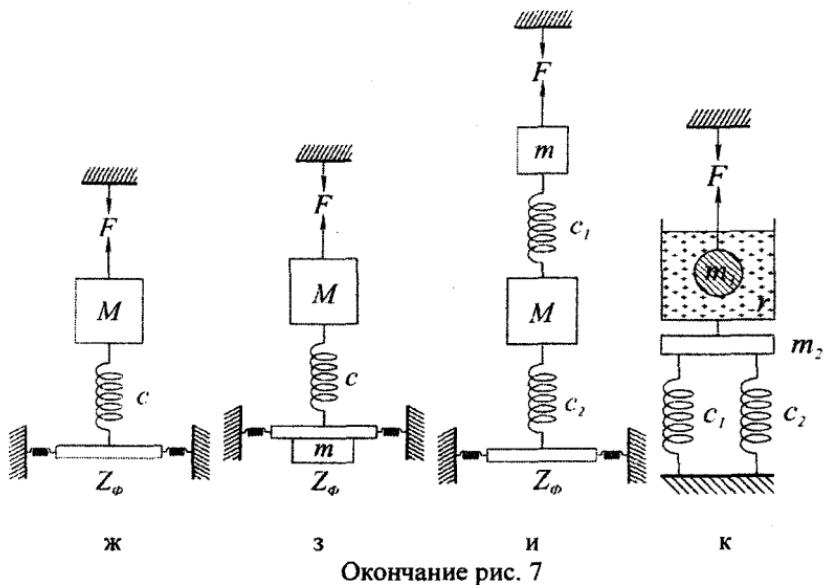


Рис. 7



ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИЕ АНАЛОГИИ

63. Показать, что замкнутый воздушный объем подобен пружине, а движущиеся воздушные потоки в открытой трубе – массе. Указать электрические аналогии данных элементов.

Решение:

Рассмотрим характер реакции, создаваемой воздухом, заключенным в объемы V при колебании невесомого поршня в объеме площадью S . Атмосферное давление p_0 . Смещение поршня на расстояние x вызывает изменение объема $\Delta V = -Sx$ и, следовательно, изменение давления на Δp .

Для адиабатического процесса $(p_0 + \Delta p) \cdot (V + \Delta V)^\gamma = p_0 V^\gamma$, где $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$.

В случае малых колебаний $\left(\frac{\Delta V}{V} \ll 1\right)$ имеем:

$\Delta p(V + \Delta V)^\gamma = p_0 \cdot V^\gamma - p_0(V + \Delta V)^\gamma$ и, следовательно,

$$\Delta p = p_0 \left(\left(\frac{V^\gamma}{(V + \Delta V)^\gamma} \right) - 1 \right) = p_0 \left(1 + \frac{\gamma \cdot \Delta V}{V} - 1 \right) = -p_0 \frac{\gamma \cdot \Delta V}{V}.$$

$\Delta p = -\frac{\gamma \cdot \Delta V \cdot p_0}{V} = p_0 \frac{\gamma \cdot p_0 \cdot S \cdot x}{V}$ – избыточное (звуковое) давление. Тогда

сила реакции воздуха, заключенного в полости, равна

$$\Delta F = p_0 S = \frac{\gamma \cdot p_0 \cdot S^2}{V} x. \quad (63.1)$$

Так как $F \sim x$, то можно говорить об упругом характере реакции внутри полости.

Гибкость воздушного объема определяется как отношение смещения к возвращающей упругой силе ΔF :

$$c_M = \frac{V}{\gamma \cdot p_0 \cdot S^2} = \frac{V}{\rho_0 \cdot c_0^2 \cdot S^2}, \quad (63.2)$$

где ρ_0 и c_0 - плотность и скорость звука в воздухе соответственно.

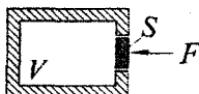


Рис. 8

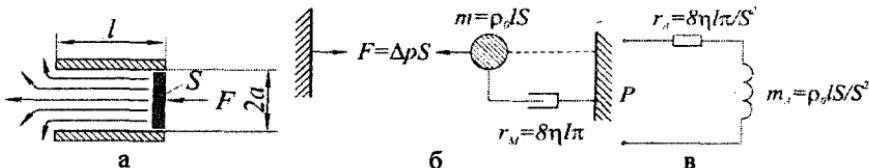


Рис. 9

Второй случай – это колебание воздуха в открытой трубе длиной l и внутренним диаметром $2a$ (см. рис.). В этом случае воздух в трубе не будет деформироваться. Воздух смещается как единое целое. Поэтому $m = \rho_0 \cdot l \cdot S$ где $S = \pi \cdot a^2$.

$$(63.3)$$

В общем случае в колебаниях будет принимать участие воздух, прилегающий к открытому концу трубы. Его учитывают путем добавления к массе воздуха массы воздуха m_s :

$$m_s \approx 2 \cdot \rho_0 \cdot a^3, \quad (63.4)$$

т.е. общая масса будет равна

$$m' = m + m_s = \rho_0 \cdot l \cdot S + 2 \cdot \rho_0 \cdot a^3. \quad (63.5)$$

Однако, когда $l > 2a$, влиянием m_s можно пренебречь.

Таким образом, акустические системы можно изображать в виде механических систем с сосредоточенными параметрами и пользоваться для их расчета электромеханическими аналогиями.

64. Показать аналогию дифференциальных уравнений, описывающих колебательные процессы в акустических и электрических системах, на примере резонатора Гельмгольца и простого электрического контура.

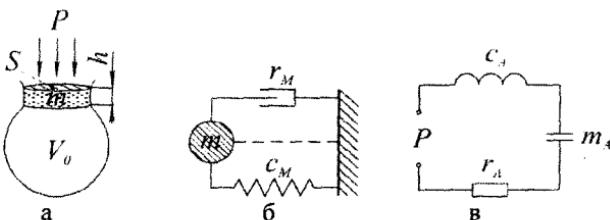


Рис. 10

Решение:

Акустические колебательные системы являются частным случаем механических систем. Обычно состояние механической системы характеризуется смещением и колебательной скоростью отдельных материальных точек, а воздействие характеризуется силами, действующими на систему. Акустические же системы описывают объемными смещениями и объемными колебательными скоростями, а внешнее воздействие – давлениями.

При возбуждении резонатора Гельмгольца звуковой волной воздух в горле колеблется, как поршень, а объем в сосуде создает необходимую упругость и обеспечивает возвращающую силу. Таким образом, если размеры резонатора невелики по сравнению с длиной падающей волны, то можно считать, что вся кинетическая энергия сосредоточена в слое воздуха, который движется в горле резонатора, а потенциальная энергия связана с упругой деформацией воздушного объема полости. В этом предположении резонатор является колебательной системой с одной степенью свободы, состоящий из сосредоточенных параметров массы m и упругостью c_M , а также активного сопротивления r_M , обусловленного вязким трением воздуха о стенки горлышка и потерями колебательной энергии, возникающими вследствие излучения звука открытым концом. Схематическое изображение механической модели резонатора Гельмгольца приведено на рис. 10, б.

В случае воздействия на резонатор периодического внешнего давления $p = p_0 \cdot \exp[i \cdot \omega \cdot t]$ уравнение движения имеет вид

$$m \cdot \ddot{x} + r_M \cdot \dot{x} + \frac{x}{c_M} = p \cdot S \text{ или } \rho_0 \cdot S \cdot h \cdot \ddot{x} + r_M \cdot \dot{x} + \frac{\gamma \cdot p_0 \cdot S^2}{V_0} = p \cdot S.$$

Введем в это уравнение объемные смещение, скорость и ускорение: $v = S \cdot x$, $\dot{v} = S \cdot \dot{x}$, $\ddot{v} = S \cdot \ddot{x}$. Тогда уравнение движения может быть записано в виде

$$m_{\text{ак}} \cdot \ddot{v} + r_{\text{ак}} \cdot \dot{v} + \frac{v}{c_A} = p, \quad (64.1)$$

где $m_{\text{ак}} = \frac{\rho_0 \cdot h}{S^2} = \frac{m}{S^2} \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^4} \right]$ – акустическая масса;

$$c_A = \frac{V_0}{\gamma \cdot p_0} = c_M \cdot S^2 \left[\frac{m^5}{H} \right] - \text{акустическая гибкость}; r_A = \frac{r_M}{S^2} \left[H \cdot \frac{c}{m^5} \right].$$

Уравнение (1) аналогично уравнению, описывающему колебательные процессы в электрическом контуре:

$$L \cdot \ddot{q} + R \cdot \dot{q} + \frac{q}{C} = u. \quad (64.2)$$

Вытекающая из сравнения уравнений (64.1) и (64.2) аналогия между акустическими величинами приведена в табл. 3. Таким образом, аналогом резонатора Гельмгольца является электрический контур с последовательно соединенными параметрами m_A , c_A и r_A .

Таблица 3

Акустическая величина	Электрическая величина
$v = x \cdot S$ - объемное смещение	q - заряд
$\dot{v} = \dot{x} \cdot S$ - объемная скорость	$i = \dot{q}$ - ток
P - давление	U - ЭДС
$c_A = c_M \cdot S^2$ - акустическая гибкость	C - емкость
$m_A = \frac{m}{S^2}$ - акустическая масса	L - индуктивность
$r_A = \frac{r_M}{S^2}$ - акустическое сопротивление	R - активное сопротивление
$\ddot{v} = \ddot{x} \cdot S$ - объемное ускорение	$\frac{\partial i}{\partial t}$ - скорость изменения тока
Для рассмотренных систем	
$Z_A = r_A + i \cdot \omega \cdot m_A + \frac{1}{i \cdot \omega \cdot c_A}$ - полное акустическое сопротивление	$Z = R + i \cdot \omega \cdot L + \frac{1}{i \cdot \omega \cdot C}$ - полное электр. сопротивление
$i \cdot \omega \cdot m_A$ - инерциальное акустическое сопротивление	$i \cdot \omega \cdot L$ - индуктивное сопротивление
$\frac{1}{i \cdot \omega \cdot c_A}$ - упругое акустическое сопротивление	$\frac{1}{i \cdot \omega \cdot C}$ - емкостное сопротивление
$\omega_0 = (m_A \cdot c_A)^{1/2}$ - собственная частота акустической системы	$\omega_0 = (L \cdot C)^{1/2}$ - собственная частота электрической системы

65. Рассчитать коэффициент гибкости замкнутого воздушного объема,

заключенного в цилиндрической трубе сечением $7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, длиной $7 \cdot 10^2 \text{ м}$.

66. Воздух в открытой короткой трубе возбуждается поршнем. Рассчитать присоединенную массу воздуха, если длина трубы $l=20 \text{ см}$, внутренний диаметр $2a=4 \cdot 10^{-2} \text{ м}$. Сравнить присоединенную массу с массой воздуха в трубе ($\rho_0=1,3 \text{ кг/м}^3$).

67. Найти механический и электрический аналоги короткой узкой трубки. Для потока газа через трубку выполняется закон Пуазейля.

Решение:

Если выполняется закон Пуазейля, то

$$\Delta p = \frac{\gamma \cdot \eta \cdot l \cdot \pi}{S^2} \dot{v}, \quad (67.1)$$

где \dot{v} - объемная скорость газа; η - вязкость газа; l - длина трубы.

Формула (67.1) аналогична закону Ома $U = R \cdot i$. Таким образом, аналогом акустической величины $R = \frac{\gamma \cdot \eta \cdot l \cdot \pi}{S^2}$ является активное сопротивление. Механическое же сопротивление равно

$$r_m = r_A \cdot S^2 = \gamma \cdot \eta \cdot \pi. \quad (67.2)$$

В трубке под действием звукового давления образуется ускоренный газовый поток и согласно второму закону Ньютона:

$$\Delta p = \frac{\rho_0 \cdot l \cdot S}{S^2} \frac{d\dot{v}}{dt}. \quad (67.3)$$

где $\frac{d\dot{v}}{dt}$ - акустическое ускорение; ρ_0 - плотность газа; $\frac{\rho_0 \cdot l \cdot S}{S^2} = m_A$ - акустическая масса. Данное выражение сходно с законом Фарадея

$$U = L \frac{di}{dt}. \quad (67.4)$$

Поэтому аналогом m_A является индуктивность L . Механическое же инерциальное сопротивление трубы определяется массой $m = m_A \cdot S^2 = \rho_0 \cdot l \cdot S$. Таким образом, механический аналог потока газа через узкую трубку можно представить в виде соединения сосредоточенных параметров m и r_m в узел, а электрический аналог - в виде последовательного соединения элементов r_a и m_A .

В общем случае при излучении звука частотой ω открытым концом, помимо инерции воздуха в трубке и активного сопротивления трения, необходимо учитывать присоединенную массу и сопротивление излучения

$$r_s = \frac{\rho_0}{4\pi C_0} \omega^2 S^2 = \frac{\pi \rho_0 C_0 S^2}{\lambda^2}. \quad (67.5)$$

68. Определить активное сопротивление воздуха в трубе (задача №66)

на частоте $f=1\text{кГц}$. Считать, что сопротивление трения обусловлено вязкими потерями вблизи стенок трубы, и выполняется закон Пуазейля. $\eta=0,19 \cdot 10^{-4} \text{ Па}\cdot\text{с}$; $c_0=340 \text{ м}/\text{с}$; $\rho=1,3 \text{ кг}/\text{м}^3$;

69. Найти полное акустическое сопротивление воздуха в короткой открытой цилиндрической трубке на частоте 500 Гц . Длина трубы $l=0,1 \text{ м}$, радиус $a=0,01 \text{ м}$, плотность воздуха $1,3 \text{ кг}/\text{м}^3$, вязкость $\eta=0,19 \cdot 10^{-4} \text{ Па}\cdot\text{с}$, скорость звука $c_0=340 \text{ м}/\text{с}$.

70. Построить схему электрического аналога резонатора Гельмгольца и определить собственную частоту колебаний резонатора, заполненного воздухом. Объем сосуда $V_0=10^{-4} \text{ м}^3$, $h=0,02 \text{ м}$, $S=0,0012 \text{ м}^2$, $c_0=340 \text{ м}/\text{с}$ ($t=15^\circ\text{C}$, $p_0=10^5 \text{ Па}$).

71. Определить скорость колебаний воздуха в горле резонатора Гельмгольца, если на него действует внешнее давление звуковой волны $p=p_m \exp(j \cdot \omega \cdot t)$ с частотой, равной резонансной частоте резонатора. Амплитуда давления $p_m=2 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$, длина горла резонатора $0,07 \text{ м}$, его радиус $0,005 \text{ м}$. Объем сосуда 10^{-4} м^3 . Скорость звука $c_0=340 \text{ м}/\text{с}$, плотность воздуха $1,3 \text{ кг}/\text{м}^3$, вязкость $\eta=0,19 \cdot 10^{-4} \text{ Па}\cdot\text{с}$.

72. Рассчитать модуль входного акустического импеданса резонатора Гельмгольца на частоте $f=800 \text{ Гц}$ и на резонансной частоте. Акустическое сопротивление в горле резонатора $r_a=0,03 \text{ кг}/(\text{м}^4 \cdot \text{с})$, плотность газа $\rho_0=1,2 \text{ кг}/\text{м}^3$. Объем сосуда $V_0=2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$, радиус цилиндрического горла резонатора $a=0,01 \text{ м}$, длина $h=0,015 \text{ м}$. Скорость звука $c_0=340 \text{ м}/\text{с}$.

73. Определить резонансную частоты резонатора Гельмгольца и коэффициент усиления его на резонансной частоте, если резонатор заполнен водой. Скорость звука в воде $c_0=1430 \text{ м}/\text{с}$, плотность $\rho_0=1000 \text{ кг}/\text{м}^3$, вязкость $\eta=1,1 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$. Высота горла $h=0,04 \text{ м}$, площадь поперечного сечения горла $S=0,0012 \text{ м}^2$, объем сосуда $V_0=0,45 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$. Считать, что активное сопротивление воды в горле резонатора обусловлено вязким трением.

74. Во сколько раз максимальное давление в полости резонатора больше максимального значения давления в падающей на него звуковой волне, если резонатор, описанный в задаче 73 заполнен воздухом. Частота падающей волны совпадает с резонансной частотой резонатора. Сравнить резонансные частоты и добротности в случае заполнения его водой и воздухом. Скорость звука в воздухе $c_0=340 \text{ м}/\text{с}$, плотность $\rho_0=1,3 \text{ кг}/\text{м}^3$, вязкость $\eta=1,9 \cdot 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$.

75. Найти граничные частоты и характеристическое сопротивление акустического фильтра, показанного на рис. 11. Объем воздушной полости $V_0=10^{-4} \text{ м}^3$, длина и площадь поперечного сечения ответвлений $l=0,015 \text{ м}$ и

$S=3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$. Построить схему электрического аналога. Как измениться граничная частота фильтра при увеличении объема в 10 раз?

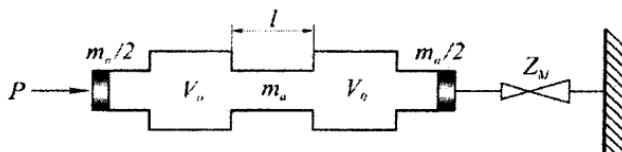


Рис. 11

76. Акустический фильтр образован из отрезков широких и узких трубок (рис. 12), соединенных между собой последовательно. Определить массу и гибкость воздуха в трубах и рассчитать граничные частоты фильтра. Нарисовать схему электрического аналога. Скорость звука $c_0=344 \text{ м/с}$. Размеры трубок: $V_0=1 \text{ м}^3$, $l=0,25 \text{ м}$, $S=900 \text{ см}^2$.

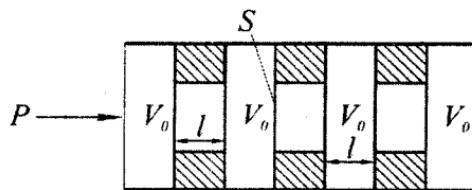


Рис. 12

77. На рис. 13 приведена схема акустического фильтра, представляющего собой трубу с ответвлениями в виде трубок с открытыми концами. Построить схему электрического аналога, определить граничные частоты и характеристическое сопротивление фильтра, если труба заполнена водой (скорость звука равна 1430 м/с). Длина и площадь поперечного сечения ответвления равны $l=0,01 \text{ м}$ и $S=10 \text{ см}^2$, объем каждой полости, на которые разделяется труба - $V_0=100 \text{ см}^3$. Как изменится граничная частота фильтра, если трубу заполнить воздухом (скорость звука равна 330 м/с).

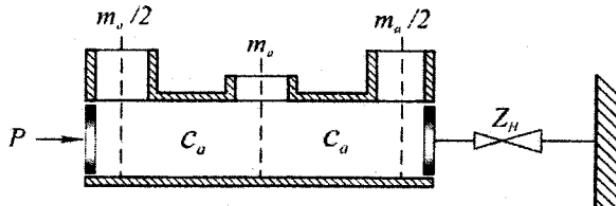


Рис. 13

ОТРАЖЕНИЕ И ПРЕЛОМЛЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН

78. Используя условия на границе раздела двух жидких сред – равенство акустических давлений и нормальных компонент скорости по обе стороны от границы, получить формулы для коэффициентов отражения и прозрачности по давлению.

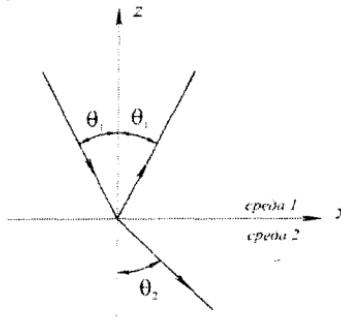


Рис. 14

Решение:

Потенциал звукового поля в падающей волне без учета временного множителя $\exp[-i \cdot \omega \cdot t]$ имеет следующий вид:

$$\varphi_{\text{пад}} = A \cdot \exp[i \cdot k_1 \cdot (x \cdot \sin \theta_1 - z \cdot \cos \theta_1)], \quad (78.1)$$

$$\text{где } k_1 = \frac{\omega}{c_1},$$

а в отраженной волне

$$\varphi_{\text{отр}} = A \cdot V \cdot \exp[i \cdot k_1 \cdot (x \cdot \sin \theta_1 + z \cdot \cos \theta_1)]. \quad (78.2)$$

Здесь V – коэффициент отражения.

Потенциал поля в среде 1 будет равен

$$\varphi_1 = \varphi_{\text{пад}} + \varphi_{\text{отр}}; (\varphi_{1(z=0)} = A \cdot \exp[i \cdot k_1 \cdot x \sin \theta_1] (1 + V)). \quad (78.3)$$

А в среде 2

$$\varphi_2 = A \cdot W \cdot \exp[i \cdot k_2 \cdot (x \cdot \sin \theta_2 - z \cdot \cos \theta_2)], \quad (78.4)$$

$$\text{где } k_2 = \frac{\omega}{c_2}; W \text{ – коэффициент прозрачности.}$$

Запишем граничные условия ($z=0$):

1 - равенство давлений:

$$p_1 = p_2; \left(p' = -\rho \cdot \frac{d\varphi}{dt} \right), \quad (78.5)$$

$$\text{откуда } \frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{p_1}{p_2}.$$

2 - равенство нормальных скоростей:

$$v_{n_1} = v_{n_2} \text{ или } \frac{\partial \varphi_1}{\partial z} = \frac{\partial \varphi_2}{\partial z} \left(\frac{v_0}{\omega} = \frac{\rho'_0}{\rho_0 \cdot c \cdot \omega}, v = \operatorname{grad} \varphi \right). \quad (78.6)$$

Из условия 5, учитывая (1)-(4), находим при $z=0$:

$$\frac{\rho_1 \cdot 1 + V}{\rho_2 \cdot W} = \exp[i \cdot x \cdot (k_2 \cdot \sin \theta_2 - k_1 \sin \theta_1)], \quad (78.7)$$

$$A \cdot \exp[i \cdot k_1 \cdot \sin \theta_1] \cdot (1 + V) \cdot \rho_1 = A \cdot W \cdot \exp[i \cdot k_2 \cdot \sin \theta_2] \cdot \rho_2.$$

Так как левая часть (78.7) не зависит от x , то из (78.7) получается закон преломления – закон Снelliуса:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{k_2}{k_1} = \frac{c_1}{c_2} = n. \quad (78.8)$$

Связь между коэффициентами отражения и прозрачности равна

$$W = \frac{(1 + V)}{m},$$

$$\text{где } m = \frac{\rho_2}{\rho_1}.$$

Из (78.6) при $z=0$ получим

$$(1 - V) \cdot \cos \theta_1 = n \cdot W \cdot \cos \theta_2. \quad (78.9)$$

Из (78.7)-(78.9) выводим формулы для V и W

$$V = \frac{m \cdot \cos \theta_1 - n \cdot \cos \theta_2}{m \cdot \cos \theta_1 + n \cdot \cos \theta_2} = \frac{\rho_2 \cdot c_2 / \cos \theta_2 - \rho_1 \cdot c_1 / \cos \theta_1}{\rho_2 \cdot c_2 / \cos \theta_2 + \rho_1 \cdot c_1 / \cos \theta_1} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad (78.10)$$

где $Z_N = \frac{\rho_N \cdot c_N}{\cos \theta_N}$ – нормальный импеданс на границе раздела;

$$W = \frac{2 \cdot \cos \theta_1}{m \cdot \cos \theta_1 + n \cdot \cos \theta_2}. \quad (78.11)$$

Полученные формулы выражают коэффициент отражения и прохождения по потенциальну скорости. Так как $\rho' = -\rho \frac{\partial \varphi}{\partial t}$, то соответствующие коэффициенты по давлению равны

$$V_p = V, \quad W_p = \frac{\rho_2}{\rho_1} \cdot W = \frac{2 \cdot m \cdot \cos \theta_1}{m \cdot \cos \theta_1 + n \cdot \cos \theta_2}. \quad (78.12)$$

При нормальном падении $\theta_1 = \theta_2 = 0$

$$V_p = \frac{m - n}{m + n}, \quad W_p = \frac{2 \cdot m}{m + n} \quad (78.13)$$

Ответ: $V_p = \frac{m - n}{m + n}, \quad W_p = \frac{2 \cdot m}{m + n}$.

79. Вывести формулы для коэффициентов отражения и прозрачности по колебательной скорости на плоской границе между жидкими средами в случае нормального падения волны. Сравнить их с соответствующими коэффициентами по давлению.

$$\text{Ответ: } V_v = \frac{\rho_1 \cdot c_1 - \rho_2 \cdot c_2}{\rho_1 \cdot c_1 + \rho_2 \cdot c_2}, \quad W_v = \frac{2\rho_1 \cdot c_1}{\rho_1 \cdot c_1 + \rho_2 \cdot c_2}.$$

80. Источник звука находится над поверхностью раздела в среде со скоростью звука c_1 , а приемник в среде со скоростью звука c_2 - под поверхностью раздела (рис. 15). Источник и приемник разнесены на горизонтальное расстояние d . Показать, что время распространения сигнала вдоль луча, испытавшего преломление на поверхности раздела, минимально, если луч подчиняется закону Снеллиуса.

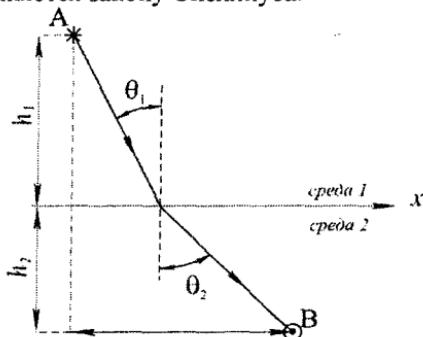


Рис. 15

81. Вывести коэффициент прозрачности по интенсивности при нормальном падении плоской волны. Показать, что интенсивность прошедшей волны не зависит от ее направления падения.

82. Найти коэффициент отражения по давлению и коэффициент передачи энергии при нормальном падении звука из воздуха в воду и из воды в воздух. Плотность воздуха $\rho_1 = 1,29 \text{ кг/м}^3$, воды $\rho_2 = 10^3 \text{ кг/м}^3$. Скорость звука соответственно $c_1 = 340 \text{ м/с}$, $c_2 = 1480 \text{ м/с}$. Как изменится коэффициент передачи при наклонном падении волны на границу раздела сред?

83. Плоская звуковая волна падает по нормали из воздуха на полупространство из углекислоты. Определить коэффициент отражения по давлению на границе. Во сколько раз отличается амплитуда прошедшей волны от амплитуды падающей? Определить отношение амплитуд звукового давления в максимумах и минимумах акустического поля в воздухе. Для

воздуха $c_1 = 3,4 \cdot 10^4 \text{ см/с}$, $\rho_1 \cdot c_1 = 42 \text{ г/см}^2 \cdot \text{с}$; для углекислоты
 $c_2 = 2,6 \cdot 10^4 \text{ см/с}$, $\rho_2 \cdot c_2 = 51 \text{ г/см}^2 \cdot \text{с}$

84. Ультразвуковой керамический преобразователь помещен в касторовое масло. Какая доля энергии акустической волны, распространяющейся в керамике, при этом передается в масло? Плотность керамики $\rho_1 = 8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, скорость звука в ней $c_1 = 6200 \text{ м/с}$. Плотность масла $\rho_2 = 0,96 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, скорость звука в нем $c_2 = 1490 \text{ м/с}$. Считать, что задача сводится к нормальному падению плоской волны на границу.

85. Определить, при каком угле падения θ_1 коэффициент отражения по давлению равен нулю (угол полной прозрачности) для границы раздела вода - жидкий осадок (для воды $\rho_1 = 1 \text{ г/см}^3$ $c_1 = 1,5 \cdot 10^3 \text{ м/с}$, в осадке $\rho_2 = 1,4 \text{ г/см}^3$ $c_2 = 1,48 \cdot 10^3 \text{ м/с}$).

86. Показать, что при полном внутреннем отражении и закритических углах падения амплитуда волн в отражающей среде убывает при удалении от границы среды по экспоненте.

Решение:

Выражение для коэффициента отражения имеет вид (формула Френеля)

$$V = \left[\frac{\rho_2}{\rho_1} - \frac{k_2 \cos \theta_2}{k_1 \cos \theta_1} \right] \left[\frac{\rho_2}{\rho_1} + \frac{k_2 \cos \theta_2}{k_1 \cos \theta_1} \right]^{-1},$$

где $k = \frac{\omega}{c}$; θ_1 и θ_2 - углы, образованные лучом с нормалью к границе соответственно в средах 1 и 2 ($c_2 > c_1$).

Пусть $a_1 = k_1 \cos \theta_1$. При критическом угле падения отраженный луч направлен вдоль отражающей границы, и при закритических углах величина $\sin \theta_2 = \frac{c_2}{c_1} \sin \theta_1$ рассматривается (становится) мнимой и если обозначить за $a_2 = k_2 \cos \theta_2 = i \cdot \lambda$, то a_2 - тоже мнимое. Тогда коэффициент отражения равен

$$V = \left[\frac{\rho_2}{\rho_1} - i \frac{\lambda}{a_1} \right] \left[\frac{\rho_2}{\rho_1} + i \frac{\lambda}{a_1} \right]^{-1} = \exp(-i\varphi)$$

В этом выражении $\operatorname{tg}\left(\frac{\varphi}{2}\right) = \frac{\alpha}{a_1} \frac{\rho_1}{\rho_2}$ и $|V| = 1$.

Коэффициент прозрачности также будет комплексным числом:

$$W = r \left[\frac{\rho_2}{\rho_1} + \frac{k_2 \cos \theta_2}{k_1 \cos \theta_1} \right]^{-1} = 2 \left[\left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^2 + \left(\frac{\alpha}{a_1} \right)^2 \right]^{-0.5} \exp\left(-i \frac{\varphi}{2}\right).$$

И соответственно потенциал звукового поля в среде 2 равен

$$\varphi_2 = r \cdot A \cdot e^{i\omega} \left[\left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^2 + \left(\frac{\alpha}{a_1} \right)^2 \right]^{-0.5} \exp\left(i k_1 x \sin \theta_1 + \alpha z - i \frac{\varphi}{2}\right),$$

здесь A – амплитуда падающей на границу волны. Откуда видно, что амплитуда поля убывает при удалении от границы по закону

$$|A_2| = r A e^{i\omega} \left[\left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^2 + \left(\frac{\alpha}{a_1} \right)^2 \right]^{-0.5}, \quad \alpha > 0 \quad z < 0.$$

87. Показать, что полное отражение от поглощающей поверхности невозможно.

88. Вычислить угол полного отражения звука частотой 100 кГц на границе между водой и анилином. Определить фазу коэффициента отражения и глубину проникновения звука в анилин, на которой при угле падения 80° давление уменьшается в e раз. Поглощением звука в среде пренебречь. Плотность воды и анилина соответственно равны $\rho_1 = 1$ и $\rho_2 = 1,022 \text{ г}/\text{см}^3$, скорость звука $c_1 = 1480$ и $c_2 = 1659 \text{ м}/\text{с}$.

89. Комплексный коэффициент отражения звука от жидкого грунта при нормальном падении луча $V = 0,45 \cdot \exp[i \cdot 0,01]$. Вычислить параметры грунта – скорость звука и угол потерь δ , и найти коэффициент затухания звука на частоте 30 кГц . Скорость звука в воде равна $1460 \text{ м}/\text{с}$, плотность воды $1 \text{ г}/\text{см}^3$. Плотность грунта равна $2,2 \text{ г}/\text{см}^3$.

90. Найти коэффициент отражения звука от плоского жидкого слоя с нормальным импедансом Z_2 и толщиной d , разделяющего два полупространства с нормальными импедансами Z_1 и Z_3 .

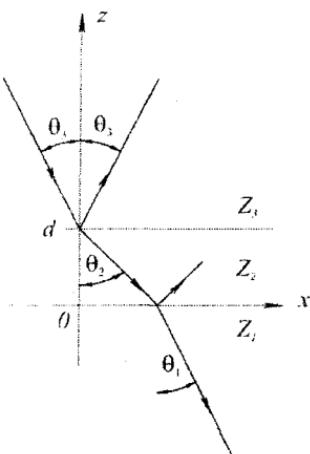


Рис. 16

Решение:

Вспоминаем, что нормальный импеданс среды равен $Z = \frac{\rho \cdot c}{\cos \theta}$.

В первом приближении акустическое давление внутри слоя есть сумма полей двух плоских волн, имеющих отрицательную и положительную проекции волнового вектора на ось Z .

$$p_2 = [A \cdot \exp(-i \cdot a_2 \cdot z) + B \cdot \exp(i \cdot a_2 \cdot z)] \exp(i \cdot b_2 \cdot x), \quad (90.1)$$

где опущен временной множитель $\exp(-i \cdot \omega \cdot t)$, $a_2 = k_2 \cos \theta_2$,

$$b_2 = k_2 \sin \theta_2, \quad k_2 = \frac{\omega}{c_2}.$$

Нормальная составляющая скорости этого слоя:

$$V_2 = Z_2^{-1} [A \exp(-ia_2 z) + B \exp(ia_2 z)] \exp(ib_2 x). \quad (90.2)$$

Используя (90.1) и (90.2) рассчитаем импеданс на нижней границе: ($z=0$) слоя.

$$Z_1 = \left[\frac{p_2}{V_2} \right]_{z=0} = Z_2 \frac{A+B}{A-B}, \text{ откуда } \frac{B}{A} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}.$$

Входной импеданс слоя ($z=d$) равен

$$\begin{aligned} Z_{in} &= \left[\frac{p_2}{V_2} \right]_{z=0} = Z_2 \frac{\exp(i \cdot a_2 \cdot d) + \left(\frac{B}{A} \right) \exp(i \cdot a_2 \cdot d)}{\exp(i \cdot a_2 \cdot d) + \left(\frac{B}{A} \right) \exp(i \cdot a_2 \cdot d)} = \\ &= Z_2 \frac{Z_1 \cos(a_2 \cdot d) - i \cdot Z_2 \sin(a_2 \cdot d)}{Z_2 \cos(a_2 \cdot d) - i \cdot Z_1 \sin(a_2 \cdot d)}. \end{aligned}$$

Рассмотрим поле в третьей среде, состоящее из суммы падающей и отраженной от слоя волн:

$$p_3 = [c \exp[-i \cdot a_3(Z - d)] + D \exp[i \cdot a_3(z - d)]] \exp(i \cdot b_3 \cdot x),$$

$$V_3 = Z_3^{-1} [c \exp[-i \cdot a_3(Z - d)] - d \exp[i \cdot a_3(z - d)]] \exp(i \cdot b_3 \cdot x),$$

где $a_3 = k_3 \cos \theta_3$, $b_3 = k_3 \sin \theta_3$, $k_3 = \frac{\omega}{c_3}$.

Откуда находим другое выражение для входного импеданса слоя:

$$Z_{\text{ax}} = \left(\frac{p_3}{V_3} \right)_{z=d} = \frac{C+D}{C-D} Z_3.$$

Из этой формулы находим коэффициент отражения звука от слоя.

$$V = \frac{D}{C} = \frac{Z_{\text{ax}} - Z_3}{Z_{\text{ax}} + Z_3} = \frac{Z_2(Z_1 - Z_3)\cos\psi - i(Z_2^2 - Z_1Z_3)\sin\psi}{Z_2(Z_1 + Z_3)\cos\psi - i(Z_2^2 + Z_1Z_3)\sin\psi},$$

где $\psi = k_2 d \cos \theta_2$, $k_2 = \frac{\omega}{c_2}$.

91. Получить выражение для коэффициента отражения звука от плоского слоя толщиной d , разделяющего две одинаковые по своим характеристикам среды.

92. Найти условие акустического согласования двух непоглащающих сред с помощью промежуточного слоя толщиной d . Рассмотреть нормальное падение волны.

Решение:

Коэффициент отражения от плоского слоя с импедансом Z_2 , разделяющего среды Z_1 и Z_3 , при нормальном падении можно записать как

$$V = \frac{(V_{23} + V_{12})\cos\psi + i(V_{12} - V_{23})\sin\psi}{(1 + V_{23} \cdot V_{12})\cos\psi + i(V_{23} \cdot V_{12} - 1)\sin\psi}, \quad \text{где } \psi = k_2 \cdot d, \quad V_{ik} = \frac{Z_i - Z_k}{Z_i + Z_k}.$$

Квадрат модуля коэффициента отражения от слоя равен

$$\gamma = |V|^2 = \frac{(V_{23} + V_{12})^2 - 4V_{23} \cdot V_{12} \sin^2 \psi}{(1 + V_{23} \cdot V_{12})^2 - 4V_{23} \cdot V_{12} \sin^2 \psi} = \frac{a^2 - c \sin^2 \psi}{b^2 - c \sin^2 \psi},$$

$$\text{здесь } a = V_{23} + V_{12} = \frac{r \cdot Z_2(Z_1 - Z_3)}{(Z_1 + Z_2)(Z_2 + Z_3)}, \quad b = 1 + V_{23}V_{12} = \frac{r \cdot Z_2(Z_1 + Z_3)}{(Z_1 + Z_2)(Z_2 + Z_3)}.$$

Если принять, что $Z_1 > Z_2 > Z_3$, то $a > 0, b > 0$, но $a < b$.

Исследуя выражение для квадрата модуля коэффициента отражения, получим, что r имеет минимум при $d = \frac{m+1}{2} \frac{\lambda}{2}$, $m=0,1,2\dots$ и r -максимален

при $d = \frac{\lambda}{2} m$.

Первый минимум коэффициента отражения соответствует четверть-

волновому слою $d = \frac{\lambda}{4}$, при этом $r_{\min} = \frac{a^2 - c}{b^2 - c}$ и $|V|_{\min} = \frac{V_{23} - V_{12}}{1 - V_{23} \cdot V_{12}}$.

Отражение от слоя полностью отсутствует при $V_{23} = V_{12}$, т.е. в случае, если $\frac{Z_2 - Z_3}{Z_2 + Z_3} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}$. Откуда получаем условие согласования сред $Z_2^2 = Z_1 \cdot Z_3$.

93. Вычислить характеристический импеданс «просветляющего» слоя, обеспечивающего наилучшую передачу звука из воды в воздух. Рассмотреть случай нормального падения. Ответ дать в системе СГС.

94. Получить выражение для коэффициента прозрачности по интенсивности плоского слоя, разделяющего две одинаковые среды. Рассмотреть нормальное падение волн.

95. Коэффициентом звукоизоляции η называют величину, обратную коэффициенту прозрачности по интенсивности. Получить выражение для η на низких частотах. Считать, что твердая стенка используется для звукоизоляции в воздухе.

96. Оценить коэффициент звукоизоляции (в децибелах) кирпичной стенки (плотность $\rho=1,7 \text{ г}/\text{см}^3$) толщиной 27 см в воздухе на частоте 2 кГц. Поглощением звука в материале стенки пренебречь.

97. Во сколько раз уменьшается мощность плоской звуковой волны с частотой 1 кГц при прохождении через стальной щит толщиной 2,5 см, который разделяет два резервуара с водой. Плотность стали $7,8 \text{ г}/\text{см}^3$, скорость звука в ней $5100 \text{ м}/\text{с}$.

98. Слой воды разделяет касторовое масло и ртуть. При какой минимальной толщине слоя возникают наилучшие условия перехода звука частотой 1 кГц из масла в ртуть при нормальном падении? Найти коэффициент отражения. Плотность масла, вод и ртути: $\rho_1 = 0,96 \text{ г}/\text{см}^3$,

$\rho_2 = 1 \text{ г}/\text{см}^3$ и $\rho_3 = 13,6 \text{ г}/\text{см}^3$; скорости звука: $c_1 = 1490 \text{ м}/\text{с}$, $c_2 = 1468 \text{ м}/\text{с}$, $c_3 = 1453 \text{ м}/\text{с}$.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В СЛОИСТОНЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ

99. Получить выражения для кривизны и радиуса кривизны луча в плоскослоистой среде.

Решение:

Угол χ между направлением луча и горизонталью будет функцией от z . Под кривизной понимают относительное изменение угла скольжения на единицу длины луча

$$K = \frac{d\chi}{ds} = \left(\sin \chi = \frac{dz}{ds} \right) = \sin \chi \frac{d\chi}{dz} \quad (99.1)$$

А радиус кривизны это есть величина обратная величине кривизны $R = |k|^{-1}$. Для плоскослоистой среды закон Снеллиуса имеет вид $\frac{\cos \chi(z)}{c(z)} = \frac{\cos \chi_0}{c_0}$ или при рассмотрении малых участков (т.е. берется производная)

$$-\sin \chi \frac{d\chi}{dz} = \cos \chi_0 \frac{1}{c_0} \frac{dc(z)}{dz}. \quad (99.2)$$

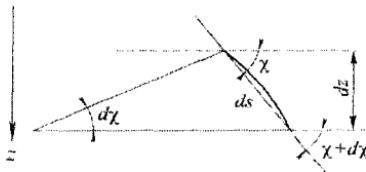


Рис. 17

Таким образом, подставляя выражение (99.2) в (99.1) получаем, что $k = -\cos \chi_0 \frac{1}{c_0} \frac{dc(z)}{dz}$, $R = \frac{c_0}{\cos \chi_0} \left| \frac{dc(z)}{dz} \right|^{-1}$. Знак в выражении для k характеризует направление искривления луча — луч искривляется в сторону меньших значений $c(z)$.

99. Исследовать зависимость кривизны k луча от вертикальной координаты в точке z_0 входа в плоскослоистую среду, скорость звука в которой $c(z) = Az^2 + B$, $B > 0$. В какую сторону искривляется луч в зависимости от знака A ?

100. Найти радиус кривизны и траекторию луча в среде с постоянным

градиентом скорости звука $c(z) = c_0 \left(1 + \frac{z}{H}\right)$.

101. Источник находится на глубине z_0 в плоскослоистой среде с постоянным отрицательным градиентом скорости $c = c_0 \left(1 - \frac{z}{H}\right)$. Найти горизонтальное расстояние L от источника до границы геометрической тени.

102. Звук распространяется в приповерхностном волноводном канале с постоянным градиентом скорости $c(z) = c_0 \left(1 + \frac{z}{H}\right)$. Найти длину цикла луча D в зависимости от угла скольжения χ на поверхности.

103. Найти длину цикла, если звук распространяется в приповерхностном волноводном канале с постоянным градиентом скорости $C(z) = C_0 \left(1 + \frac{z}{H}\right)$. Волновод имеет глубину h . Рассмотреть предельные случаи $h \ll H$, $\chi \ll 1$ и $\chi = \frac{\pi}{2}$ (рис. 18).

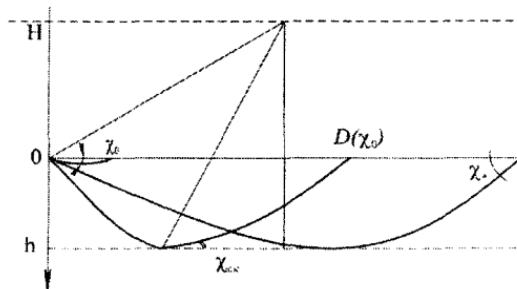


Рис. 18

104. Волноводный канал образован двумя слоями с постоянным градиентом скорости звука (рис. 19).

$$H = H_2 \text{ при } z > 0,$$

$$H = -H_1 \text{ при } z < 0.$$

Найти длину цикла $D(\chi_0)$, а также радиусы кривизны в верхней R_B и нижней R_H полуплоскости в зависимости от угла наклона χ_0 луча на оси канала.

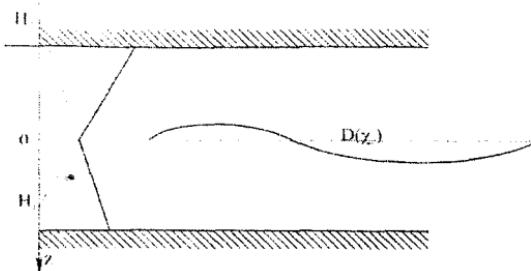


Рис. 19

105. Градиент скорости звука в слое постоянен и равен $\frac{\partial c}{\partial z} = 0,05 \text{ c}^{-1}$,

скорость звука у поверхности $c_0 = 1500 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, глубина слоя $h=200 \text{ м}$. Источник звука находится у поверхности. Найти горизонтальное расстояние, на котором лук, скользнувший по дну, выйдет на свободную поверхность.

106. Узконаправленный источник, расположенный на глубине $z_0=200 \text{ м}$, излучает звук в угловых пределах $\chi_0 = \pm\alpha (\alpha = 3^\circ)$ относительно горизонта. Определить, на каком расстоянии x звук выйдет на поверхность. Какова будет длина d озвучиваемого участка на поверхности? Градиент скорости звука постоянен и равен $\frac{\partial c}{\partial z} = 0,08 \text{ c}^{-1}$, скорость звука на горизон-

те излучается $c_0 = 1500 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

107. Слой воды имеет постоянный отрицательный градиент скорости звука $-a = |H|^{-1} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$. На каком расстоянии L луч, направленный у поверхности горизонтально, достигнет глубины $h=200 \text{ м}$. Найти угол скольжения x в этой точке.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. 2-е изд. – М.: Наука, 1973.
2. Морз Ф. Колебания и звук /Пер. с англ.; под ред. С.Н. Ржевкина. – М.; Л.: Гостехиздат, 1949.
3. Скучик Е. Подводная акустика / Пер. с англ.; под ред. Л.М. Ля-мышева. – М.: Мир, 1976.
4. Сапожков М.А. Электроакустика. – М.: Связь, 1978.
5. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Гидродинамика. – М.: Наука, 1986.
6. Лепендин Л.Ф. Акустика. – М.: Высшая школа, 1978.
7. Исакович М.А. Общая акустика. – М.: Наука, 1973.
8. Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П. Теоретические основы акустики океана. – Л.: Гидрометеоиздат, 1982.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	3
РАСПРОСТРАНЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН.....	4
ЗАТУХАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН.....	7
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ АНАЛОГИИ.....	13
ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИЕ АНАЛОГИИ.....	20
ОТРАЖЕНИЕ И ПРЕЛОМЛЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН.....	27
РАСПРОСТРАНЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В СЛОИСТОНЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ.....	35

**Тимошенко Владимир Иванович
Куценко Александр Николаевич**

**Методические указания
к практическим занятиям
по курсу
Акустические поля**

Ответственный за выпуск
Редактор
Корректор

Куценко А.Н.
Надточий З.И.
Чиканенко Л.В.

0565 от 23.06.1997 г. Подписано к печати 24.11.2005 г.

Формат 60x84 1/16.

Печать офсетная. Бумага офсетная.

Усл. п. л. – 2,4

Уч.-изд.л. – 2,3.

Тираж 100 экз.

Заказ № 145

Издательство Таганрогского государственного
радиотехнического университета
ГСП 17А, Таганрог, пер. Некрасовский, 44
Типография Таганрогского государственного
радиотехнического университета,
ГСП 17А, Таганрог, Энгельса, 1