МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА
И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. М. В. ЛОМОНОСОВА

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА АКУСТИКИ

С. Н. РЖЕВКИН

ЗАДАЧИ ПО ТЕОРИИ ЗВУКА

ИЗДАТЕЛЬСТВО МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
1976

Рецензенты: профессор В.М. Лопухин,
профессор М.Д. Карасев

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящий сборник задач по теории звука составлен по материалам занятий, проводившихся в течение ряда лет со студентами кафедры акустики физического факультета МГУ. Состав задач соответствует в основном программе курсов лекций, читаемых на кафедре акустики МГУ, однако настоящий сборник задач может быть полезен и студентам других учебных заведений как пособие при упражнениях.

Для помощи при решении задач в книге приведены таблицы специальных функций и график (импеданс-диаграмма), при помощи которого возможно быстрое решение задач по распространению звука в слоистых системах по направлению нормали к слоям.

В конце книги приведен список вспомогательной литературы и ответы в виде алгебраических выражений и численных результатов.

Все задачи решаются в системе единиц СГС, наиболее принятой в акустике.

Автор будет весьма благодарен всем использующим сборник задач в своей работе за замечания и указание желательных добавлений или замеченных в тексте погрешностей.

I. Скорость звука. Интенсивность звука. Эффект Допплера

Литература [I, 2, 3].

I.I. Рассчитать звуковой барьер скорости самолета, когда скорость его равна скорости звука на высоте 9 км, где температура -70°С, и сравнить его со звуковым барьером при 0°С на уровне моря. Зависит ли барьер от атмосферного давления?

I.2. При какой температуре в градусах Цельсия скорость звука в газе удвоится по сравнению со скоростью при 0°С и при какой станет в два раза меньше?

I.3. Звуковая волна с уровнем интенсивности I47 дБ полностью поглощается при нормальном падении на плоский слой пористого вещества толщиной 5 см. Рассчитать, через сколько времени нагреется этот слой на I°, если его удельная теплоемкость 0,2 кал на градус.

I.4. Плоская звуковая волна в воздухе с частотой I000 Гц при температуре 0°С имеет уровень интенсивности I34 дБ над порогом $p_0 = 2 \cdot 10^{-4}$ дин/см^2. Вычислить амплитуды звукового давления, скорости и смещения частиц, а также амплитуду колебаний температуры в этой волне.

I.5. Уровень интенсивности звуковой волны при прохождении через перегородку ослабляется с 97 до 5I дБ. Рассчитать приближение, без использования таблиц логарифмов (зная лишь $\lg 2=0,3$), во сколько раз уменьшилось звуковое давление.

I.6. Определить показатель преломления звука (n) при переходе из водорода в углекислоту. Скорость звука подсчитать, зная молекулярный вес газов (m) и отношение теплоемкостей $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$, которое равно I,4 для двухатомных газов и I,3 для многоатомных.

I.7. Подсчитать фокусное расстояние (L) ультразвуковой двояковогнутой латунной линзы, находящейся в водной среде. Радиус кривизны вогнутых поверхностей линзы 50 см; линза при расчете считается тонкой. Скорость продольных звуковых волн в латуни $3,4 \cdot 10^5$ см/с и в воде $1,5 \cdot 10^5$ см/с.

I.8. Интенсивность звука в морской воде убывает вследствие поглощения на величину β дБ/км. Коэффициент поглощения $\beta = 0{,}036 f^{3/2}$, где f – частота, выражаемая в килогерцах. Определить, на каком расстоянии от источника сферическая волна уменьшается по амплитуде в 100 раз при частотах 10 и 100 кГц.

I.9. Из воздуха на поверхность воды падает вертикально звуковая волна с частотой 100 Гц и интенсивностью 97 дБ. Определить, какой уровень звукового давления будет регистрировать приемник, находящийся на глубине I см под поверхностью воды.

I.10. Скорость звука в воде в зависимости от температуры T в градусах Цельсия определяется формулой

$$C = 1450 + 4{,}6\,T \text{ (м/с)}.$$

Считая, что T с глубиной (H) падает по линейному закону с градиентом 0,5 град/м начиная с 20°C, определить радиус кривизны (R) звукового луча, выходящего горизонтально из точки, лежащей на глубине 5 м. Радиус кривизны определяется формулой $R=\frac{c}{g}$, где g – градиент скорости звука. Определить, на каком расстоянии (ℓ) звуковой луч отклонится книзу на 50 м.

I.II. Плоская звуковая волна падает по нормали из воздуха на границу со слоем углекислоты и частично отражается, частично проходит через нее. Определить коэффициент отражения (z_p) на границе, а также во сколько раз (t) отличается амплитуда прошедшей волны от амплитуды падающей. Определить отношение амплитуды звукового давления в максимумах и минимумах отраженной волны. Для воздуха $C = 3{,}4 \cdot 10^4$ см/с; $\rho c = 41$; для углекислоты $C = 2{,}6 \cdot 10^4$ см/с; $\rho c = 51$.

I.I2. Найти скорость (C') звука во взвеси воздушных пузырьков в воде при процентном содержании воздуха $\eta = 0{,}01$ считая, что во взвеси суммируются сжимаемости, а плотность при малом η близка к плотности воды.

Для воды модуль упругости $\varkappa_1 = 2{,}2 \cdot 10^{10}$ дн/см^2, для воздуха $\varkappa_2 = 1{,}43 \cdot 10^6$ дн/см^2.

I.13. Найти выражение для вектора интенсивности звука при суперпозиции двух плоских волн одинаковой частоты, имеющих интенсивности $\mathcal{J}_1$ и $\mathcal{J}_2$ и разность фаз φ, в случае одинакового направления обоих волн; противоположного направления волн.

I.14. Длинный товарный поезд идет со скоростью u м/с. Когда он подходит к тоннелю в отвесной вертикальной стене, машинист дает гудок с частотой f Гц. Звук гудка и его эхо слышат машинист и сторож, находящийся вблизи последнего вагона (на земле). Какой частоты звук гудка и его эха слышит каждый из них? Какой частоты (Δf) биения они услышат?

I.15. Самолет летит к вертикальной скале со скоростью, равной половине скорости звука $u=\frac{c}{2}$, и излучает короткие тональные отрывки (цуги) с частотой f = 1000 Гц. Какую частоту (f') имеет эхо-сигнал, отраженный от скалы?

I.16. Плоская волна, распространяющаяся в воздухе с частотой 1000 Гц, имеет амплитуду звукового давления $p_0 = 2.10^{-4}$ бар (порог слышимости). Определить амплитуду смещения (ξ_e) и амплитуду скорости (v_e) частиц среды. Тот же расчет сделать для уровня интенсивности в 160 дБ над порогом слышимости.

I.17. Определить вектор интенсивности звука $\mathcal{J}$ на линии, соединяющей два противофазных источника звука с круговой частотой ω, находящихся на расстоянии $2h$ друг от друга, в среде со скоростью звука C и плотностью ρ в функции расстояния z от средней точки прямой, соединяющей источники.

I.18. Два точечных источника, находящиеся в воздухе на расстоянии a см, синфазно излучают звук с частотой f Гц. Под каким углом (α) к линии, соединяющей источники, звук в дальнем поле будет на 6 дБ слабей, чем вдоль этой же, осевой, линии на том же расстоянии от средней точки между источниками?

I.19. Определить ослабление (n) звука частоты 1000Гц при прохождении по нормали через стальную пластину толщиной 2,54 см (I дюйм), разделяющую два резервуара с водой. (Плотность стали 7,1 г/см^3; скорость продольных волн в стали 6,1.10^5 см/с).

II. Звуковые волны в трубе постоянного сечения (длинноволновое приближение)

Литература [I, 2].

2.I. Возбуждающий звук поршень помещен у одного конца трубы ($x = 0$), наполненной воздухом ($c = 3{,}44 \cdot 10^4$ см/с, $\rho c = 42$), у которой площадь поперечного сечения равна I0 см^2, а второй поршень, механический импеданс которого надо определить, помещен у другого конца трубы ($x = 30$). Измерение давления звуковой волны показало, что максимальная амплитуда давления в точках $x = 3$; $x = 15$; $x = 27$ равна I0бар. Минимальная амплитуда давления, равная 6,57 бар, получилась в точках $x = 9$, $x = 21$. Найти из этих данных механический импеданс второго поршня (Z_ℓ), частоту звука (f) и амплитуду колебаний возбуждающего поршня (ξ_0).

2.2. Возбуждающий звук поршень помещен в одном конце трубы, длина которой 86 см, а площадь поперечного сечения I0 см^2. Второй конец трубы закрыт диафрагмой, механический импеданс которой ($R_\ell + jJ_\ell$) требуется определить. Импеданс в точке возбуждения (исключая импеданс поршня) имеет следующие значения:

f	I00	200	300	400	500	600	700	800
R	0	42	I47	420	I89	840	67	I260
J	-7I	I260	-365	0	I26	-840	76	I680

Какова действительная (R_ℓ) и мнимая (J_ℓ) части механического импеданса диафрагмы при тех же частотах? Нанести на кривую значения R_ℓ и J_ℓ в функции частоты (f). Принять $\rho c = 42$.

2.3. Безразмерный, удельный импеданс в некоторой точке (x) трубы при частоте f = 344 Гц равен $j = +\sqrt{-1}$.

При каком условии на границе возможен данный случай? Какая величина импеданса будет на расстояниях 25, 50, 75, I00 и I25 см от исходной точки? Скорость звука $3{,}44 \cdot 10^4$ см/с.

2.4. Два одинаковых поршня каждый с массой I0 г без трения колеблются в противоположных концах цилиндрической трубы длиной 34,4 см с площадью поперечного сечения 10 $см^2$. Один поршень приводится в движение силой $100\exp(j\omega t)$ дин. Скорость звука $C = 3{,}44.10^4$ см/с.

а) Нанести на график амплитуду смещения и амплитуду скорости другого поршня в функции частоты ($0 < f < 250$ Гц);

б) нанести на график амплитуду смещения и амплитуду скорости другого поршня в функции частоты (250 Гц $< f <$ 500Гц).

2.5. Поршень с ничтожным механическим импедансом вставлен в один конец цилиндрической трубы с поперечным сечением 10 $см^2$, заполненной воздухом ($C = 3{,}44.10^4$ см/с). Другой конец трубы отстоит на ℓ см от поршня и закрыт жесткой пластинкой. Поршень приводится в движение периодической силой

$$\mathcal{F} = 42\sin(8\pi t) - 28\sin(24\pi t) + 9{,}4\sin(40\pi t) \text{ дин}$$

а) Длина трубы $\ell = 34{,}4$ см. Вывести выражения для скорости (v) и смещения (a) поршня в функции t от $t = 0$ до $t = 1/2$;

б) длина трубы $\ell = 34{,}4$ см, другой конец трубы открыт. Вывести выражения для скорости и смещения поршня и нанести их на график.

2.6. Найти коэффициент отражения звука (r_p) от круглого отверстия радиуса $r_1 = 5$ см в боковой стенке бесконечной трубы диаметра $d = 2r_0 = 25$ см. Построить частотную характеристику коэффициента отражения в пределах от 100 до 5000 Гц. Импеданс отверстия вычислить по формуле

$$Z = \frac{\rho\omega^2\sigma^2}{4\pi C}; \quad \sigma = \pi r_0^2,$$

где $\rho = 1{,}2.10^{-3}$ г/см; $C = 3{,}44.10^4$ см/с.

Построить частотную характеристику коэффициента отражения в пределах $100 < f < 5000$ Гц.

2.7. Рассчитать основную резонансную частоту трубы длиной $\ell = 2$ м и диаметром $2r_0 = 3{,}0$ см, закрытой с одной стороны, заполненной воздухом и закрытой с другой стороны резиновой пленкой толщины 0,2 мм с массой на единицу площади $\rho_1 = 2{,}2.10^{-2}$, имеющей собственную частоту в отсутствие трубы 250 Гц.

2.8. На конце трубы сечения $S = 100$ $см^2$, заполненной воздухом ($C = 3{,}44.10^4$ см/с), стоит возбуждающий звук поршень с импедансом $Z=R+jJ$, где $R=4200$ мех.ом, $J=-4200$ мех.ом при частоте 344 Гц. Рассчитать импеданс при той же частоте в точках на расстоянии $x=25$, 50, 75 и 100 см от конца трубы исходя из теоретических формул.

2.9. Показать, что при наличии небольшого, чисто реактивного, удельного, безразмерного импеданса jJ в конце трубы и твердой стенки в ее начале резонансная частота (f') по сравнению с резонансной частотой закрытой с обоих концов трубы ($f_0=\frac{c}{2l}$) увеличивается при $J_1>0$ и уменьшается при $J_1<0$.

2.10. Амплитуда звукового давления в различных точках (x) отрезка трубы (длины l), возбуждаемой в начале силой $\Psi=\Psi_0 \cos\omega t$ и замкнутой на начальный и конечный поршни с импедансом Z_0 и Z_l , выражается формулой

$$p(x)=A\sqrt{1+r^2-2r\cos 2[k(x-l)+\delta]},$$

где r и 2δ - модуль и фаза коэффициента отражения в конце трубы, $k=\frac{\omega}{c}$ и A - постоянная величина, не зависящая от x и t .

Показать, по каким формулам величины r , δ и A , а также p_{max} и p_{min}, в стоячей волне могут быть определены, если измерены звуковые давления в трех точках трубы (p_1 ; p_2 и p_3) с координатами x_1; x_2 и x_3.

2.11. В бесконечной трубе поставлено на расстоянии l друг от друга большое число слоев с удельным сопротивлением R_1 . Найти коэффициенты отражения r_1 и r_2 на входе первого слоя при таких частотах f_1 и f_2 , когда $k_1 l=n\pi$ и $k_2 l=(n+\frac{1}{2})\pi$ и показать, что в первом случае при $R_1\ll 1$ будет $r_1\approx 1$, а во втором - $r_2\approx\frac{R_1}{4}\ll 1$.

Ш. Нормальные волны в волноводах с жесткими стенками

Литература [I, 3].

В данном разделе рассматриваются волноводы, заполненные воздухом.

3.I. Найти граничные частоты возникновения волновых мод (m, n) при $m, n < 3$ в бесконечной трубе прямоугольного сечения со сторонами a = I0 см, b = I5 см.

3.2. Найти граничные частоты возникновения волновых мод (m, n) при $m, n < 3$ в бесконечной круглой трубе радиуса r_0 = I0 см.

3.3. Исследовать дальнее звуковое поле в бесконечной прямоугольной трубе сечения $a \times b$ ($a > b$), в начальном сечении которой на площади $a_1 \times b_1$, расположенной в центре, колеблется поршень со скоростью $u = u_0 exp(j\omega t)$, где $\omega = 2\pi f$. Задается: a = I7 см; b = 8,5 см; $\frac{a_1}{b_1} = \frac{b_1}{b} = \frac{1}{4}$, a, a_1 лежат вдоль оси x ; b, b_1 - вдоль оси y . Поле исследовать на частотах f_1 = 500 Гц и f_2 = 2I00 Гц.

3.4. Найти звуковое поле в бесконечной прямоугольной трубе сечения $a \times b$ ($a > b$), в начальном сечении которой на площади щели длиной a и шириной d , расположенной у края площади $a \times b$, задана скорость $u = u_0 exp(j\omega t)$.

Вычислить вектор плотности потока мощности по оси трубы на частоте $f < \frac{c}{2a}$.

3.5. В круглой бесконечной трубе радиуса r_0 = 6 см задана скорость $u = u_0 exp(j\omega t)$ в начальном сечении (z =0) на площади коаксиального круга радиуса r_1 = 2 см.

Определить частоты первых трех критических частот f_1; f_2; f_3. Исследовать звуковое поле на оси трубы (ось z) при частотах $f' = f_1 (I - 5 \cdot I0^{-4})$ и $f'' = f_1 (I + 5 \cdot I0^{-4})$. На какой из двух частот I-я мода будет бегущей волной и во сколько раз (N) ее амплитуда превысит амплитуду 0-й моды; какова будет ее скорость c' ? На каком расстоянии z_1 от начала затухающая I-я мода ослабеет в e раз?

3.6. Вычислить в функции частоты среднюю плотность потока звуковой энергии для отдельной волновой моды в бесконечной по длине прямоугольной трубе сечения $a \times b$ при заданной в начальном сечении ($z = 0$) скорости $u = u_0 \cos\frac{2\pi}{\Lambda}x \cdot \cos\omega t$, где $\Lambda = \frac{2\pi}{m}$; $m = 1, 2, 3, \ldots$; сторона a расположена по оси x ; сторона b – по оси y .

3.7. Найти выражение для звукового поля в квадратной бесконечной по длине трубе (сторона квадрата a), в центре начального сечения которой ($z = 0$) колеблется квадратный поршень (со стороной a_1), колеблющийся с амплитудой скорости u_0 и угловой частотой ω .

3.8. Вывести выражение коэффициентов разложения потенциала скорости звука по характеристическим функциям для бесконечной прямоугольной трубы сечением $a \times b$ для произвольно заданного распределения скоростей $\Psi_0(x,y)\exp(j\omega t)$ в начальном сечении трубы ($z = 0$).

3.9. Исследовать звуковое поле в бесконечной круглой цилиндрической трубе радиуса $r_0 = 10$ см, если в начальном сечении ($z = 0$) задано распределение скоростей по закону

$$u = u_0 J_0(\nu_n r)\exp(j\omega t),$$

где ($\nu_n r$) n-й корень уравнения $J_0'(\nu_n r) = 0$. Определить амплитуду звукового давления на оси трубы ($r=0$) при частоте в два раза выше $\omega = \nu_1 c$. Будет ли возбуждаться в трубе плоская волна?

3.10. Определить присоединенную массу прямоугольного отверстия, расположенного в центре квадратной трубы путем вычисления суммарной кинетической энергии $T = \frac{1}{2}Mu_e^2$ всех неволновых мод, возникающих при постоянной амплитуде осевой колебательной скорости $u = u_0\exp(j\omega t)$, задаваемой в зоне отверстия.

3.11. Вывести формулу для кинетической энергии звуковых волн в объеме бесконечной по длине круглой цилиндрической трубы (радиуса r_0), в начальном сечении которой колеблется (вдоль оси трубы по закону $u = u_0\exp(j\omega t)$) круглый, коаксиальный с трубой, поршень радиуса r_1 . Предполагается, что волновое число k намного меньше первого собственного волнового числа ν_{01} .

Написать выражение присоединенной массы поршня. Необходимые формулы для расчета:

$$\int_0^{r_0} J_0(\nu_{0n} r) J_0(\nu_{0m} r)\, r\,dr = \frac{r_0^2}{2} J_0^2(\nu_{0n} r_0) \qquad [\text{при } m=n];$$

$$\int_0^{r_0} J_1(\nu_{0n} r) J_1(\nu_{0m} r)\, r\,dr$$ имеет те же значения.

3.12. Вывести выражения для коэффициентов A_{pn} и B_{pn} разложения звукового поля в бесконечной круглой трубе радиуса r_0 в ряд по бесселевым функциям:

$$\Phi(r,z,\varphi) = \sum_{p=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} (A_{pn} \cos p\varphi + B_{pn} \sin p\varphi) J_0(\nu_{pn} r) \exp\left(-j\sqrt{k^2 - \nu_{pn}^2}\, z\right)$$

при заданном в начальном сечении (z = 0) распределении колебательной скорости (по оси z) по закону $u = \Psi_0(r,\varphi)\exp(j\omega t)$ (формулы для справок: литература [6] и в задаче 3.II).

3.13. Определить звуковое поле в бесконечной круглой цилиндрической трубе радиуса r_0 и длины ℓ , если в начальном сечении (z = 0) задано поршневое движение с амплитудой скорости u_0 и частотой ω на площади коаксиального с осью трубы (z) круга радиуса r_1 . Найти присоединенную массу поршня в длинноволновом приближении.

3.14. Вычислить присоединенную массу круглого центрального отверстия радиуса r_1 в перегородке, стоящей перпендикулярно к оси (z) круглой бесконечной (в обе стороны) трубы радиуса r_0 (для случая частот, меньших первой критической частоты ($\omega < \nu_{01} c$)), в функции отношения $\xi = \frac{r_1}{r_0}$ =0,25; 0,4 и 0,6.

3.15. В бесконечной круглой трубе (радиус r_0) колеблется коаксиальный круглый поршень (радиус r_1) со скоростью $u = u_0 \exp(j\omega t)$. Определить звуковое поле в трубе и найти выражение для суммарной кинетической энергии неволнового поля в приближении длинных волн ($kr_0 \ll 1$). Найти выражение для присоединенной массы поршня.

3.16. Определить звуковое поле в бесконечной прямоугольной трубе сечения $a \times b$, в начальном сечении которой ($z = 0$) на площади $a_1 \times b_1$, расположенной в углу прямоугольника $a \times b$, задана скорость колебаний $u = u_0 \exp(j\omega t)$ вдоль оси трубы (z). Определить интенсивность звука (J) на частотах ниже первой критической частоты при следующих данных: $a = 5$ см; $b = 10$ см; $a_1 = 2$ см; $b_1 = 4$ см.

3.17. Определить присоединенную массу (M) круглого отверстия радиуса r_0 в перегородке бесконечной квадратной трубы (со стороной a) в функции от отношения $\xi = \frac{r_0}{a}$.

IУ. Звукопоглощающие системы (в воздушной среде)

Литература [1].

Присоединенная масса отверстия площади S в перегородке, стоящей поперек трубы, и имеющей площадь S_0, равна:

$$\mathcal{M} = \frac{\rho\sqrt{\pi}\,S^{3/2}}{2F(S/S_0)}\;,\quad \text{где}\quad F(S/S_0) = \left[1 - 1{,}47\left(\frac{S}{S_0}\right)^{\frac{1}{2}} + 0{,}47\frac{S}{S_0}\right]^{-1} \text{— функция Фока.}$$

4.I. Определить при помощи импеданс-диаграммы коэффициент поглощения звука системой, состоящей из пяти слоев пористого материала с активным удельным импедансом $R_1 = 2\rho c$, стоящих на расстоянии $\ell = 25$ см друг от друга перед твердой стенкой (последний слой отстоит от твердой стенки также на 25 см). Расчет произвести на частотах $f = 680$ и 340 Гц.

4.2. Пользуясь импеданс-диаграммой, рассчитать коэффициент поглощения звука трехслойной системой, стоящей перед твердой стенкой, при нормальном падении звука.

Расстояние первого слоя от стены $\ell_1 = 20$ см, удельное сопротивление $R_{11} = 5\rho c$; расстояние второго слоя от первого $\ell_2 = 10$ см, удельное сопротивление $R_{12} = 2\rho c$; расстояние третьего слоя от второго $\ell_3 = 5$ см, удельное сопротивление $R_{13} = 0{,}5\rho c$. Расчет сделать для частот 100, 500 и 2000 Гц.

4.3. Определить коэффициент поглощения звука, распространяющегося в круглой трубе на частотах 500, 1000 и 2000 Гц, если на расстоянии $\ell_1 = 1{,}7$ см от конца трубы, закрытого жесткой стенкой, помещена первая жесткая перегородка с отверстием посередине диаметра $d = 0{,}4$ см, закрытым поглощающим материалом с удельным сопротивлением $R_1 = 12$ мех.ом на см^2. На расстоянии $\ell_2 = 3{,}4$ см от первой перегородки помещена вторая жесткая перегородка с теми же величинами d и R; на расстоянии $\ell_3 = 17$ см от второй перегородки помещена третья такая же перегородка. Площадь сечения трубы $S_0 = 1$ см^2.

4.4. Коэффициент отражения волны давления на конце трубы выражается следующим образом:

$$r_p = e^{-j(\varepsilon - j\delta)} = \frac{R_1 - 1 + jY_1}{R_1 + 1 + jY_1} = r e^{j2\delta},$$

где R_1 и Y_1 – безразмерные активное и реактивное сопротивления на конце трубы; $r = e^{-j2\varepsilon}$; 2δ – фаза коэффициента отражения. Показать, что на плоскости комплексного переменного (R_1, Y_1) кривые равного поглощения ($\alpha = 1 - r^2$), ($\varepsilon = Const$) и равной фазы ($\delta = Const$) при отражении на конце представляют семейство окружностей. Найти уравнения этих окружностей.

4.5. I) Расчитать толщину слоя (ℓ), диаметр отверстий (d), расстояние (a) между ними для однослойного резонансного звукопоглотителя с жесткой передней стенкой и с отверстиями по квадратной решетке при задании получить $\alpha > 0,5$ в интервале частот 55–240 Гц. Материал в отверстиях имеет удельное сопротивление R_1 = I мех.ом/см^2.

2) Задача аналогичная (I), но материал, закрывающий отверстия, имеет сопротивление R_1 = 4 мех.ом/см^2.

3) Задача аналогичная (I). Поглотитель расчитывается на интервал частот 45–55 Гц при $\alpha > 0,9$; сопротивление материала в отверстиях R_1 = I мех.ом/см^2 (см. [I, стр. I89]).

4.6. Определить зависимость от частоты коэффициента поглощения звука (α) при нормальном падении на резонансный поглотитель с жесткой тонкой передней стенкой с квадратными ячейками со стороной 4 см, глубиной I0 см и диаметром отверстия 2 см, которое закрыто пористым материалом с удельным сопротивлением 5 мех.ом/см^2.

4.7. Рассчитать по приближенным формулам [I, стр. I89] геометрические размеры резонансного звукопоглотителя, глубину резонансного слоя (ℓ) и диаметр (d) круглых отверстий, расположенных по квадратной решетке на расстоянии (a) друг от друга, чтобы обеспечить коэффициент поглощения звука $\alpha > 0,8$ в диапазоне 200–800 Гц. Сопротивление в отверстиях принять равным I мех.ом, а толщину листа, в котором сделаны отверстия резонаторов, принять равной 0,3 см.

4.8. Найти модуль и фазу коэффициента отражения звука (при нормальном падении звука) частоты f от твердой поверхности, на которой по квадратной решетке с шагом "а" расположены круглые каналы глубины ℓ и площади S. Определить модуль и фазу коэффициента отражения в диапазоне частот до 10 000 Гц в функции $k\ell=\frac{\omega}{c}\ell$, приняв $S_0=a^2=16$ см^2; $S=4$ см^2; $\ell=5$ см.

4.9. Найти модуль и фазу коэффициента отражения звука частоты f при нормальном падении на твердую поверхность, на которой по квадратной решетке с шагом a и площадью ячеек Σ расположены каналы глубины ℓ и площади $\sigma=\pi\frac{d^2}{4}$, причем на входе в каналы сосредоточен пористый материал с удельным сопротивлением $R_1=1$ мех.ом/см^2. Принять $a=4$ см, $\sigma=4$ см^2, $\ell=5$ см, построить график модуля и фазы коэффициента отражения звука в функции $k\ell=\frac{\omega}{c}\ell$ в диапазоне частот до 10 000 Гц.

4.10. Рассчитать по приближенным формулам [1, стр.189] резонансный звукопоглотитель с глубиной резонансного слоя ℓ, диаметром круглых отверстий d, расположенных по квадратной решетке с взаимным расстоянием a, который обеспечивает коэффициент поглощения $\alpha>0{,}98$ в диапазоне частот от 100 до 120 Гц. Толщина листа с отверстиями $b=0{,}5$ см.

4.11. Найти модуль r и фазу 2δ коэффициента отражения от слоя жидкости толщины ℓ, налитого на жесткую поверхность, при падении звука под углом α к нормали. Построить график модуля и фазы коэффициента отражения для случая, когда жидкостью является вода, слой имеет глубину $\ell=30$ см, угол падения равен 0,1 рад и частота меняется от 0 до 10 кГц.

4.12. В некоторой точке трубы удельный импеданс $Z_1=R_1+jJ_1$, где $R_1=42$ мех.ом/см^2 и $J_1=-42$ мех.ом/см^2 на частоте $f=344$ Гц. Считая, что при 18°С скорость звука равна 344 м/с и $\rho c=42$ мех.ом/см^2, определить удельный импеданс в точках на расстояниях 25; 50; 75 и 100 см от начальной.

4.13. Труба площадью $S_1=\frac{\pi D_1^2}{4}$ скачкообразно переходит в точке с координатой $x=\ell$ в бесконечную трубу сечения $S_2=\frac{\pi D_2^2}{4}=\frac{S_1}{4}$. На сколько децибел ΔL слабей звук, отраженный от переходного сечения, по сравнению с падающим?

У. Сложные звукопроводы. Фильтры: Рупоры. Резонаторы

Литература [I, 2, 5]. Вспомогательные формулы см. в разделе IУ.

5.I. Рассчитать многоячейчатый фильтр низких частот с граничной частотой $f_{гр}$ = 20 Гц для канала сечением S =30см^2 при условии низкочастотного приближения теории. Определить возможные значения сечения (Σ) и длины (L) камер расширения, вставляемых между отрезками канала S, имеющими длину (ℓ). Определить, на какой частоте f' выше $f_{гр}$ затухание составит IO дБ на I ячейку.

5.2. Фильтр низкой частоты представляет канал с периодически меняющимся сечением. Камеры расширения имеют сечение Σ и длину L, соединительные патрубки в перегородках имеют сечение S и длину ℓ. Задаются размеры L = I00 см; ℓ = 25 см; S = 30 х 30 см^2; Σ = I00 х I00 см^2. Определить, на сколько децибел A ослабнут волны частоты f'= I,0I$f_{гр}$ после прохождения 20 ячеек фильтра. Определить фазовую скорость волн (C') при частоте 20 Гц.

5.3. Фильтр высокой частоты представляет собой трубу диаметром D = 50 см. В боковой поверхности трубы имеются отверстия диаметра d = I0 см, центры которых расположены вдоль длины трубы на расстоянии L = 20 см друг от друга; в отверстия заделаны трубки длиной ℓ = I0 см.

Вычислить сдвиг фазы $\Delta\varphi$ для звука с частотой $f=2f_{гр}$, получающийся в результате прохождения фильтра длиной 4 м.

5.4. Глушитель мотора представляет собой цилиндрическую трубу диаметра D = 2 см. В боковой поверхности трубы вдоль ее длины расположены отверстия диаметра d = I см, центры которых находятся на расстоянии L = 8 см друг от друга; в отверстия заделаны трубки длины ℓ = 2 см. Определить граничную частоту $f_{гр}$.

Во сколько раз (N) и на сколько децибел (A) уменьшится амплитуда для частоты f = 0,98$f_{гр}$, если длина глушителя 40 см.

5.5. Труба площадью сечения $S_0 = \pi R^2$ скачкообразно переходит в бесконечную трубу сечения $S = \frac{S_0}{m} = \pi r_0^2$, где

$m > 1$. Определить, учитывая присоединенную массу, на сколько децибел (ΔL) отраженный от переходного сечения звук будет слабей падающего, если принять $m = 4$; $kr_0 = 4/\pi$. Присоединенная масса на переходном сечении $M = \frac{\rho S^2}{4 r_0 F(S/S_0)}$.

5.6. Рассчитать в функции частоты коэффициент отражения (r) и коэффициент ослабления звука (A) (в децибелах) при прохождении через бесконечную квадратную трубу сечением 25см^2, если в стенке трубы имеется сбоку отверстие диаметром 2 см, за которым присоединен объем 200 см^3.

5.7. Рупорный громкоговоритель возбуждается поршнем площадью $S = 100\pi$ см^2. Объем перед поршнем через плоскую предрупорную камеру малой длины соединяется с рупором экспоненциальной формы (бесконечным), устье которого имеет площадь $\sigma = 4\pi$ см^2.

Определить коэффициент расширения β и выходной диаметр D рупора длиной 150 см при условии, что на частоте 100 Гц его сопротивление излучения составляет 0,8 от предельного (высокочастотного). Рассчитать, какую амплитуду a_0 должен иметь поршень для получения мощности 10 вт на частоте 100 Гц.

5.8. Определить частотную зависимость коэффициента отражения звука (r_p) по амплитуде и фазе на конце круглой трубы сечения $S_0 = \pi R_0^2 = 20$ см^2, если в твердой тонкой перегородке на конце трубы имеется отверстие площадью $S = \pi r_0^2$; $r_0 = 1$ см, за которым лежит закрытый отрезок такой же трубы длиной $L = 10$ см (резонатор). Трение в отверстии не учитывается. Функцию Фока рассчитать по формуле раздела IV.

5.9. Рассчитать фильтр низких частот, включаемый в волновод (трубку) диаметром $d = 1$ см так, чтобы его граничная частота $f_{гр}$ была равна 500 Гц. Определить затухание A в децибелах на одну ячейку фильтра при $f = 2f_{гр}$.

Рассчитать, какая задержка по времени (τ) получится на одну ячейку фильтра и какая будет фазовая скорость (c') звука в фильтре.

5.10. Бесконечная фильтровая цепочка состоит из круглой трубы диаметром $D = 10$ см с жесткими тонкими перегородками, стоящими на расстоянии L = 10 см друг от друга и имеющими в центре круглые отверстия диаметром $d = 2$ см. Определить частотную характеристику фильтра и нанести ее на график.

5.11. Рассчитать собственную частоту воздушного резонатора в форме колбы с горлом длиной ℓ = 10 см, диаметром $2r_0$ = 4 см и сферической полостью объема V диаметром $2R$ = 20 см. Расчет провести в длинноволновом приближении.

5.12. Рассчитать собственную частоту и добротность (Q) воздушного резонатора в форме прямоугольного параллелепипеда с ребрами $a = b$ = 100 см и h = 80 см (высота) с круглым отверстием в центре верхней грани (a,b) с площадью S = 200 см^2, проводимость отверстия принять равной (приближенно) его диаметру. Потери на излучение рассчитать по формуле для пульсирующего в свободном пространстве сферического излучателя с площадью S; трение в горле не учитывается.

5.13. Рассчитать собственную частоту и добротность (Q) воздушного резонатора в форме прямоугольного параллелепипеда с ребрами $a = b$ = 80 см и h = 60 см (высота) с круглым отверстием в центре верхней грани (a,b) с площадью $S = \pi r_0^2$ = 150 см^2, к которому примыкает открытая трубка того же диаметра длиной 15 см с открытым концом. Проводимость трубки (K) рассчитать с поправкой на концы; трение в горле не учитывается. Сопротивление излучения рассчитывается по формуле $R = \frac{\rho\omega^2 S^2}{4\pi c}$; проводимость для отверстия на конце трубки с фланцем равна $K = 4r_0$, для отверстия без фланца $K \approx 5r_0$.

5.14. Определить собственную частоту резонансной системы, состоящей из закрытого снизу цилиндрического объема высотой h = 10 см и диаметром D = 40 см, закрытого с верхней стороны стальной пластинкой толщиной a = 0,05 см (заделанной по краю) и имеющей экран (фланец) большого размера. Эквивалентные параметры пластинки вычислить приближенно, исходя из резонансной частоты круглой пластинки в отсутствие упругого объема.

Определить амплитуду колебаний в центре пластинки при воздействии звуковой волны с частотой f = 600 Гц и уровнем интенсивности 100 дБ, падающей по оси цилиндра сверху вниз.

5.15. Рассчитать собственную частоту f_0 резонатора, состоящего из двух равных объемов по 1000 см^3, соединенных трубкой длиной 5 см и диаметром 2 см. Трубку рассматривать как сосредоточенную систему, учтя присоединенную массу с обоих концов по формуле для отверстия в бесконечной стенке (см. разд. IV).

Рассчитать добротность резонатора Q, если в трубку заложен пористый материал с удельным сопротивлением I мех.ом.

5.16. Определить резонансную частоту f_0 барабана диаметром 80 см и глубиной 50 см, закрытого мембраной толщиной 0,I см, сделанной из материала с плотностью I,8 и натянутой с силой 2 х I0^6 дин на см. Определить амплитуду колебаний a_0 в центре мембраны при воздействии звуковой волны с частотой I00 Гц и уровнем интенсивности 97 дБ, падающей на мембрану по нормали к ее поверхности.

5.17. Определить резонансную частоту f_0 стальной "мембраны" телефона, имеющей диаметр $2r_0 = 5$ см, толщину $d = 0{,}04$ см и зажатой по краю, считая объем полости под мембраной равным $V = 30$ см^3.

5.18. Найти радиусы (r_1) сферических резонаторов типа Гельмгольца и радиусы (r_0) круглых отверстий в их сферической оболочке при собственных частотах I00; 200; 400 и 800 Гц, если добротность всех резонаторов одинакова $Q = 100$. Проводимость отверстий резонаторов считать равной их диаметру. Сопротивление излучения отверстия рассчитать по формуле для пульсирующего излучателя в свободном пространстве при $kr_1 \ll 1$.

5.19. Как изменится резонансная частота воздушных полостей голосового аппарата, если вместо воздуха эти полости будут наполнены гелием. Возможно ли определить в атмосфере гелия произношение гласных "у" и "и", формантные частоты которых в воздухе равны для "у" 500 и 900 Гц и соответственно для "и" 500 и 2000 Гц? Скорость звука в гелии вычислить, зная его молекулярный вес и отношение удельных теплоемкостей.

5.20. Резонатор Гельмгольца имеет собственную частоту 500 Гц при температуре 20^0. Какова будет собственная частота этого резонатора, если он наполнен воздухом при температуре 200^0 или -I70^0?

5.21. Определить резонансную частоту f' воздушного пузырька в воде, имеющего радиус I см и заполненного определенной массой воздуха при атмосферном давлении, если он будет погружаться на глубину I0 км? Будет ли влиять на резонансную частоту данного пузырька сила поверхностного натяжения?

5.22. Определить основную резонансную частоту закрытой трубы длиной L = 20 см с сечением 8 см^2, в боковой стенке которой, на расстоянии ℓ = I0 см от конца присоединен резонатор объема V = I0 см^3 с входным отверстием площадью σ = 0,5 см^2.

VI. Излучение и рассеяние звука сферой и цилиндром

Литература [I, 2], таблицы I-5.

6.I. Определить интенсивность ($\mathcal{J}$) рассеянного жесткой сферой звука в функции полярного угла ϑ при значениях волнового параметра $kr_0 = 3{,}2$. Расчет диаграммы проводится через угловой интервал $\Delta\vartheta = 10^0$. Начертить диаграмму направленности.

6.2. Точечный источник с производительностью $A_0 = u_0 \Delta S$, расположенный на полюсе жесткой сферы, излучает в воду звук с частотой 10 кГц; радиус сферы соответствует условию $kr_0 = 2{,}4$. Суммарная излучаемая мощность равна 5×10^{-3} Вт. Определить интенсивность звука $\mathcal{J}$ в направлении полярной оси на расстоянии 100 м от центра сферы и выразить ее в децибелах относительно нулевого уровня давления $p_0 = 2 \times 10^{-4}$ бар(эфф.)

6.3. Вывести выражения для коэффициентов ($u_{m0}; u_{m\nu}; u'_{m\nu}$) разложения в ряд по сферическим функциям потенциала скоростей для излучения звука сферой (радиус r_0), на поверхности которой задано распределение скоростей $u(\vartheta,\psi) \exp(j\omega t)$, в зависимости от полярного и азимутального углов. Изложить весь ход вывода коэффициентов с объяснениями (см. [I, стр.214]).

6.4. Поверхность сферы радиуса $r_0 = 2$ см колеблется с радиальной составляющей

$$u = \frac{u_0}{4}(3\cos 2\vartheta + 1)\exp(j\omega t).$$

Определить интенсивность излучения $\mathcal{J}$ в функции угла ϑ при $kr_0 = 0{,}5$ и полную излучаемую мощность Π, предполагая $\lambda \gg r_0$ и r.

6.5. Поршень радиуса 10 см вставлен в поверхность сферы радиуса 20 см. Радиальная скорость на поршне $10\exp(j\omega t)$ см/с. Найти полную излучаемую мощность звука Π в функции частоты в диапазоне $6 < f < 1000$ Гц. Начертить полярную диаграмму интенсивности звука при волновых параметрах 0,6 ($f = 164$ Гц) и 1,8 ($f = 488$ Гц).

6.6. Найти выражение для характеристики направленности $\mathcal{J}(\vartheta)$ излучения звука в вертикальной плоскости (по интенсивности) полоской малой угловой ширины $\Delta\vartheta = 1^0$, опоясывающей сферу по экватору ($\vartheta = 90^0$) и колеблющейся со скоростью $u_0 exp(j\omega t)$ (производительностью $A_0 = 2\pi r_0 \Delta\vartheta$) по нормали к поверхности сферы при ($kr_0 = 0,5$). Начертить характеристику направленности $\Psi(\vartheta)$.

6.7. Определить, во сколько раз (N) мощность излучения точечного источника, расположенного на полюсе сферы при значении $kr_0 = 3$, отличается от мощности такого же источника при $kr_0 = 4$.

6.8. Определить, во сколько раз (N) отличается мощность, излучаемая двумя противофазными точечными источниками с одинаковой производительностью, расположенными на полюсах сферы при $kr_0 = 3$, от мощности, излучаемой такими же источниками при $kr_0 = 2$.

6.9. Определить интенсивность и начертить диаграмму направленности тонкого (шириной $\Delta\vartheta$) излучающего звук пояса, расположенного по экватору сферы, радиуса r_0 , колеблющегося по закону $A = A_1 \cos 2\psi \cdot exp(j\omega t)$ (где ψ - азимут). Волновой параметр kr_0 считать весьма малым.

6.10. Какую силу F надо приложить, чтобы жесткий (невесомый) баллон диаметром $2r_0 = d = 20$ см совершал колебания в воде с амплитудой $a_0 = 5$ см и частотой $f = 10$ Гц.

6.11. Вывести выражение для диаграммы направленности линейного источника, расположенного по образующей бесконечного цилиндра радиуса r_0 при азимуте $\psi = 0$, колеблющегося по нормали к поверхности цилиндра со скоростью $u = u_0 exp(j\omega t)$ и, приняв $kr_0 = \frac{\omega}{c} r_0 = 1$, определить отношение интенсивности $J(0)$ в дальнем поле по направлению $\psi = 0$ к интенсивности $J(180^0)$ при азимуте $\psi = 180^0$.

6.12. Вывести выражение для диаграммы направленности (в дальней зоне) бесконечно длинной плоской полоски ширины "а", колеблющейся в воде с колебательной скоростью $u = u_0 exp(j\omega t)$ по нормали к плоскости бесконечного плоского экрана, плоскость которого совпадает с плоскостью полоски. Вычислить, при каких частотах будут иметь место значения $ka = 6, 10, 20$, если $a = 20$ см и при каких углах с нормалью к плоскости пластинки φ_n интенсивность звука будет равна нулю и максимуму φ_n' для этих трех случаев.

6.13. Определить круговую частоту ω_0 собственных радиальных колебаний воздушного пузырька радиуса r_0 в воде при атмосферном давлении исходя из величины упругости его объема и колеблющейся массы (которая практически равна присоединенной массе воды).

Зная сопротивление излучения пульсирующей сферы, определить добротность колебательной системы пузырька (Q).

УП. Поршневой излучатель. Обнаружение эхо-сигнала

Литература [I, 2, 7].

При решении задач этого параграфа необходимы следующие сведения:

а) интенсивность звука на оси гидроакустического поршневого излучателя мощности Π (с радиусом r_0) с экраном, имеющего коэффициент концентрации γ, равна на расстоянии r от центра поршня

$$\mathcal{J} = \frac{\Pi}{4\pi r^2} e^{-\frac{\beta r}{10}},$$

где β - коэффициент затухания звука.

Звуковое давление в воде равно

$$P_e = \sqrt{\frac{\Pi \gamma \rho c}{4\pi r^2}} = 3{,}46 \frac{\sqrt{\Pi_{вт}}}{r_{км}} (k r_0) 10^{-\frac{\beta r}{10}};$$

б) коэффициент затухания в морской воде (в дБ на км) в функции частоты f (кГц) определяется эмпирической формулой

$$\beta = 0{,}036 f^{\frac{3}{2}} \frac{дБ}{км};$$

в) интенсивность эхо-сигнала от сферы радиуса R, находящейся на расстоянии r, при локации в море поршневым излучателем (с экраном) мощности Π с коэффициентом концентрации γ, равна

$$\mathcal{J} = \frac{\Pi \gamma}{4\pi r^2} \frac{\left(\frac{R}{2}\right)^2}{r^2} 10^{-\frac{2\beta r}{10}};$$

г) интенсивность эхо-сигнала бесконечного цилиндра радиуса R при тех же условиях, как и для сферы

$$\mathcal{J} = \frac{\Pi \gamma}{4\pi r^2} \frac{\left(\frac{R}{2}\right)}{r} 10^{-\frac{2\beta r}{10}};$$

д) обнаружение эхо-сигнала приемником, реагирующим на эфф звуковое давление не меньше P_0, возможно при условии

$$\mathcal{J} > \frac{P_0^2}{\rho c}.$$

7.1. Круглая поршневая диафрагма диаметром 30 см $= 2r_0$ (с большим фланцем) излучает в воду на частоте 30 кГц звуковую мощность 10 Вт.

а) Определить (пренебрегая затуханием звука), на каком предельном расстоянии можно обнаружить звук при помощи приемника с чувствительностью 1 бар.эфф (сопротивление излучения диафрагмы считать равным $R \approx S\rho c$, где $S = \pi r_0^2$);

б) определить, по каким направлениям θ_n излучение звука будет отсутствовать;

в) определить предельную дальность по направлению первого бокового лепестка θ' диафрагмы направленности.

7.2. Круглая поршневая диафрагма диаметром 30 см (с большим фланцем) излучает в воду на частоте 30 кГц звуковую мощность Π = 10 Вт. Определить, на каком предельном расстоянии можно обнаружить звук приемником с чувствительностью 1 бар.эфф., учтя затухание звука в море (сопротивление излучения диафрагмы считать равным $R = S\rho c$, где $S = \pi r_0^2$).

7.3. Точечный излучатель с производительностью (силой) $Q_{эфф}$ излучает звук с частотой f в морской воде.

Определить эффективную амплитуду звукового давления p_e на расстоянии r (км), учтя коэффициент затухания в морской воде.

Задачу решить для трех различных заданий:

кГц	км	см^3/с
10	6	24
20	2	4
30	1	1,33

7.4. При излучении точечного источника с производительностью Q_0 при частоте f = 30 кГц на расстоянии r = 1 км амплитуда звукового давления равна 0,1 бара.

Определить производительность (силу) источника Q_0, учитывая коэффициент затухания звука в морской воде.

7.5. Рассчитать звуковое давление на горизонтальной оси поршневой диафрагмы радиуса R = 15 см, колеблющейся (в бесконечном экране) в морской воде с амплитудой $a_0 = 10^{-6}$ см при частоте 30 кГц на расстоянии r = I км и 2 км, учитывая коэффициент затухания β в зависимости от частоты.

7.6. Гидролокатор с поршневым излучателем (диаметр $2r_0$ = I0 см) излучает при частоте 50 кГц мощность I0 Вт в горизонтальном направлении.

а) Определить, на каком расстоянии может быть принят эхо-сигнал от сферы диаметра 5 м с учетом затухания в морской воде, если минимальное давление, регистрируемое системой, равно I бар,эфф.

б) Определить то же расстояние для частоты f = 25 кГц.

7.7. Поршневой излучатель радиуса r_0 = 4,5 см с экраном (с горизонтальной осью) излучает под водой (на глубине h = I0 м) звуковую мощность Π на частоте f = I00 кГц и должен лоцировать сферу радиуса R = 40 см, находящуюся на той же глубине на расстоянии r_1 = I40 м при условии, что прямой луч закрыт круглым экраном (радиуса b = 0,5 м), поставленным перпендикулярно к оси на расстоянии a = 4 м от центра поршня.

а) Выяснить, возможно ли осуществить гидролокацию в таких условиях и, если возможно, на каком предельном расстоянии?

б) Какова минимальная мощность излучателя для осуществления локации на боковом луче диафрагмы с учетом затухания в морской воде, если риемник регистрирует минимальное давление p_0 бар.эфф.?

7.8. Определить минимальную мощность поршневого гидроакустического излучателя с радиусом I5 см (с экраном) для осуществления на частоте 30 кГц и на первом боковом лепестке диаграммы направленности локации сферы радиуса 20 м, находящейся в море на расстоянии I км, если приемник, находящийся рядом с излучателем, может принять сигнал со звуковым давлением $p \geqslant$ I бар (эфф).

7.9. Поршневой гидроакустический излучатель с горизонтально направленной осью имеет отношение диаметра ($2r_0$) к длине волны (λ) $\frac{2r_0}{\lambda}$ = I,70. Излучаемый в воде на глубине h = I5 м звуковой импульс с тональной набивкой отражается от вертикальной плоскости, стоящей на расстоянии x от излучателя и от свободной поверхности воды, и приходит обратно к излучателю в разные моменты времени с интервалом Δt .

Исследовать, при каких условиях амплитуды импульса, отраженного от плоскости и от свободной поверхности, равны на поверхности излучателя и с каким интервалом времени Δt придут отраженные импульсы, если h = 15 м. Расчет провести без учета затухания в среде для значений волнового параметра $kr_0 = 1,70\pi$ и $kr_0 = 2,72\pi$.

Для расчетов следует использовать таблицы бесселевых функций.

7.10. Поршневой излучатель (радиус $r_0 = 15$ см) с экраном излучает в морской воде мощность Π = 10 Вт в горизонтальном направлении и создает на расстоянии r = 3,44 км амплитуду давления p_0 (эфф.)

Не учитывая затухание в среде, определить, чему равна частота излучателя и какая эффективная амплитуда давления имеет место в центре поршневой диафрагмы, если p_0 соответствует четырем различным уровням 94; 100; 106; 112 дБ над нулевым уровнем 2×10^{-4} бар. При расчетах принять $\rho c = 1,5 \times 10^5$ и сопротивление излучения $R \approx S\rho c$, где $S = \pi r_0^2$.

7.11. Летучая мышь может обнаружить эхо-локацией сферу диаметром $D = 2$ см на расстоянии $r_1 = 1$ м. Определить, на каком расстоянии r_2 она сможет обнаружить при помощи сигнала той же интенсивности длинный стержень того же диаметра.

7.12. Ультразвуковой излучатель дельфина имеет мощность Π = 0,1 Вт и коэффициент концентрации $\gamma = 50$ при частоте f = 80 кГц.

а) Определить, на каком расстоянии дельфин может лоцировать цилиндр радиуса $R_0 = 20$ см, стоящий вертикально, если слуховой аппарат дельфина регистрирует давление, соответствующее не менее 40 дБ над нулевым уровнем $p_0 = 2 \times 10^{-4}$ бар.эфф.

б) Ту же самую задачу решить для $R_0 = 2$ см.

7.13. Определить, на каком расстоянии x от излучателя будет воспринят эхо-сигнал в море от вертикального цилиндра радиуса R_1 = 10 см, если эхо-сигнал такого же излучателя от сферы радиуса R_2 = 10 см, отстоящей на расстоянии r = 100 м, воспринимается с такой же амплитудой как от цилиндра, так и от сферы. Длина волны звука значительно меньше R_1 и R_2. Задачу решить при задании а) f = 100 кГц; б) f = 30 кГц.

Литература

1. Ржевкин С.Н. Курс лекций по теории звука. Изд-во МГУ, 1960.
2. Морз Ф. Колебания и звук. М., ГТТИ, 1949.
3. Исакович М.А. Общая акустика. М., "Наука", 1973.
4. Стрелков С.П. Введение в теорию колебаний. М.-Л., 1951.
5. Фурдуев В.В. Электроакустика. М., ГТТИ, 1948.
6. Янке Е., Эмде Ф., Лёш Ф. Специальные функции. М., "Наука", 1964.
7. Сташкевич А.П. Акустика моря. Л., "Судостроение", 1966.

IX. Таблицы и графики

Таблица 1

Функции Лежандра для сферических координат

ϑ	$P_{-1}=P_0$	$P_1(\cos\vartheta)$	$P_2(\cos\vartheta)$	$P_3(\cos\vartheta)$	$P_4(\cos\vartheta)$
0^0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
5	1.0000	0.9962	0.9886	0.9773	0.9623
10	1.0000	0.9848	0.9548	0.9106	0.8352
15	1.0000	0.9659	0.8995	0.8042	0.6847
20	1.0000	0.9397	0.8245	0.6640	0.4750
25	1.0000	0.9063	0.7321	0.5010	0.2465
30	1.0000	0.8660	0.6250	0.3248	0.0234
35	1.0000	0.8192	0.5065	0.1454	-0.1714
40	1.0000	0.7660	0.3802	-0.0252	-0.3190
45	1.0000	0.7071	0.2500	-0.1768	-0.4063
50	1.0000	0.6428	0.1198	-0.3002	-0.4275
55	1.0000	0.5736	-0.0065	-0.3886	-0.3852
60	1.0000	0.5000	-0.1250	-0.4376	-0.2891
65	1.0000	0.4226	-0.2321	-0.4452	-0.1552
70	1.0000	0.3420	-0.3245	-0.4130	-0.0038
75	1.0000	0.2588	-0.3995	-0.3449	+0.1434
80	1.0000	0.1736	-0.4548	-0.2474	0.2659
85	1.0000	0.0872	-0.4886	-0.1291	0.3468
90	1.0000	0.0000	-0.5000	0.0000	0.3750

ϑ	$P_5(\cos\vartheta)$	$P_6(\cos\vartheta)$	$P_7(\cos\vartheta)$	$P_8(\cos\vartheta)$	$P_9(\cos\vartheta)$
0^0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
5	0.9437	0.9216	0.8962	0.8675	0.8358
10	0.7840	0.7045	0.6164	0.5218	0.4228
15	0.5471	0.3983	0.2455	0.0962	-0.0428
20	0.2715	0.0719	-0.1072	-0.2518	-0.3617
25	0.0009	-0.2040	-0.3441	-0.4062	-0.3896

Продолжение таблицы 1

ϑ	$P_5(\cos\vartheta)$	$P_6(\cos\vartheta)$	$P_7(\cos\vartheta)$	$P_8(\cos\vartheta)$	$P_9(\cos\vartheta)$
30	-0.2233	-0.3740	-0.4102	-0.3388	-0.1896
35	-0.3691	-0.4114	-0.3096	-0.1154	+0.0965
40	-0.4197	-0.3236	-0.1006	+0.1386	0.2900
45	-0.3757	-0.1484	+0.1271	0.2983	0.2855
50	-0.2545	+0.0564	0.2854	0.2947	0.1041
55	-0.0868	0.2297	0.3191	0.1422	-0.1296
60	+0.0898	0.3232	0.2231	-0.0763	-0.2679
65	0.2381	0.3138	0.0422	-0.2411	-0.2300
70	0.3281	0.2089	-0.1485	-0.2780	-0.0476
75	0.3427	0.0431	-0.2731	-0.1702	+0.1595
80	0.2810	-0.1321	-0.2835	+0.0233	0.2596
85	0.1577	-0.2638	-0.1778	0.2017	0.1913
90	0.0000	-0.3125	0.0000	0.2734	0.0000

Таблица 2

Бесселевы функции для цилиндрических координат

$J_n(x)$ и $N_n(x)$

x	$J_0(x)$	$N_0(x)$	$J_1(x)$	$N_1(x)$	$J_2(x)$	$N_2(x)$
0.0	I.0000	$-\infty$	0.0000	$-\infty$	0.0000	$-\infty$
0.I	0.9975	-I.5342	0.0499	-6.4590	0.00I2	-I27 64
0.2	0.9900	-I.08II	0.0995	-3.3238	0.0050	-32 I57
0.4	0.9604	-0.6060	0.I960	-I.7809	0.0I97	-8 2983
0.6	0.9I20	-0.3085	0.2867	-I.2604	0.0437	-3.8928
0.8	0.8463	-0.0868	0.3688	-0.978I	0.0758	-2.3586
I.0	0.7652	+0.0883	0.440I	-0.78I2	0.II49	-I.6507
I.2	0.67II	0.228I	0.4983	-0.62II	0.I593	-I.2633
I.4	0.5669	0.3379	0.54I9	-0.479I	0.2074	-I.0224
I.6	0.4554	0.4204	0.5699	-0.3476	0.2570	-0.8549
I.8	0.3400	0.4774	0.58I5	-0.2237	0.306I	-0.7259
2.0	0.2239	0.5I04	0.5767	-0.I070	0.3528	-0.6I74
2.2	0.II04	0.5208	0.5560	+0.00I5	0.395I	-0.5I94
2.4	+0.0025	0.5I04	0.5202	0.I005	0.43I0	-0.4267
2.6	-0.0968	0.48I3	0.4708	0.I884	0.4590	-0.3364
2.8	-0.I850	0.4350	0.4097	0.2635	0.4777	-0.2477
3.0	-0.260I	0.3768	0.339I	0.3247	0.486I	-0.I604
3.2	-0.3202	0.307I	0.26I3	0.3707	0.4835	-0.0754
3.4	-0.3643	0.2296	0.I792	0.40I0	0.4697	+0.0063
3.6	-0.39I8	0.I477	0.0955	0.4I54	0.4448	0.083I
3.8	-0.4026	+0.0645	+0.0I28	0.4I4I	0.4093	0.I535
4.0	-0.397I	-0.0I69	-0.0660	0.3979	0.364I	0.2I59
4.2	-0.3766	-0.0938	-0.I386	0.3680	0.3I05	0.2690
4.4	-0.3423	-0.I633	-0.2028	0.3260	0.250I	0.3II5
4.6	-0.296I	-0.2235	-0.2500	0.2737	0.I846	0.3425
4.8	-0.2404	-0.2723	-0.2985	0.2I36	0.II6I	0.36I3

Продолжение таблицы 2

x	$J_0(x)$	$N_0(x)$	$J_1(x)$	$N_1(x)$	$J_2(x)$	$N_2(x)$
5.0	-0.1776	-0.3085	-0.3276	0.1479	+0.0466	0.3677
5.2	-0.1103	-0.3212	-0.3432	0.0792	-0.0217	0.3617
5.4	-0.0412	-0.3402	-0.3453	+0.0101	-0.0867	0.3429
5.6	+0.0270	-0.3354	-0.3343	-0.0568	-0.1464	0.3152
5.8	0.0917	-0.3177	-0.3110	-0.1192	-0.1989	0.2766
6.0	0.1507	-0.2882	-0.2767	-0.1750	-0.2429	0.2299
6.2	0.2017	-0.2483	-0.2329	-0.2223	-0.2769	0.1766
6.4	0.2433	-0.2000	-0.1816	-0.2596	-0.3001	0.1188
6.6	0.2740	-0.1452	-0.1250	-0.2858	-0.3119	+0.0586
6.8	0.2931	-0.0864	-0.0652	-0.3002	-0.3123	-0.0019
7.0	0.3001	-0.0250	-0.0047	-0.3027	-0.3014	-0.0605
7.2	0.2951	+0.0339	+0.0543	-0.2934	-0.2800	-0.1154
7.4	0.2786	0.0907	0.1096	-0.2731	-0.2487	-0.1652
7.6	0.2516	0.1424	0.1592	-0.2428	-0.2097	-0.2063
7.8	0.2154	0.1872	0.2014	-0.2039	-0.1638	-0.2395
8.0	0.1716	0.2235	0.2346	-0.1581	-0.1130	-0.2630

Таблица 3

Сферические бесселевы функции

$$j_n(x)=\sqrt{\pi/2x}\,J_{n+\frac{1}{2}}(x), \quad n_n(x)=\sqrt{\pi/2x}\,N_{n+\frac{1}{2}}(x)$$

x	$j_0(x)$	$n_0(x)$	$j_1(x)$	$n_1(x)$	$j_2(x)$	$n_2(x)$
0.0	I.0000	$-\infty$	0.0000	$-\infty$	0.0000	$-\infty$
0.I	0.9983	-9.9500	0.0333	-I00.50	0.0007	-3005.0
0.2	0.9933	-4.9003	0.0664	-25.495	0.0027	-377.52
0.4	0.9735	-2.3027	0.I3I2	-6.7302	0.0I05	-48.I74
0.6	0.94II	-I.3756	0.I929	-3.2337	0.0234	-I4.793
0.8	0.8967	-0.8709	0.2500	-I.9853	0.0408	-6.5740
I.0	0.84I5	-0.5403	0.30I2	-I.38I8	0.0620	-3.6050
I.2	0.7767	-0.3020	0.3453	-I.0283	0.0865	-2.2689
I.4	0.7039	-0.I2I4	0.38I4	-0.7906	0.II33	-I.5728
I.6	0.6247	+0.0I83	0.4087	-0.6I33	0.I4I6	-I.I682
I.8	0.54I0	0.I262	0.4268	-0.4709	0.I703	-0.9III
2.0	0.4546	0.208I	0.4354	-0.3006	0.I985	-0.7340
2.2	0.3675	0.2675	0.4346	-0.2459	0.225I	-0.6028
2.4	0.28I4	0.3072	0.4245	-0.I534	0.2492	-0.4990
2.6	0.I983	0.3296	0.4058	-0.07I5	0.2700	-0.4I2I
2.8	0.II96	0.3365	0.3792	+0.0005	0.2867	-0.3359
3.0	+0.0470	0.3300	0.3457	0.0630	0.2986	-0.2670
3.2	-0.0I82	0.3I20	0.3063	0.II57	0.3084	-0.2035
3.4	-0.0752	0.2844	0.2623	0.I588	0.3066	-0.I442
3.6	-0.I229	0.249I	0.2I50	0.I92I	0.302I	-0.0890
3.8	-0.I6I0	0.2082	0.I658	0.2I58	0.29I9	-0.0378
4.0	-0.I892	0.I634	0.II6I	0.2300	0.2763	+0.009I
4.2	-0.2075	0.II67	0.0673	0.2353	0.2556	0.05I4
4.4	-0.2I63	0.0699	+0.0207	0.232I	0.2304	0.0884
4.6	-0.2I60	+0.0244	-0.0226	0.22I3	0.20I3	0.I200
4.8	-0.2075	-0.0I82	-0.06I5	0.2037	0.I69I	0.I456

Продолжение таблицы 3

x	$j_0(x)$	$n_0(x)$	$j_1(x)$	$n_1(x)$	$j_2(x)$	$n_2(x)$
5.0	-0.1918	-0.0567	-0.0951	0.1804	0.1347	0.1650
5.2	-0.1699	-0.0901	-0.1228	0.1526	0.0991	0.1871
5.4	-0.1431	-0.1175	-0.1440	0.1213	0.0631	0.1850
5.6	-0.1127	-0.1385	-0.1586	0.0880	+0.0278	0.1856
5.8	-0.0801	-0.1527	-0.1665	0.0538	-0.0060	0.1805
6.0	-0.0466	-0.1600	-0.1678	+0.0199	-0.0373	0.1700
6.2	-0.0134	-0.1607	-0.1629	-0.0124	-0.0654	0.1547
6.4	+0.0182	-0.1552	-0.1523	-0.0425	-0.0896	0.1353
6.6	0.0472	-0.1440	-0.1368	-0.0690	-0.1094	0.1126
6.8	0.0727	-0.1278	-0.1172	-0.0915	-0.1243	0.0875
7.0	0.0939	-0.1077	-0.0943	-0.1029	-0.1343	0.0609
7.2	0.1102	-0.0845	-0.0692	-0.1220	-0.1391	0.0337
7.4	0.1215	-0.0593	-0.0429	-0.1294	-0.1388	+0.0068
7.6	0.1274	-0.0331	-0.0163	-0.1317	-0.1338	-0.0189
7.8	0.1280	-0.0069	+0.0095	-0.1289	-0.1244	-0.0427
8.0	0.1287	+0.0182	0.0336	-0.1214	-0.1111	-0.0637

Таблица 4

Фазовые углы и коэффициенты амплитуд для излучения и рассеяния звука сферой $\mu = ka = (2\pi a/\lambda) = (\omega a/c)$

ka	D_0	δ_0	D_1	δ_1	D_2	δ_2	D_3	δ_3	D_4	δ_4
0.0	∞	0.00°	∞	0.00°	∞	0.00°	∞	0.00°	∞	0.00°
0.I	I00.5	0.02	2000	-0.0I	-	0.00	-	0.00	-	0.00
0.2	25.50	0.I5	250.I	-0.08	5637	0.00	-	0.00	-	0.00
0.4	6.73I	I.I2	3I.35	-0.58	354.6	-0.0I	5906	0.00	-	0.00
0.6	3.239	3.4I	9,408	-I.82	70.73	-0.06	785.5	0.00	-	0.00
0.8	2.00I	7.I8	4.I0I	-3.80	22.67	-0.25	I88.9	-0.0I	2058	-0.00
I.0	I.4I4	I2.30	2.236	-6.I4	9.434	-0.70	62.97	-0.02	547.8	0.00

[redacted]

Таблица 5

Фазовые углы и коэффициенты амплитуд для излучения и рассеяния звука цилиндром $\mu = ka = (2\pi a/\lambda) = (\omega a/c)$

ka	C_0	γ_0	C_1	γ_1	C_2	γ_2	C_3	γ_3	C_4	γ_4
0.0	∞	0.00^0	∞	0.00^0	∞	0.00^0	∞	0.00^0	∞	0.00^0
0.I	I2.92	.44	63.06	-45	2546	0.00	-	0.00	-	0.00
0.2	6.65I	I.7I	I5.55	-I.82	3I8.2	-0.0I	9565	0.00	-	0.00
0.4	3.583	6.28	3.875	-6.97	39.7I	-0.I4	600.7	0.00	-	0.00
0.6	2.585	I2.82	I.844	-I3.62	II.72	-0.69	II9.6	-0.0I	I595	0.00
0.8	2.09I	20.66	I.I99	-I8.73	4.922	-2.09	38.20	-0.06	382.9	0.00

[redacted]

Таблица 6

<u>Таблица единиц измерения и обозначений</u>

Наименование единицы	Обозначение	Единица измерения	Сокращенное обозначение в сист. СГС	Связь между единицами СИ и СГС
Длина	L, ℓ, R, r, ξ	сантиметр	см	1 м $= 10^2$ см
Скорость	$u, v, \dot{\xi}, c$	сантиметр в секунду	см/с	1 м/с $= 10^2$ см/с
Ускорение	a, g	сантиметр на сек.квадр.	см/с^2	1 м/с$^2 = 10$ см/с^2

Эффективные амплитуды колебательных смещений, скоростей и ускорений обозначаются теми же буквами с индексом "е".

Масса	M, m	грамм	г	1 кг $= 10^3$ г
Плотность	ρ	грамм на куб. сантиметр	г/см^3	1 кг/м$^3 = 10^{-3}$ г/см^3
Площадь	S, s, Σ, σ	квадратный сантиметр	см^2	1 м$^2 = 10^4$ см^2
Объем	V	кубический сантиметр	см^3	1 м$^3 = 10^6$ см^3
Время	t, τ	секунда	с	1 с $= 1$ с
Частота	f	(секунда)$^{-1}$, герц	Гц	1 Гц $= 1$ Гц
Частота угловая, или циклическая	ω	радиан в сек.	рад/с	1 рад/с $= 1$ рад/с
Температура	T	градус по шкале Цельсия или Кельвина	^{o}C, ^{o}K	T^oK$=273+T^o$C
Плоский угол	$\alpha, \beta, \vartheta, \theta, \psi$	градус, радиан	рад, ^{o}	1 рад$=(180/\pi)^o$
Телесный угол	Ω	стерадиан	стер	1 стер $= 1$ стер
Сила	F, ψ	дина	дн	1 н $= 10^5$ дн
Давление	p, P	дина на квадр.сантиметр (в акустике - бар)	дн/см^2 (бар)	1 н/м$^2 = 10$ дн/см^2
Нулевой уровень звукового давления (эффект.)	p_0	$2 \cdot 10^{-4}$ дин/см^2 (бар)	-	-

Продолжение таблицы 6

Наименование единицы	Обозначение	Единица измерения	Сокращенное обозначение в сист. СГС	Связь между единицами С и СГС
Эффективная амплитуда давления	P_e	дина на кв. см	дн/см^2	Iн/м^2=IOдн/см^2
Добротность	Q	безразмерно		
Модуль Юнга	E	дина на кв. см	дн/см^2	Iн/м^2=IOдн/см^2
Модуль сдвига	G	дина на кв.см	дн/см^2	Iн/м^2=IOдн/см^2
Модуль объемной упругости	$\varkappa$	дина на кв.см	дн/см^2	Iн/м^2=IOдн/см^2
Динамическая вязкость	μ	дина-секунда на квадр. сантиметр	дн.с/см^2	Iн.с/м^2=IOдн.с/см^2
Скорость звука	c	сантиметр в секунду	см/с	Iм/с=IO^{2}см/с
Интенсивность (сила) звука	$\mathcal{J}$	дина-секунда на квадр.сантиметр	эрг.с/см^2	IВт/м^2=Iэрг.с/см^2
Уровень интенсивности звука (логарифмический)	L	дБ	безразмерный	-
Удельное акустическое сопротивление (импеданс)	Z	дина-секунда на кубич.см	дн.с/см^3	Iн.с/м^3=Iдн/см^3
Механическое сопротивление акустической системы	Z_m	дина-секунда на сантиметр	дн.с/см^3	Iн.с/м=Iдн.с/см
Волновое число	k	единица на сантиметр	см$^{-I}$	Iм$^{-I}$=IO^{-2}см$^{-I}$
Длина волны	λ	сантиметр	см	Iм=IO^{2}см

X. Ответы и решения

Раздел I

I.1. v = 1000 км/ч и 1200 км/ч независимо от давления.

I.2. 819° и -205°С.

I.3. 484 дня.

I.4. $p_e \approx 1000$ бар(эфф.); $v_e \approx 25$ см/с; амплитуда смещения $\xi_{1e} \approx 0{,}004$ см; амплитуда ускорения $a_e \approx 1{,}57 \cdot 10^5$ см/с^2; $\Delta T = 0{,}1^0$.

I.5. В 200 раз.

I.6. $c^2 = \dfrac{8{,}315 \cdot 10^7 \gamma T}{m}$; в водороде С = 12,50.10^{4}см/с; в углекислоте С = 2,60.10^4 см/с; показатель преломления $n = 0{,}48$.

I.7. L = 45 см.

I.8. 3,5 и 0,157 км.

I.9. Около 28 дн/см^2 (бар).

I.10. $\ell \approx 470$ м.

I.11. $r_p = -0{,}107$; $t = 1 - |r_p| = 0{,}893$; $\dfrac{p_{max}}{p_{min}} = 1{,}36$.

I.12. Суммарный модуль упругости $\dfrac{1}{\varkappa'} = \dfrac{\eta}{\varkappa_2} + \dfrac{1-\eta}{\varkappa_1}$; $C' = 120$ м/с.

I.13. Для одинакового направления

$\mathcal{J} = \mathcal{J}_1 + \mathcal{J}_2 + 2\sqrt{\mathcal{J}_1 \mathcal{J}_2}\,\cos\varphi$; для противоположного направления: $\mathcal{J} = \mathcal{J}_1 - \mathcal{J}_2$.

I.14. Машинист слышит гудок с частотой f, а эхо - с частотой $f' = \dfrac{1+\frac{u}{c}}{1-\frac{u}{c}} f$; разница по частоте $f - f' = 2\frac{u}{c} f$.

Сторож слышит гудок с частотой $f'' = \dfrac{f}{1+\frac{u}{c}}$, а эхо-с частотой $f''' = \dfrac{1}{1-\frac{u}{c}} f$; разность частот $f'' - f''' = -2\frac{u}{c} f$.

Машинист и сторож услышат биения с частотой $\Delta f = 2\frac{u}{c} f$.

I.15. $f' = \dfrac{1+\frac{u}{c}}{1-\frac{u}{c}} f = 3000$ гц.

1.16. $\xi_e = 7{,}75\cdot10^{-10}$ см; $\dot{\xi}_e = 2\pi f \xi_e = 4{,}90\cdot10^{-6}$ см/с; при 160 дБ получатся величины в 10^8 раз большие.

1.17. $J = \dfrac{2\rho\omega^2 h z}{c(h^2-z^2)^2}$ при $z<h$; $J = \dfrac{\rho\omega^2[(z+h)^2-(z^2-h^2)\cos kd]}{(h^2-z^2)^2}$ при $z>h$;

положительное направление оси z — от средней точки к источнику.

1.18. $\cos\alpha = \dfrac{c}{3af}$.

1.19. $n = 0{,}86$.

Раздел П

2.1. $$Z_e = 420\,\frac{1+j\,0{,}207}{1-j\,0{,}207} = 420\cdot 1{,}06\,e^{j\varphi};\quad \mathrm{tg}\,\varphi = 0{,}425;$$

f = 1440 Гц; $\xi_0 = 2{,}28\cdot10^{-5}$ см.

2.2. $R_e = R$; $Y_e = Y + \dfrac{R^2}{S\rho c}$ при f = 200,400,600 и 800 Гц;

$R_e = \left(\dfrac{S\rho c}{Y}\right)^2 R$; $Y_e = -\left(\dfrac{S\rho c}{Y}\right)^2 Y$ при f =100,300,500 и 700 Гц.

2.3. Импеданс на конце трубы должен быть равен нулю. Импеданс в точках x = 25, 50, 75, 100 и 125 см будет равен: $-j;\ \infty;\ +j;\ 0;\ -j$.

2.4. Ответ в форме графика.

2.5. а) Закрытая труба

$$v = 2.5\cdot10^{-2}\sin 8\pi\left(t+\tfrac{1}{16}\right) - 5\cdot10^{-2}\sin 24\pi\left(t+\tfrac{1}{48}\right) + 2{,}5\cdot10^{-2}\sin 40\pi\left(t+\tfrac{1}{80}\right);$$

$$a = 10^{-3}\sin 8\pi t - 0{,}67\cdot10^{-3}\sin 24\pi t - 0{,}2\cdot10^{-3}\sin 40\pi t;$$

б) открытая труба

$$v = 4\sin 8\pi\left(t-\tfrac{1}{16}\right) - 0{,}88\sin 24\pi\left(t-\tfrac{1}{48}\right) + 0{,}16\sin 40\pi\left(t-\tfrac{1}{80}\right);$$

$$a = -\left[0{,}16\sin 8\pi t - 3{,}5\cdot10^{-2}\sin 24\pi t + 0{,}64\cdot10^{-2}\sin 40\pi t\right].$$

2.6. $$r_p = \left[(1+10^{-7}\omega^2)^2 + 0{,}4\cdot10^{-11}\omega^2\right]^{-\frac{1}{2}},$$

2.7. Из резонансной частоты мембраны $\omega_0 = \dfrac{240}{r_0}\sqrt{\dfrac{\tau}{\rho}}$ находится натяжение пленки $\tau = 2{,}11\cdot10^4$ дн/см. Безразмерный им-

педанс на конце трубы $Z_1=\frac{0{,}5S\left(\frac{S}{0{,}5S}\right)^2}{j\omega a S\rho c}$, где $S=\pi r_0^2$; смещение в центре $a=\frac{0{,}5\pi r_0^2}{2\pi r}$, тогда $Z_1=\frac{8r}{j\omega S\rho c}=-j\frac{10{,}8}{kl}$.
Условие резонанса $ctg\,kl=-Y_{10}=\frac{-j\,10{,}8}{kl}$ откуда $kl\approx\pi(1-0{,}086)$,

$f_0=77{,}7$ Гц.

2.8. Импеданс при $x=25$, 50, 75 и 100 см равен соответственно 4200 ($1+j$); 4200 ($1-j$), 4200 ($1+j$) и 4200 ($1-j$) мех.ом.

2.9. Резонансная частота f определяется из выражений

$$\cos 2kl=\frac{Y_1^2-1}{Y_1^2+1},\quad \sin 2kl=\frac{2Y}{Y_1^2+1};\quad f_0=\frac{c}{4l},$$

в которых $k=\frac{2\pi f}{c}$. При $Y_1<0$, $\frac{f'}{f_0}>1$ труба как бы укорачивается; при $Y_1>0$; $\frac{f'}{f_0}<1$ труба как бы удлинняется.

2.10.

$$tg\,2\delta=\frac{(p_3-p_2)^2\cos 2[k(x_1-l)]+(p_1-p_3)^2\cos 2[k(x_2-l)]+(p_2-p_1)^2\cos 2[k(x_3-l)]}{(p_2-p_3)^2\sin 2[k(x_1-l)]+(p_3-p_1)^2\sin 2[k(x_2-l)]+(p_1-p_2)^2\sin 2[k(x_3-l)]};$$

$$A=p_1\left\{1+r^2+2r\cos 2[k(x_1-l)+\delta]\right\}^{-\frac{1}{2}},$$

$$p_{max}=|A|(1+r);\quad p_{min}=|A|(1-r).$$

Должно быть $D_1<0$, $D^2>1$, где

$$D^2=\frac{p_2^2\cos 2[k(x_1-l)+\delta]-p_1^2\cos 2[k(x_2-l)+\delta]}{p_2^2-p_1^2},$$

$$r=-D-\sqrt{D^2-1}$$

2.11.

$$r_1=\frac{nR_1}{nR_1+2},\quad r_2=\frac{\sqrt{R_1^2+R_1+4}-2}{\sqrt{R_1^2+R_1+4}+2}.$$

Раздел III

3.1. f_{10} = 1700 Гц; f_{20} = 3400 Гц; f_{01} = 1130 Гц; f_{02} = 2260 Гц; f_{11} = 2050 Гц; f_{12} = 2880 Гц; f_{21} = 3580 Гц.

3.2. f_{01} = 2070 Гц; f_{02} = 3800 Гц; f_{10} = 1000 Гц; f_{11} = 2400 Гц; f_{12} = 4630 Гц; f_{20} = 1650 Гц; f_{21} = 3630 Гц; f_{22} = 5400 Гц.

3.3. $$p(x,z,t)=\rho c u_0 e^{j\omega t}\left[\frac{1}{16}e^{-jkz}-a_{20}\cos\frac{2\pi}{a}e^{-jk_p z}\right],$$

при f = 2,1.10^3 Гц; a_{20} = 0,532; k_p = 0,3k ;
при f = 3.10^3 Гц; a_{20} = 0,213; k_p = 0,75k.

3.4. $$p(x,z,t)=\frac{d}{b}\rho c u_0 e^{j(\omega t-kz)}+\frac{2\rho c}{\pi}u_0\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\sin\frac{n\pi}{a}d\,\sin\frac{n\pi}{a}x}{n\sqrt{k^2-\left(\frac{n\pi}{a}\right)^2}}e^{j\left(\omega t-\sqrt{k^2-\left(\frac{n\pi}{a}\right)^2}z\right)}.$$

при $x<\frac{c}{2a}$ в дальнем поле остается только I-й член

$$p_{00}(x,z,t)=\frac{d}{b}\rho c u_0 e^{j\omega t};\quad J_{00}=\frac{1}{2}\left(\frac{d}{b}\right)^2\rho c u_0^2$$

3.5. f_1 = 3450 Гц; f_2 = 6320 Гц; f_3 = 9170 Гц; N=216; C' = 10$^{3/2}$ С; z_1 = 50 см.

3.6. $$\bar{J}=\frac{j\,\upsilon^2 u_0^2}{2\sqrt{\frac{\omega^2}{c^2}-\frac{m^2\pi^2}{a^2}}}.$$

3.7.
$$p(x,z,t)=j\omega\rho e^{j\omega t}\sum_{m=1}^{\infty}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\alpha_{mn}}{\sqrt{k^2-k_{mn}^2}}\cos mx\cos ny\, e^{-j\sqrt{k^2-k_{mn}^2}z},$$

$$k_{m0}=\frac{m\pi}{a},\quad k_{0n}=\frac{n\pi}{a},\quad k_{mn}=\frac{\pi}{a}\sqrt{m^2+n^2},$$

$$\alpha_{00}=\left(\frac{a'}{a}\right)^2u_0;\quad \alpha_{m0}=\frac{4\left(\frac{a'}{a}\right)\cos\frac{m\pi}{2}\sin\frac{m\pi}{2}\left(\frac{a'}{a}\right)}{m\pi}u_0;\quad \alpha_{0n}=\frac{4\left(\frac{a'}{a}\right)\cos\frac{n\pi}{2}\sin\frac{n\pi}{2}\left(\frac{a'}{a}\right)}{n\pi}u_0;$$

$$\alpha_{mn}=\frac{16\cos\frac{m\pi}{2}\cos\frac{n\pi}{2}\sin\frac{m\pi}{2}\left(\frac{a'}{a}\right)\sin\frac{n\pi}{2}\left(\frac{a'}{a}\right)}{mn\pi^2}.$$

3.8. Требуется дать детальный вывод коэффициентов α_{mn} разложения потенциала скоростей в бесконечный ряд; $m,n = 0, 1, 2, 3 \ldots$

3.9. Амплитуда звукового давления на оси

$$P_0 = \frac{\rho c u_0}{\sqrt{1-\frac{\nu_n^2}{K^2}}}\ ; \qquad P_0\Big|_{\omega \approx 2\nu_n c} = \frac{2\rho c u_0}{\sqrt{3}}\ .$$

Плоская волна возбуждается только при $n = 0$.

3.10.

$$\mathcal{M} = \frac{2\rho a^3}{\pi^2}\left[\sum_{m=1}^{\infty}\frac{\left(\frac{a'}{a}\right)^2 \cos^2 m\pi \sin^2 m\pi\left(\frac{a'}{a}\right)}{m^2\gamma_{m0}} + \sum_{n=1}^{\infty}\frac{\left(\frac{a'}{a}\right)\cos^2 n\pi \sin^2 n\pi\left(\frac{a'}{a}\right)}{n^2\gamma_{0n}} + \right.$$

$$\left. + \sum_{m=1}^{\infty}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{4\cos^2 m\pi \cos^2 n\pi \sin^2 m\pi\left(\frac{a'}{a}\right)' \sin^2 n\pi\left(\frac{a'}{a}\right)}{\pi^3\gamma_{mn}}\right],$$

$$\gamma_{mn} = \sqrt{1-\frac{k^2}{k_{mn}^2}}\ ; \quad k_{mn}^2 = \pi^2\left(\frac{m^2}{a^2}+\frac{n^2}{a^2}\right), \quad m,n = 0,1,2,\ldots$$

3.11.

$$T = \frac{1}{2}\mathcal{M}u_0^2\ ; \quad \mathcal{M} = 4\pi z_0^3\left(\frac{z_1}{z_0}\right)^2\sum_{m=1}^{\infty}\frac{J_1^2(\nu_m z_1)}{(\nu_m z_0)^3 J_0^2(\nu_m z_0)}\ ,$$

$(\nu_m z_0)$ – корни уравнения $J_1(\nu z) = 0$

3.12. Изложить ход вывода коэффициентов.

3.13. Звуковое давление в зависимости от z, z и t:

$$p(z,z,t) = \left[-\frac{z_1^2\cos k(l-z)}{z_0^2\sin kl} + j2z_1\sum_{m=1}^{\infty}\frac{J_1^2(\nu_m z_1)\cos[\nu_m\gamma_m(l-z)]}{(\nu_m z_0)^3\gamma_m\sin(\nu_m\gamma_m l)}J_0(\nu_m z)\right]\rho\omega u_0 e^{j\omega t}.$$

Присоединенная масса:

$$\mathcal{M}\Big|_{k \ll \nu_1} = 4\pi z_1^3\left(\frac{z_0}{z_1}\right)\rho\sum_{m=1}^{\infty}\frac{J_1^2(\nu_m z_1)\,\mathrm{cth}(\nu_m l)}{(\nu_m z_0)^3 J_0^2(\nu_m z_0)}\ .$$

3.14. $\mathcal{M}(0{,}25) \approx 1{,}68\rho r_0^3$; $\mathcal{M}(0{,}4) \approx 1{,}18\rho r_0^3$; $\mathcal{M}(0{,}6) \approx 0{,}64\rho r_0^3$

3.15. Звуковое давление в функции r, z и t:

$$p(r,z,t) = \rho c\left(\frac{r_1}{r_0}\right)^2 u_0^2 e^{j(\omega t - kz)} + j\omega\rho\sum_{m=1}^{\infty} C_m J_0(\nu_m r) e^{j(\omega t - \sqrt{k^2-\nu_m^2}\,z)},$$

где

$$C_m = \frac{2r_1 J_1(\nu_m r_1) u_0}{(\nu_m r_0)^2 J_0^2(\nu_m r_0)\sqrt{1 - k^2/\nu_m^2}}, \qquad T_{max} = \frac{1}{2}\mathcal{M}u_0^2,$$

где

$$\mathcal{M} = 4\pi r_1^3\left(\frac{r_0}{r_1}\right)\rho\sum_{m=1}^{\infty}\frac{J_1^2(\nu_m r_1)}{(\nu_m r_0)^3 J_0^2(\nu_m r_0)}.$$

3.16.

$$p(x,y,z,t) = \rho c\left(\frac{a_1 b_1}{a b}\right)u_0 e^{j(\omega t - kz)} +$$

$$+\rho\omega u_0 e^{j\omega t}\sum_{m=1}^{\infty}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{D_{mn}\cos\frac{m\pi}{a}x\cos\frac{n\pi}{b}y}{\sqrt{k_{mn}^2 - k^2}}\, e^{-j\sqrt{k_{mn}^2-k^2}\,z}.$$

3.17. $J = \frac{1}{2}\rho c\left(\frac{a_1 b_1}{a b}\right)^2 u_0^2 = 0{,}54 u_0^2$

$$\mathcal{M} = \frac{4}{3}\rho r_0^3\frac{1}{\xi}\sum_{m=1}^{\infty}\sum_{n=1}^{\infty}\gamma_{mn}\frac{J_1^2(\pi\xi\sqrt{m^2+n^2})}{\sqrt{(m^2+n^2)^3}},$$

где $\gamma_{mn} = 1$; $\gamma_{on} = \gamma_{mo} = \frac{1}{2}$.

Раздел IУ

4.I. При $f_1 = 680$ Гц; $\alpha = 0$, при $f_2 = 340$ Гц; $\alpha = 0,76$.

4.2. $\alpha_{100} = 0,52$; $\alpha_{500} = 0,62$; $\alpha_{2000} = 0,92$.

4.3. $\alpha_{500} \approx 0,71$; $\alpha_{1000} \approx 0,4$; $\alpha_{2000} \approx 0,18$.

4.4. Окружности равного поглощения

$$\left(R_1 - \frac{1}{Th2\varepsilon}\right)^2 + Y_1^2 = \left(\frac{1}{Sh2\varepsilon}\right)^2$$

окружности равной фазы $R_1^2 + \left(Y_1 - \frac{1}{tg2\delta}\right)^2 = \left(\frac{1}{Sin2\delta}\right)^2$.

4.5. I) $\ell = 27$ см; $d = 0,86$ см; $a = 8,5$ см. 2) $\ell = 27$ см; $d = 1,74$ см; $a = 6$ см. 3) $\ell = 31$ см; $d = 9,7$ см; $a = 61$ см.

4.6. Максимумы коэффициента поглощения $\alpha = 0,555$ получаются при частотах, соответствующих корням уравнения $0,354k\ell - ctgk\ell = 0$; $f_1 = 1200$ Гц; $f_2 = 3220$ Гц; $f_3 = 5000$ Гц. При частотах $f_n = n \cdot 1,7 \cdot 10^3$ Гц, $\alpha = 0$.

4.7. $\ell = 8,13$ см; $d = 1,75$ см; $a = 6$ см.

4.8. Приняв функцию Фока $\mathcal{F}(0.25) \approx 1,5$, получим

$$z = |z_p| = 1; \quad tg\varphi = \frac{0,106k\ell - ctgk\ell}{128\left[(0,106k\ell - ctgk\ell)^2 - (3,9 \cdot 10^{-3})^2\right]};$$

фаза φ близка к 0, за исключением узкой области частот близ корней уравнения $(0,106 - ctgk\ell) = 0$, соответствующих частотам $f_1 = 1500$ Гц; $f_2 = 4600$ Гц; $f_3 = 7900$ Гц, где фаза перескакивает с $+90^0$ на -90^0, оставаясь далее близкой к нулю до следующего корня.

4.9.

$$z = |z_p| e^{j\varphi};$$

$$tg\varphi = \frac{2}{ctgk\ell - 0,07k\ell};$$

$$r=\frac{0{,}07kl-\mathrm{ctg}\,kl}{\sqrt{4+(0{,}07kl-\mathrm{ctg}\,kl)^2}}\ .$$

Корни уравнения $(0{,}07kl-\mathrm{ctg}\,kl)=0$ соответствуют частотам $f_1\approx 1570$ Гц; $f_2\approx 4740$ Гц; $f_3\approx 8000$ Гц; при $f=f_n$; $r=0$; при $kl=n\pi$, $f=n\frac{c}{2l}$, $r=1$.

4.10. Выбрав $r_1=1$ мех.ом/см^2, получим $l=31{,}2$ см; $d=1{,}77$ см; $a=10{,}3$ см.

4.11. Модуль коэффициента отражения $r=|r_p|=1$;
$r_p=re^{j2\delta}$;

$$\mathrm{tg}\,2\delta=\frac{2\,\dfrac{\rho_1c_1\cos\beta}{\rho_2c_2\cos\alpha\,\mathrm{tg}(k_2l\cos\beta)}}{1+\left[\dfrac{\rho_1c_1\cos\beta}{\rho_2c_2\cos\alpha\,\cos(kl\cos\beta)}\right]^2}\ ;$$

$k_2l\cos\beta=1{,}13\cdot 10^{-3}$; в формуле α,β – углы падения и преломления; $k_2=\frac{2\pi f}{c}$. Угол $2\delta=0$ при $k_2l\cos\beta=\left(n+\frac{1}{2}\right)\frac{\pi}{2}$ и достигает значений $\pm\frac{\pi}{4}$, когда $1{,}13\cdot 10^{-3}f_m=m\pi\pm 2{,}46\cdot 10^{-4}$; $f_m=2780m\pm 0{,}22$ Гц.

4.12.

$$Z_1(0{,}25)=\frac{1}{2}\rho c(1+j);\quad Z_1(0{,}50)=\rho c(1-j);$$

$$Z_1(0{,}75)=\frac{1}{2}\rho c(1+j);\quad Z_1(1{,}00)=\rho c(1-j).$$

4.13.

$$\Delta L=20\lg\frac{5}{3}-20\lg\frac{1+\dfrac{(AkD_1)^2}{15}}{1+\dfrac{(AkD_1)^2}{25}}\ ,$$

где $A=\dfrac{\pi\frac{D_1}{D_2}}{8F}\approx 0{,}3$; $k=\dfrac{\omega}{c}$;

при $AkD_1\ll 1$, $D_1\ll 1$; $\Delta L=4{,}4$ дБ.

Раздел У

5.I. При заданной $\omega_{гр}$ и S произведение $L\ell\Sigma = \frac{4c^2}{\omega_{гр}^2}S$ и две из этих величин можно выбрать произвольно при ограничении сверху: $L, \ell, \Sigma \leqslant \frac{\lambda_{гр}}{10} = \frac{1700}{10} = 170 см$

Выбираем L = I40 см, ℓ = 35 см, тогда

Σ = 2,70.I0^4 = I65 X I65 см^2; f' = I,I7 $f_{гр}$ = 23,5 Гц.

5.2. A = 47,8 дБ; c' = 0,75c

5.3. $\Delta\varphi$ = 20 рад = II45^0.

5.4. N = 7,6 раз; A = I7,4 дБ; $f_{гр}$ = II60 Гц.

5.5.

$$r_p = \sqrt{\frac{(m-1)^2 + \frac{m^2}{\mathcal{F}^2}}{(m+1)^2 + \frac{m^2}{\mathcal{F}^2}}} = 0{,}66, \text{ где } \mathcal{F}\left(\tfrac{z_0}{R}\right) = \mathcal{F}(0{,}5) \approx 2{,}7 ,$$

$$A = 20\lg r = -3{,}6\,дБ.$$

5.6.

$$r = \frac{1}{2}\frac{\beta}{\sqrt{1+\frac{1}{4}\beta^2}} ; \; A = 10\lg(1+\tfrac{1}{4}\beta^2), \; \beta = \frac{f}{f_0}, \; f_0 = 550\,Гц.$$

5.7. β = 0,022; D = 20,4 см; a_0 = 0,044 см.

5.8.

$$r_p = \frac{j\beta - 1}{j\beta + 1} = re^{j\varphi}; \; r = |r_p| = 1; \; tg\varphi = \frac{2\beta}{\beta^2 - 1} ,$$

где

$$\beta = \left(\frac{\sigma\, \ell_{экв}}{SL}\right)kL - ctg\,kL ,$$

$$\ell_{экв} \approx \frac{\pi}{2\mathcal{F}\left(\frac{z_0}{R}\right)} \approx \frac{\pi}{4} ;$$

$$-\frac{\pi}{2} < tg\varphi < \frac{\pi}{2} , \text{ при } kL \ll 1; \; \varphi = -2kL$$

5.9. Зная $f_{гр}$, определим $l_{экв} = 377$, где $l_{экв}$ - длина трубок диаметра d_0 между камерами расширения; L и S - длина и сечение камер ($SL=V$). Величины L и $l_{экв}$ должны быть меньше $\frac{\lambda_{экв}}{8} = 68$ см. Выбираем $L = 8$ см; $l_{экв} = 2,95$ см, $S = 16$ см^2 с некоторым приближением так, чтобы $l_{экв}SL = 377$; $l = l_{экв} - 2.0,64 r_0 = 2,95 - 0,64 = 2,31$ см; $\tau = 0,637$ мс; скорость звука $c' = 1570$ см/с.

5.10.

$$Cth(b+ja) = 1 - \frac{\pi D^2 \cdot kl \cdot tg kL}{8dl\mathcal{F}(\frac{d}{D})}; \quad \mathcal{F}\left(\frac{d}{D}\right) \approx 1,38,$$

$$Ch(\beta+ja) = 1 - 1,6 kL tg kL.$$

Первая полоса непропускания лежит между $Ch\Gamma_1 = -1$ и $Ch\Gamma_2 = +1$; $k_1L = 0,93$, $f_1 = 510$ Гц; $k_2L = \pi$; $f_2 = 1700$ Гц. Для второй полосы непропускания $f_3 < f < f_4$; $f_3 = 1915$ Гц; $f_4 = 3440$ Гц.

5.11.

$$\omega_0 = c\sqrt{\frac{S}{lL}} = 590 \text{ гц}; \quad f_0 = 94 \text{ гц};$$

концевая поправка дает $f_0' = 82$ Гц.

5.12. $f_0 = 25$ Гц; $Q = 177$.

5.13. $f_0 = 21,5$ Гц; $Q = 540$.

5.14. $f_0 = 77$ Гц.

5.15. $f_0 = 170$ Гц; $Q = 6,4$.

5.16. $f_0 = 62$ Гц; действующая сила $35,6.10^3$ дн; импеданс $1,19.10^5$ дн.с/см^3, амплитуда колебаний при 100 Гц $a_0 = 4,75.10^{-4}$ см.

5.17. Упругость объема V на два порядка меньше упругости мембраны и ей можно пренебречь

$$f_0=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{E_э}{M_э}}\,,\quad E_э=5{,}02\,\frac{E_{ю}d^3}{r_0^2(1-\mu^2)}\,,\quad \mu=0{,}28\,,$$

$$M_{экв}=0{,}183\pi r_0^2 d\rho\,,\quad \rho=7{,}8\,,\quad f_0=1590\ Гц$$

5.18.

$$\frac{r_1}{r_0}=\sqrt[3]{\frac{3Q^2}{2\pi}}\,;\quad r_0=\frac{c}{Qf_{рез}}\,,$$

При $f_{рез}=100$; 200, 400, 800 Гц получим соответственно $r_0=3{,}4$ см; $r_0=1{,}7$ см; $r_0=0{,}85$ см; $r_0=0{,}425$ см.

5.19. Резонансные частоты в гелии для гласных "у" и "и" будут соответственно 1450; 2660 и 1450, 5900. Гласные "у" и "и" будут совершенно неузнаваемы.

5.20. $c_{200}=442$ м/с; $c_{-170}=221$ м/с.

5.21. $f_0'=316 f_0$; где $f_0=340$ Гц;
$f_0'=107\cdot10^3$ Гц = 107 кГц; силы поверхностного натяжения почти не влияют.

5.22.

$$tg\,k(L-l)+tg\,kl=-\frac{V}{Sl}kl\,,$$

при $l=\frac{L}{2}$, $\quad tg\,kl=-\frac{V}{2Sl}kl\,;$

$$k_1 l\approx\pi-\alpha\,;\quad \alpha\approx\frac{\pi}{16}\,,\quad f_1\approx\frac{c}{2l}\left(1-\frac{1}{16}\right)=1620\ Гц$$

Раздел УI

6.I. Привести таблицу $\mathcal{J}(\vartheta)$ и начать диаграмму направленности.

6.2. $\mathcal{J} = 0{,}788 \frac{\text{эрг}}{\text{см}^2 \text{с}}$; $L = 124{,}7$ дБ; $p_e = 347$ бар.

6.4.

$$\mathcal{J}(\vartheta) = \frac{\rho c\, P_2^2(\vartheta)}{(kr)^2 D_2^2(kr_0)}; \quad D_2(kr_0) = \frac{9}{(kr_0)^2};$$

$$\Pi = \frac{4\pi r_0^2 \rho c (kr_0)^2}{90} u_0^2 = 0{,}12 \frac{\text{эрг}}{\text{с}}$$

6.5. $\Pi(6) = 300$ эрг/с; $\frac{\mathcal{J}(0)}{\mathcal{J}(\pi)} = 1{,}1$,

$\Pi(1000) = 0{,}7 \cdot 10^6$ эрг/с, $\frac{\mathcal{J}(0)}{\mathcal{J}(\pi)} = 1{,}54$

6.6.

$$\mathcal{J}(\vartheta) = \frac{\rho c A_0^2}{2(kr)^2}(kr_0)^4\left[1 + \frac{5}{18}P_2(\vartheta)(kr_0)^2 - \frac{1}{24}P_2^2(\vartheta)(kr_0)^4\right],$$

характеристика направленности $\Psi(\vartheta) = 0{,}93\left[1 + \frac{5}{18}P_2(\vartheta)(kr_0)^2\right]$

при $\vartheta = 0$, $\Psi(0) = 1$; при $\vartheta = 55^0$, $\Psi(55^0) = 0{,}93$;

при 90^0, $\Psi(90^0) = 0{,}89$.

6.7. $\mathcal{N} = 2{,}43$

6.8. $\mathcal{N} = 2{,}65$.

6.9.

$$\mathcal{J} = \frac{1}{2}\,\frac{\rho\omega^2(2\pi r_0^2)A_1^2}{4\pi c}\left[\frac{\frac{5}{36}(kr_0)^4 \cos^2 2\psi \sin^4\vartheta}{4\pi r^2}\right].$$

6.10. $F_0 = 13{,}2 \cdot 10^6$ дн $= 13{,}5$ кГ.

6.II. $\frac{\mathcal{J}(0)}{\mathcal{J}(\pi)} = 4{,}27$.

6.I2.

$$\Psi(\varphi)=\frac{\sin\frac{ka\sin\varphi}{2}}{\frac{ka\sin\varphi}{2}}.$$

ka	f кГц	$\varphi_{min}\ (J=0)$	$\varphi'_{n\,max}$
6	7,I5	—	$\varphi'_1=0^0$
I0	II,9	$\varphi_1=39^0$	$\varphi'_1=90^0$
20	23,8	$\varphi_1=18,3^0$; $\varphi_2=29^0$; $\varphi_3=90^0$;	$\varphi'_1=0^0$; $\varphi'_2=20,5^0$ $\varphi'_3=50,5^0$

6.I3. $\omega_0=\frac{c}{r}\sqrt{\frac{3\bar{\varkappa}}{\varkappa}}=2{,}2\cdot10^3$. Q независимо от размера пузырька. $Q=\sqrt{\frac{3\bar{\varkappa}}{\varkappa}}=68$.

Раздел УП

7.I. а) Предельная дальность 205 км; б) $\theta_1 = 12^0$; $\theta_2 = 22^0$; $\theta_3 = 33{,}5^0$; в) $\theta' \approx 15{,}6^0$; предельная дальность 26 км.

7.2. 5,35 км.

7.3. Во всех трех случаях $p_e = 0{,}1$ бар(эфф.).

7.4. $Q_0 = \sqrt{1{,}33}$ см^3/с.

7.5. I9,8 бар(эфф.) и 4,95 бар(эфф.).

7.6. а) 260 м; б) 239 м.

7.7. а) Локация возможна на боковых лучах, углы которых с осью излучателя $tg\,\vartheta > tg\,\vartheta_0 = \frac{b}{a}$; для луча, осуществляющего локацию, $tg\,\vartheta = \frac{2h}{r_1}$; б) Локация возможна при $\Pi \geqslant 184$ Вт.

7.8. 36 Вт.

7.9. Условие выполняется при $x = 7{,}7$; $\Delta t = 134$ мс

при $x = 15{,}6$; $\Delta t = 292$ мс.

7.I0. Давление в центре диафрагмы I0; 20; 40; 80 бар; частота 5, I0, I5 и 20 кГц.

7.II. $r_2 = \left(\frac{4 r_1}{D}\right)^{\frac{1}{3}} = 5{,}8$ м.

7.I2. а) 440 м; б) 320 м.

7.I3. а) 330 м; б) 720 м.

Содержание

Сергей Николаевич Ржевкин

Задачи по терии звука

Редактор Р.Д. Солод.
Художественный редактор Н.Ю.Калмыкова.
Заказная.

Подписано к печати 10/8-1976 г.
Л.-53684. Формат 60х90/I6
Бумага тип.№ 3
Усл.печ.л.3,25+2 вкл.(0,375 п.л.)
Уч.-изд.л.3,03
Зак.2232 Тираж 350 экз.
Цена I8 коп.

Издательство
Московсого университета
Москва,К-9,ул.ГЕРЦЕНА, 5/7
Типография Изд-ва МГУ
Москва,Ленинские горы.

Импеданс-диаграмма

Коэффициент поглощения $\alpha = \frac{4}{N+2+\frac{1}{N}}$. Цифры на окружности равной фазы (δ) означают $\frac{\delta}{\pi}$ при $\mathcal{J}_1 > 0$; $1+\frac{\delta}{\pi}$ при $\mathcal{J}_1 < 0$. Цифры на окружности равного поглощения означают $20 \lg_{10} N = 20 \lg_{10} \frac{p_{max}}{p_{min}}$