Частицы воздуха в звуковой волне

Звуковое давление

– разность между
мгновенным значением полного давления
в данной точке звукового поля
и средним атмосферным давлением
(наблюдаемым в среде
при отсутствии звукового поля)

$$p, \text{Па}$$

Звуковое давление, создаваемое чистым тоном

$$p = p_{\max} \sin(2\pi f \cdot t + \varphi_0)$$

В плоской бегущей волне

$$\frac{p}{v} = \rho \cdot v_{звука} \qquad p = \rho \cdot v_{звука} \cdot v$$

p – *эффективное значение звукового давления*

v – *среднеквадратичное значение колебательной скорости частиц*

$$v = A\omega \cos \omega t = v_{\max} \cos \omega t$$

ρ – *плотность воздуха*

$v_{звука}$ – *скорость распространения звука*

$\rho \cdot v_{звука}$ – *акустическое сопротивление среды*

Интенсивность звука

– энергия звуковой волны,
переносимая за единицу времени
через единицу площади поверхности,
нормальной к направлению
распространения звуковой волны

$$I, \text{Вт/м}^2$$

При любом фронте волны для свободного звукового поля интенсивность звука

$$I = \frac{p^2}{\rho \cdot v_{звука}}$$

Интенсивность звука пропорциональна квадрату звукового давления

Плотность звуковой энергии

– энергия, содержащаяся
в единице объема звукового поля

$$w, \text{Дж/м}^3$$

При распространении продольной плоской волны плотность звуковой энергии

$$w = \frac{p^2}{\rho \cdot v_{звука}^2}$$

Звуковая мощность источника

– звуковая энергия,

излучаемая в единицу времени

$$P, \text{Вт}$$

Звуковая мощность P, Вт

- Разговор 10^{-5}
- Наибольшая мощность человеческого голоса $2\ 10^{-3}$
- Фортепиано $2\ 10^{-3}$
- Труба 0,3
- Автосигнал 5
- Громкоговоритель 10^{2}
- Сирена $3\ 10^{3}$
- Реактивный двигатель 10^{4}
- Ракетный двигатель 10^{6}

Интенсивность звука и звуковая мощность источника связаны соотношением

$$I = \frac{P}{S}$$

I – интенсивность звука, P – звуковая мощность, S – площадь фронта волны

При распространении сферической волны в среде без поглощения

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

Смещение частиц

$$\varsigma(r,t) = \frac{A_0}{r}\cos(\omega(t - \frac{r}{v}))$$

В однородной среде поглощение волн обусловлено внутренним трением

$$A(x) = A_0 e^{-\alpha x} \qquad I(x) = I_0 e^{-2\alpha x}$$

α *- линейный коэффициент поглощения волн,*

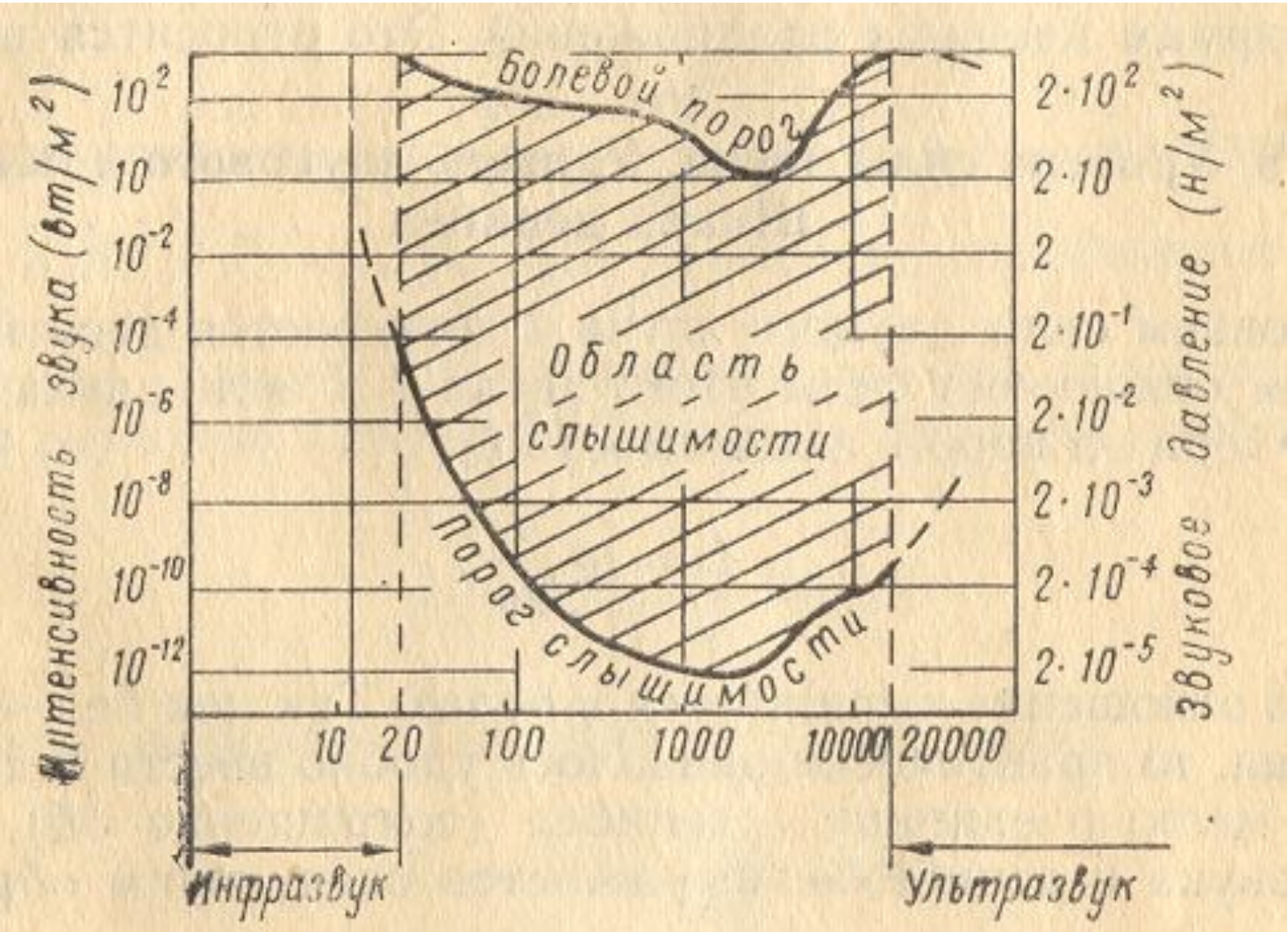
зависящий от свойств среды и частоты волны

Фактор направленности

– отношение интенсивности звука I,
создаваемой источником
в данной точке звукового поля,
к интенсивности $I_{сфера}$, которую имел бы
источник такой же мощности,
равномерно излучающий звук
по всем направлениям (в сферу)

$$\Phi = \frac{I}{I_{сфера}}$$

Область слышимости



Уровень интенсивности звука

$$L_I = \lg \frac{I}{I_0} \quad \text{(Б)}$$

$$L_I = 10 \lg \frac{I}{I_0} \quad \text{(дБ)}$$

Уровень звукового давления

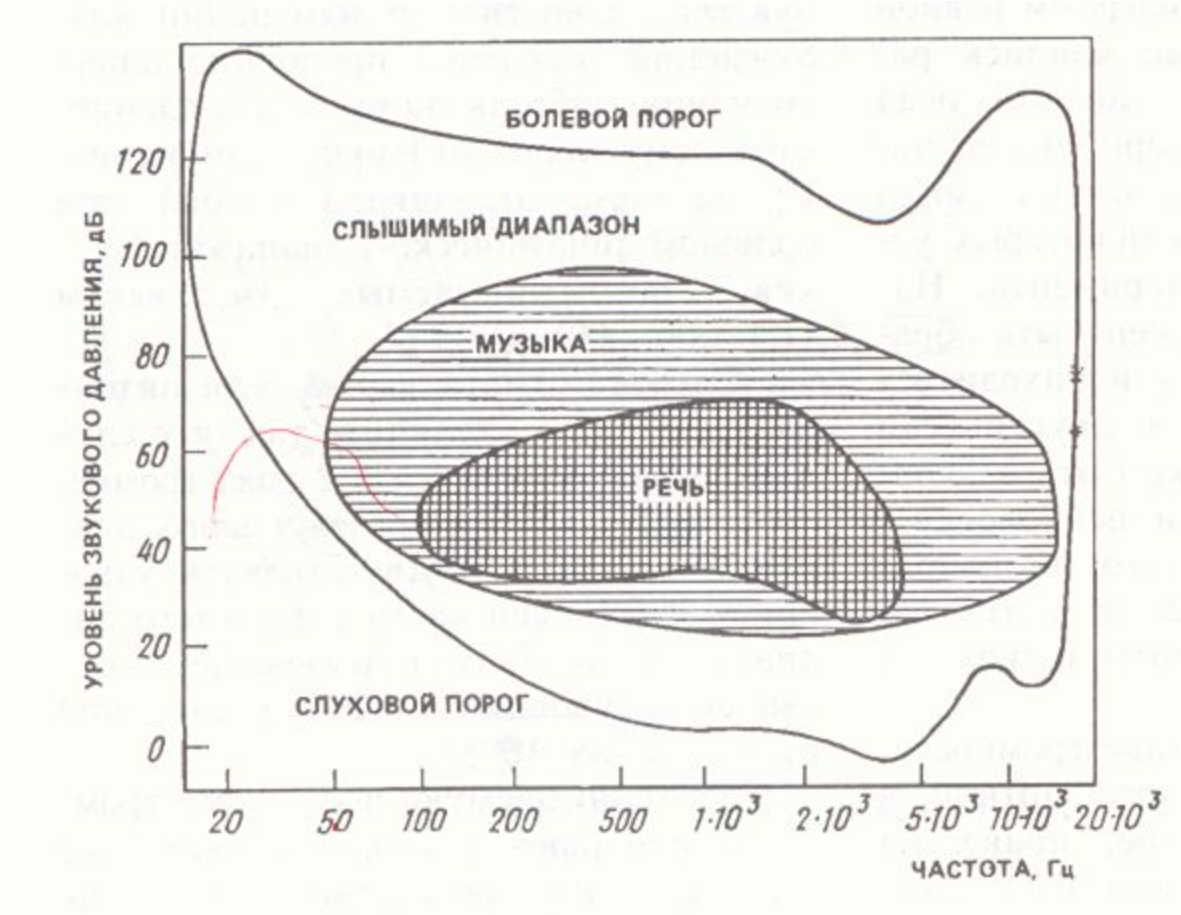
$$L_p = 2\lg\frac{p}{p_0} \text{ (Б)}$$

$$L_p = 20\lg\frac{p}{p_0} \text{ (дБ)}$$

$$L_I = 10\lg\frac{I}{I_0} = 10\lg\frac{p^2}{p_0^2} = 20\lg\frac{p}{p_0} = L_p$$

дБ
уровень звука
140
120
100
80
60
40
20
0
Болевой порог
Порог слышимости
20
63
250
1000
4000
16000 Гц

Область слышимости



Уровни звука в дБ

Таблица 1

Характер и источники шума	Уровень интенсивности шума относительно $I_0 = 10^{-12}$ *вт/м*, *дб*
Порог слышимости	0
Шепот на расстоянии 1 *м*	20—30
Тихая музыка по радио	40—50
Тихая речь (расстояние 1 *м*)	50
Громкая речь (расстояние 1 *м*)	70
Шум на улице	70—80
Оркестровая музыка (фортиссимо)	100—110
Шум реактивного двигателя самолета (расстояние 3 *м*)	120—130
Болевой порог	130

$$L_1 - L_2 = 10\lg\frac{I_1}{I_0} - 10\lg\frac{I_2}{I_0} = 10\lg\frac{I_1/I_0}{I_2/I_0} = 10\lg\frac{I_1}{I_2}$$

$$\frac{I_1}{I_2} = 2 \Rightarrow L_1 - L_2 = 10\lg 2 = 3\ \text{дБ}$$

$$\frac{I_1}{I_2} = 1{,}26 \Rightarrow L_1 - L_2 = 10\lg 1{,}26 = 1\ \text{дБ}$$

Уровень звуковой мощности источника

$$L_P = \lg \frac{P}{P_0} \quad \text{(Б)}$$

$$L_P = 10 \lg \frac{P}{P_0} \quad \text{(дБ)}$$

Показатель направленности излучения звука источником

$$ПН = L - \overline{L} = 10\lg\Phi$$

$$L - \overline{L} = 10\lg\frac{I}{I_0} - 10\lg\frac{I_{сфера}}{I_0} = 10\lg\frac{I}{I_{сфера}} = 10\lg\Phi$$

Сложение уровней интенсивности звука

$$L = 10\lg\frac{I}{I_0} = 10\lg\frac{I_1 + I_2 + \ldots}{I_0} = 10\lg\left(\frac{I_1}{I_0} + \frac{I_2}{I_0} + \ldots\right)$$

$$L_1 = 10\lg\frac{I_1}{I_0} \quad \Rightarrow \quad \lg\frac{I_1}{I_0} = 0{,}1L_1, \quad \frac{I_1}{I_0} = 10^{0{,}1L_1}$$

$$L = 10\lg\left(10^{0{,}1L_1} + 10^{0{,}1L_2} + \ldots\right)$$

$$L = 10\lg\sum_{i=1}^{n} 10^{0{,}1L_i}$$

$$L = 10\lg(10^{0,1L_1} + 10^{0,1L_2} + \ldots)$$

$$L = 10\lg\sum_{i=1}^{n} 10^{0,1L_i}$$

При совместном действии n одинаковых независимых равноудаленных источников

$$L = 10\lg\frac{nI_1}{I_0} = 10\lg\frac{I_1}{I_0} + 10\lg n = L_1 + 10\lg n$$

при $n = 2$

$$L = L_1 + 10\lg 2 = L_1 + 3 \text{ дБ}$$

Таблица 1

Сложение уровней звукового давления

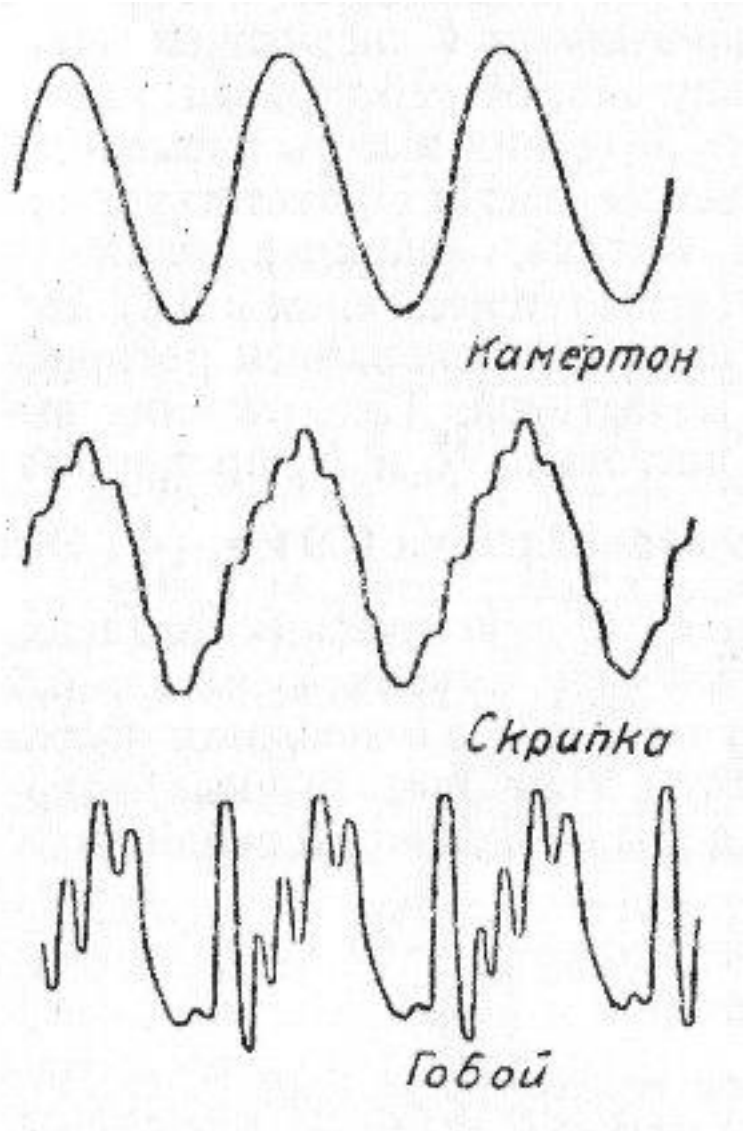
Показатели	Значения показателей												
Разность двух складываемых уровней, дБ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20
Добавка к более высокому уровню для получения суммарного уровня, дБ	3	2,5	2	1,8	1,5	1,2	1	0,8	0,6	0,5	0,4	0,2	0

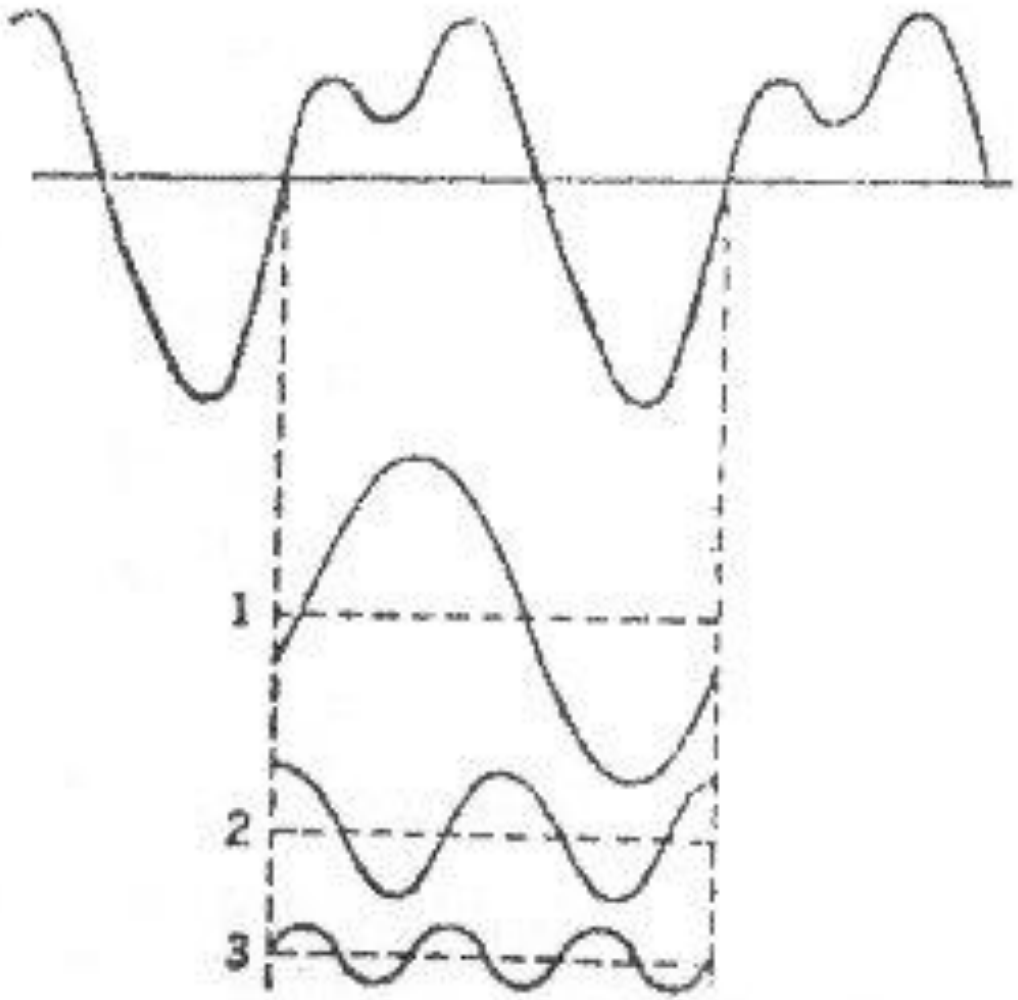
Физиологические характеристики звука

- Высота
- Тембр (окраска звучания)
- Громкость

дБ
уровень звука
140
120
100
80
60
40
20
0
Болевой порог
Порог слышимости
20
63
250
1000
4000
16000 Гц

Формы звуковых волн одинаковой высоты и громкости





Фиг. 19. Сложение трех синусоидальных гармонических движений с кратными частотами (D. C. Miller).

- Частота 100 Гц, звуковая мощность 0,25 Вт
- Частота 1000 Гц, звуковая мощность 0,02 Вт

– звуки кажутся слушателю **равногромкими**

Уровень громкости какого-либо звука (в фонах)

численно равен

уровню звукового давления (в дБ)

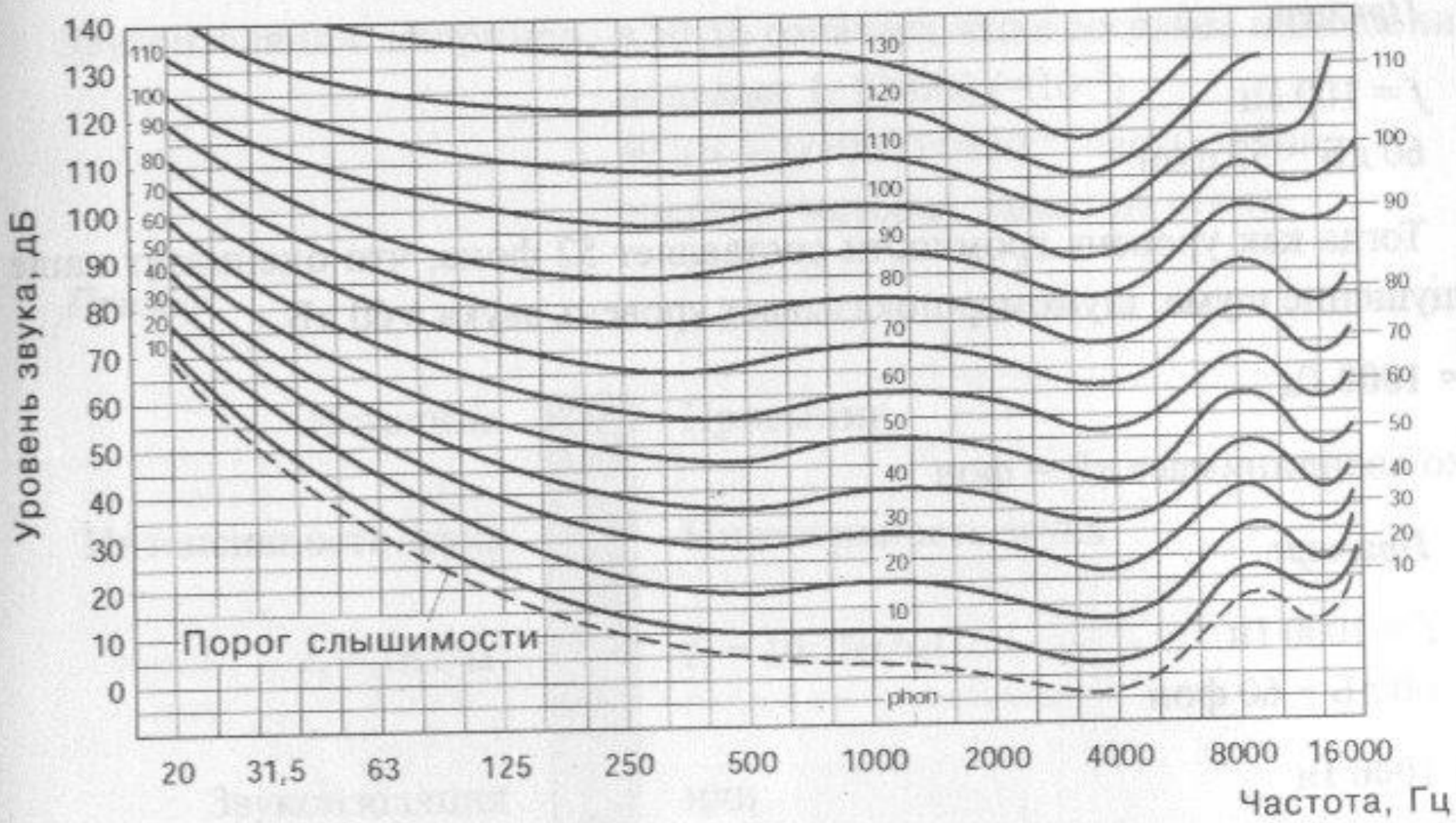
равногромкого эталонного звука (тона 1000 Гц)

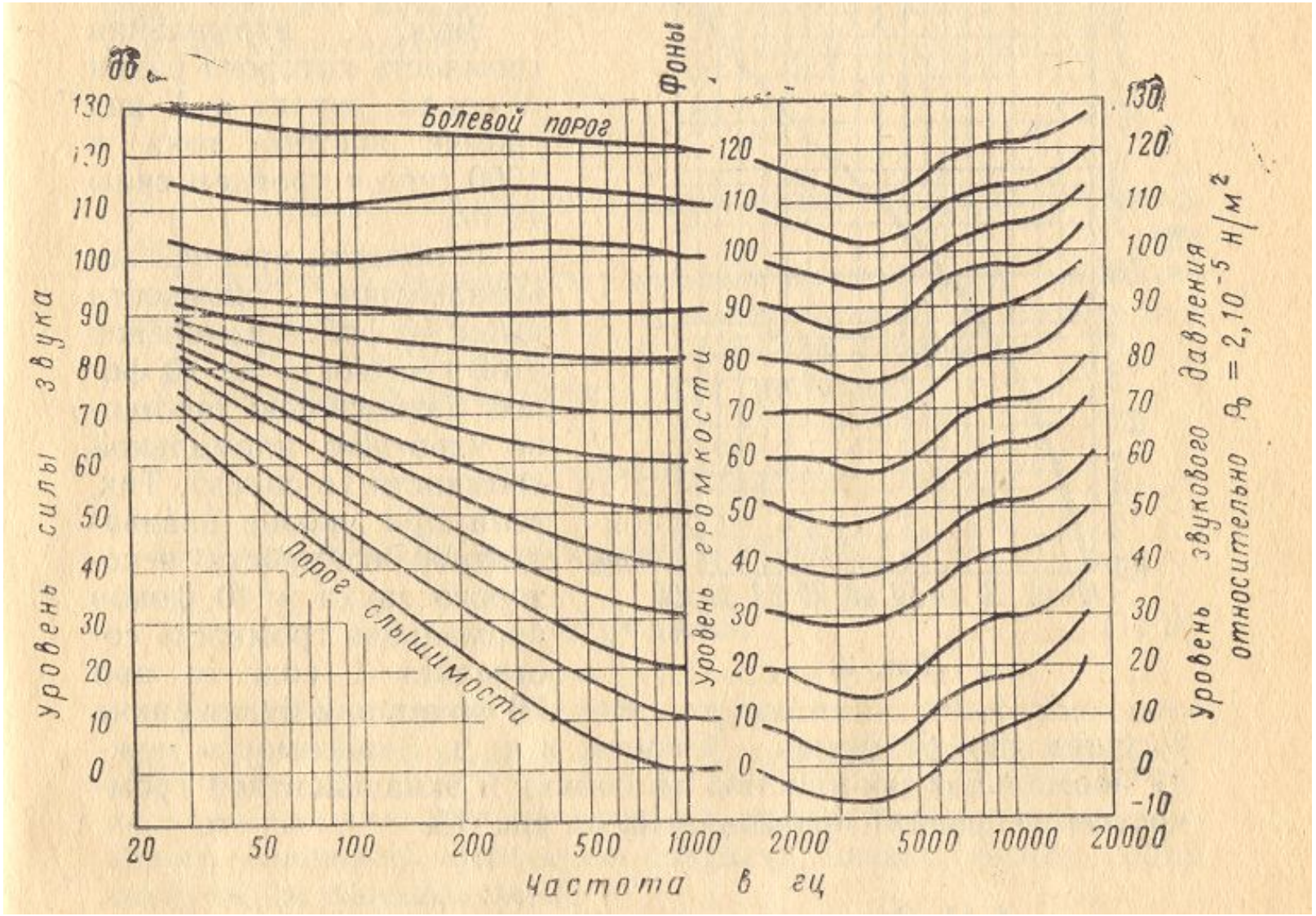
Кривая равной громкости

– геометрическое место точек, изображающих тоны различных частот с одинаковым уровнем громкости

(равногромкие звуки различных частот)

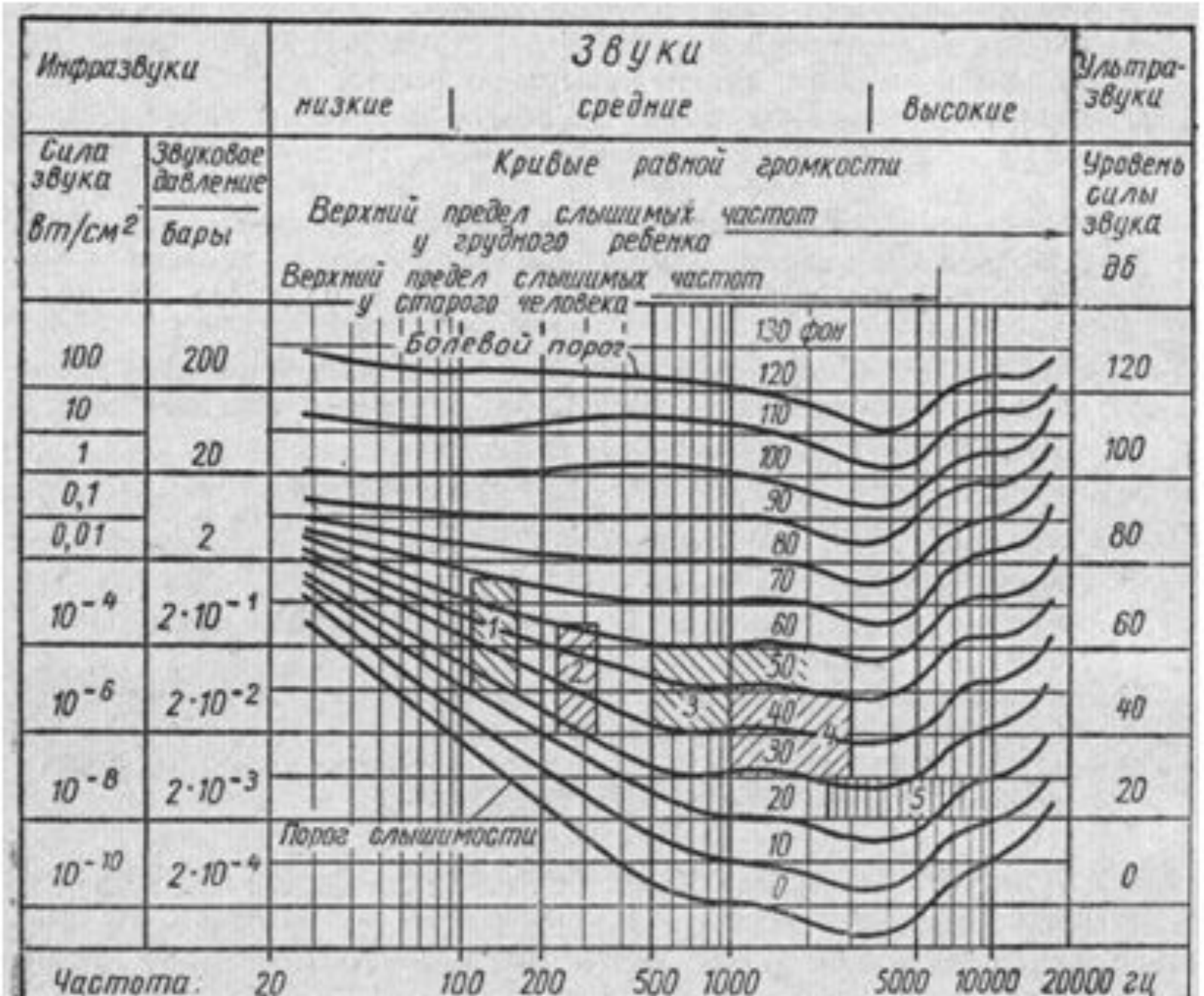
Кривые равной громкости




дб
Фоны
Болевой порог
Порог слышимости
Уровень силы звука
Уровень громкости
Уровень звукового давления относительно $p_0 = 2,10^{-5}$ Н/м²
Частота в гц
130
120
110
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
-10
20
50
100
200
500
1000
2000
5000
10000
20000

ВЫВОДЫ

- Чувствительность уха возрастает с увеличением частоты звука
- В области частот 500 - 2000 Гц уровень звукового давления (дБ) и уровень громкости (фоны) численно совпадают
- При повышении интенсивности звука различие в чувствительности уха к различным частотам становится менее заметным


Инфразвуки
Звуки
низкие
средние
высокие
Ультра-звуки
Сила звука вт/см²
Звуковое давление бары
Кривые равной громкости
Верхний предел слышимых частот у грудного ребенка
Верхний предел слышимых частот у старого человека
Уровень силы звука дб
Болевой порог
Порог слышимости
130 фон
120
110
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
1
2
3
4
5
100
10
1
0,1
0,01
10⁻⁴
10⁻⁶
10⁻⁸
10⁻¹⁰
200
20
2
2·10⁻¹
2·10⁻²
2·10⁻³
2·10⁻⁴
120
100
80
60
40
20
0
Частота: 20 100 200 500 1000 5000 10000 20000 гц

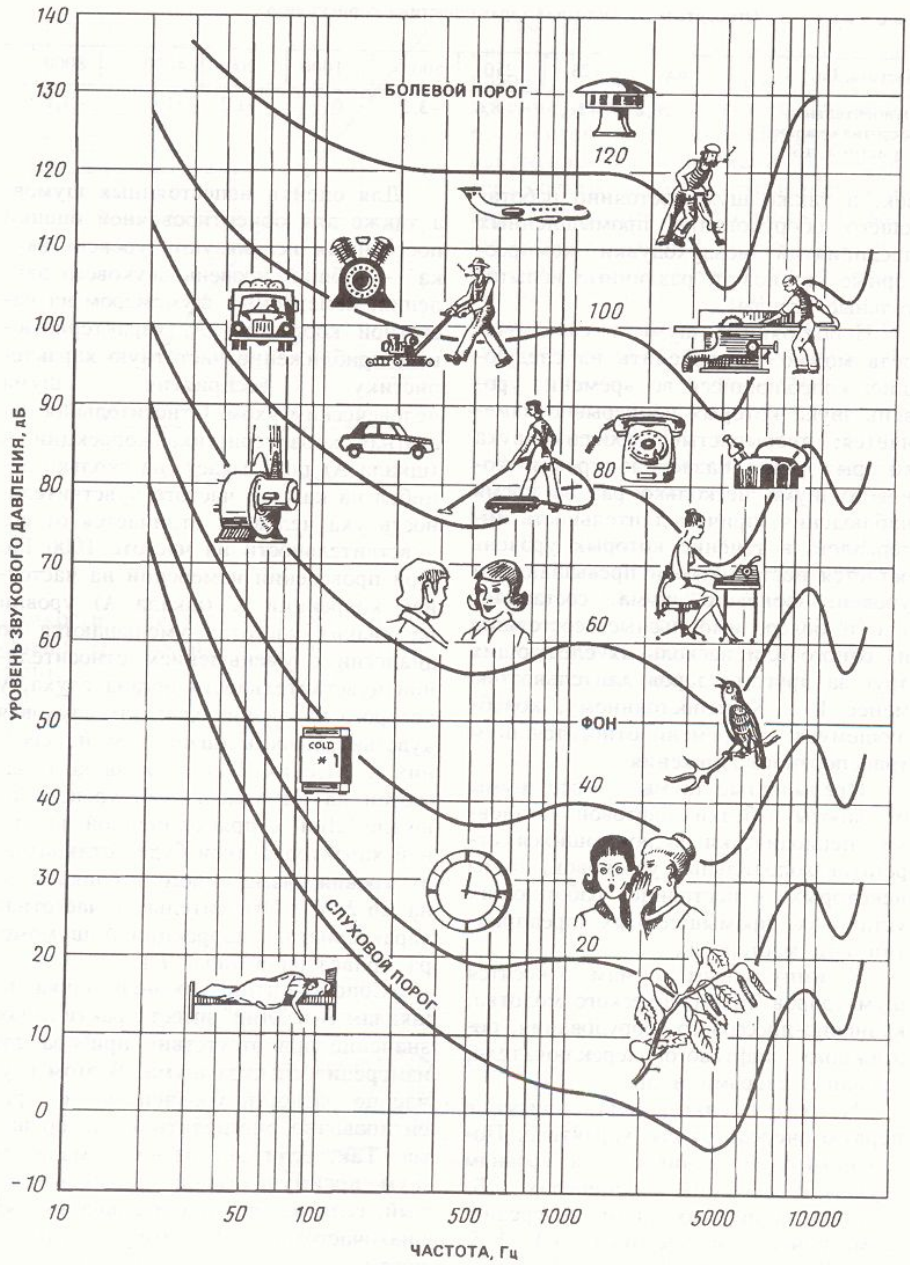


Рис. 7.10. Распределение

	Фоны в дБ (А)	Процесс		*Ощущения*
	20	Тиканье тихих часов, легкий шелест листвы, спокойная комната ночью		Очень тихо
Ступени шума	30	Шелест листьев, шепот, разговор соседей, еле понятный		Тихо
1	40	Близкий шепот, средние шумы в жиль		Почти тихо
	50	Разговор		Умеренно громко
	60	Шум в бюро, ресторане, магазине		Умеренно громко
2	70	Громкий разговор, громкое радио, крик		Громко
	80	Уличный шум при сильном движении		Громко
	90	Шумный производственный цех, автосигнал		От громкого до непереносимого
3	100	Отбойный молоток, маленький самолет		
	110	Штамповочно-котельное производство, громкая музыка, сигнал машины скорой помощи		
4	≥120	Реактивный двигатель, двигатель ракеты		

Субъективному ощущению
удвоения громкости звука
соответствует
увеличение уровня звукового давления
на 10 дБ

Шкала громкости в сонах

- Громкость в 1 сон имеет звук
  с уровнем громкости 40 фон
- Удвоение громкости звука в сонах
  эквивалентно изменению
  уровня громкости звука на 10 фон
  (эквивалентно изменению
  уровня звукового давления на 10 дБ)

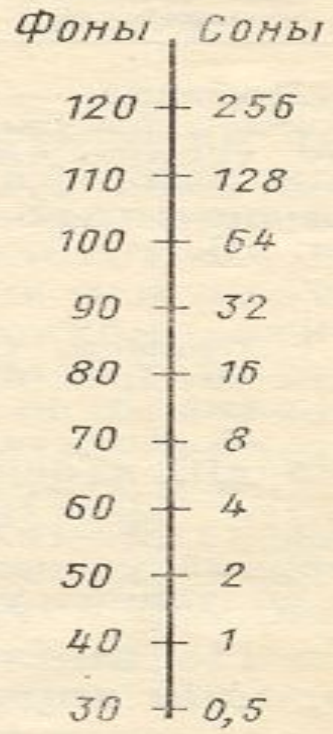


Рис. 7. Зависимость между уровнями громкости (в фонах) и громкостью (в сонах)

Таблица 7.1. Относительная частотная характеристика коррекции А

Частота, Гц	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Относительная частотная характеристика, дБ	–26,2	–16,1	–8,6	–3,2	0	+1,2	+1,0	–1,1

По характеру спектра

- Широкополосные шумы
- Тональные шумы

По положению максимума уровня звукового давления на спектре

- Низкочастотные шумы (до 300 Гц)
- Среднечастотные шумы (300 – 800 Гц)
- Высокочастотные шумы (выше 800 Гц)

По временным характеристикам

- Постоянные шумы

  (уровень звука изменяется во времени не более чем на 5 дБА)

- Непостоянные шумы

  (уровень звука изменяется во времени более чем на 5 дБА)

Непостоянные шумы

- **Колеблющиеся во времени**

  уровень звукового давления непрерывно изменяется

  (шум транспорта)

- **Прерывистые шумы**

  уровень звукового давления падает до фонового значения, но длительность интервалов,

  в течение которых шум постоянен более 1 секунды

  (шум лифта, холодильника)

- **Импульсные шумы**

  удары длительностью менее 1 секунды

  (хлопанье дверями, кузнечное оборудование)

В случае постоянного шума

нормируются уровни звукового давления

***L*, дБ**

в октавных полосах частот

31,5; 63; 125; 250; … 8000 Гц

В случае непостоянных шумов

нормируется

эквивалентный (по энергии)

уровень звука в дБА

$$L_{\text{А } экв}, \text{ дБА}$$

Эквивалентный (по энергии) уровень звука в дБА $_{экв}$

– уровень постоянного широкополосного шума,

связанный с изменяющимся уровнем непостоянного шума соотношением

$$L_{A\ экв} = 10\lg\frac{1}{T}\int_0^T 10^{0,1L_A}\,dt$$

L_A - изменяющийся во времени уровень звука непостоянного шума в дБА

T - время наблюдения

t - текущее время

Источники бытового шума **Уровень шума, дБА**

- Музыкальный центр 85
- Телевизор 70
- Разговор (спокойный) 65
- Детский плач 78
- Работа пылесоса 75
- Работа стиральной машины 68
- Работа холодильника 42
- Работа электробритвы 60
- Вытекающая из крана вода 44-50
- Наполнение ванны 36-58
- Наполнение бачка в санузле 40-67
- Приготовление пищи на плите 35-42
- Перемещения лифта 34-42
- Стук закрываемой двери лифта 44-52
- Стук закрываемого мусоропровода 42-58

В случае прерывистого и импульсного шума

Определяют эквивалентные (по энергии) уровни звукового давления

$$L_{экв}, \text{ дБ}$$

в октавных полосах частот

31,5; 63; 125; 250; … 8000 Гц

Таблица 1

Назначение помещений или территорий	Время суток, ч	Уровень звукового давления (эквивалентный уровень звукового давления) L, дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровень звука L_A (эквивалентный уровень звука $L_{Аэкв}$), дБА	Максимальный уровень звука $L_{Амакс}$, дБА
		31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
1 Рабочие помещения административно-управленческого персонала производственных предприятий, лабораторий, помещения для измерительных и аналитических работ	—	93	79	70	63	58	55	52	50	49	60	70
2 Рабочие помещения диспетчерских служб, кабины наблюдения и дистанционного управления с речевой связью по телефону, участки точной сборки, телефонные и телеграфные станции, залы обработки информации на ЭВМ	—	96	83	74	68	63	60	57	55	54	65	75
3 Помещения лабораторий для проведения экспериментальных работ, кабины наблюдения и дистанционного управления без речевой связи по телефону	—	103	91	83	77	73	70	68	66	64	75	90
4 Помещения с постоянными рабочими местами производственных предприятий, территории предприятий с постоянными рабочими местами (за исключением работ, перечисленных в поз. 1—3)	—	107	95	87	82	78	75	73	71	69	80	95
5 Палаты больниц и санаториев	7.00—23.00 23.00—7.00	76 69	59 51	48 39	40 31	34 24	30 20	27 17	25 14	23 13	35 25	50 40
6 Операционные больниц, кабинеты врачей больниц, поликлиник, санаториев	—	76	59	48	40	34	30	27	25	23	35	50
7 Классные помещения, учебные кабинеты, аудитории учебных заведений, конференц-залы, читальные залы библиотек, зрительные залы клубов и кинотеатров, залы судебных заседаний, культовые здания	—	79	63	52	45	39	35	32	30	28	40	55

Продолжение таблицы 1

Назначение помещений или территорий	Время суток, ч	Уровень звукового давления (эквивалентный уровень звукового давления) L, дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровень звука L_A (эквивалентный уровень звука $L_{Аэкв}$), дБА	Максимальный уровень звука $L_{Амакс}$, дБА
		31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
8 Жилые комнаты квартир												
- в домах категории А	7.00—23.00	76	59	48	40	34	30	27	25	23	35	50
	23.00—7.00	69	51	39	31	24	20	17	14	13	25	40
- в домах категорий Б и В	7.00—23.00	79	63	52	45	39	35	32	30	28	40	55
	23.00—7.00	72	55	44	35	29	25	22	20	18	30	45
9 Жилые комнаты общежитий	7.00—23.00	83	67	57	49	44	40	37	35	33	45	60
	23.00—7.00	76	59	48	40	34	30	27	25	23	35	50
10 Номера гостиниц:												
категории А	7.00—23.00	76	59	48	40	34	30	27	25	23	35	50
	23.00—7.00	69	51	39	31	24	20	17	14	13	25	40
» Б	7.00—23.00	79	63	52	45	39	35	32	30	28	40	55
	23.00—7.00	72	55	44	35	29	25	22	20	18	30	45
» В	7.00—23.00	83	67	57	49	44	40	37	35	33	45	60
	23.00—7.00	76	59	48	40	34	30	27	25	23	35	50
11 Жилые помещения домов отдыха, пансионатов, домов-интернатов для престарелых и инвалидов, спальные помещения детских дошкольных учреждений и школ-интернатов	7.00—23.00	79	63	52	45	39	35	32	30	28	40	55
	23.00—7.00	72	55	44	35	29	25	22	20	18	30	45
12 Помещения офисов, рабочие помещения и кабинеты административных зданий, конструкторских, проектных и научно-исследовательских организаций:												
категории А	—	83	67	57	49	44	40	37	35	33	45	60
категорий Б и В		86	71	61	54	49	45	42	40	38	50	65
13 Залы кафе, ресторанов, фойе театров и кинотеатров:												
категории А	—	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50	60
категорий Б и В		89	75	66	59	54	50	47	45	43	55	65

Окончание таблицы 1

Назначение помещений или территорий	Время суток, ч	Уровень звукового давления (эквивалентный уровень звукового давления) L, дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровень звука L_A (эквивалентный уровень звука $L_{Аэкв}$), дБА	Максимальный уровень звука $L_{Амакс}$, дБА
		31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
14 Торговые залы магазинов, пассажирские залы вокзалов и аэровокзалов, спортивные залы	—	93	79	70	63	58	55	52	50	49	60	70
15 Территории, непосредственно прилегающие к зданиям больниц и санаториев	7.00—23.00 23.00—7.00	86 79	71 63	61 52	54 45	49 39	45 35	42 32	40 30	38 28	50 40	65 55
16 Территории, непосредственно прилегающие к жилым зданиям, домам отдыха, домам-интернатам для престарелых и инвалидов	7.00—23.00 23.00—7.00	90 83	75 67	66 57	59 49	54 44	50 40	47 37	45 35	44 33	55 45	70 60
17 Территории, непосредственно прилегающие к зданиям поликлиник, школ и других учебных заведений, детских дошкольных учреждений, площадки отдыха микрорайонов и групп жилых домов		90	75	66	59	54	50	47	45	44	55	70

Примечания

1 Допустимые уровни шума в помещениях, приведенные в поз. 1,5 — 13, относятся только к шуму, проникающему из других помещений и извне.

2 Допустимые уровни шума от внешних источников в помещениях, приведенные в поз. 5—12, установлены при условии обеспечения нормативного воздухообмена, т.е. при отсутствии принудительной системы вентиляции или кондиционирования воздуха, должны выполняться при условии открытых форточек или иных устройств, обеспечивающих приток воздуха. При наличии систем принудительной вентиляции или кондиционирования воздуха, обеспечивающих нормативный воздухообмен, допустимые уровни внешнего шума у зданий (поз. 15—17) могут быть увеличены из расчета обеспечения допустимых уровней в помещениях при закрытых окнах.

3 При тональном и (или) импульсном характере шума допустимые уровни следует принимать на 5 дБ (дБА) ниже значений, указанных в таблице 1.

4 Допустимые уровни шума от оборудования систем вентиляции, кондиционирования воздуха и воздушного отопления, а также от насосов систем отопления и водоснабжения и холодильных установок встроенных (пристроенных) предприятий торговли и общественного питания следует принимать на 5 дБ (дБА) ниже значений, указанных в таблице 1. При этом поправку на тональность шума не учитывают.

5. Допустимые уровни шума от транспортных средств (поз. 5, 7 — 10, 12) разрешается принимать на 5 дБ (5 дБА) выше значений, указанных в таблице 1.

Таблица 1

Помещения и территории	Уровни звукового давления L (эквивалентные уровни звукового давления $L_{экв}$) в дБ в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами в Гц								Уровни звука L_A и эквивалентные уровни звука $L_{A\,экв}$ в дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
1. Палаты больниц и санаториев, операционные больниц	51	39	31	24	20	17	14	13	25
2. Жилые комнаты квартир, жилые помещения домов отдыха и пансионатов, спальные помещения в детских дошкольных учреждениях и школах-интернатах	55	44	35	29	25	22	20	18	30
3. Кабинеты врачей больниц, санаториев, поликлиник, зрительные залы концертных залов, номера гостиниц, жилые комнаты в общежитиях	59	48	40	34	30	27	25	23	35
4. Территории больниц, санаториев, непосредственно прилегающие к зданию	59	48	40	34	30	27	25	23	35
5. Территории, непосредственно прилегающие к жилым домам (в 2 м от ограждающих конструкций), площадки отдыха микрорайонов и групп жилых домов, площадки детских дошкольных учреждений, участки школ	67	57	49	44	40	37	35	33	45
6. Классные помещения, учебные кабинеты, аудитории школ и других учебных заведений, конференц-залы, читальные залы, зрительные залы театров, клубов, кинотеатров, залы судебных заседаний и совещаний	63	52	45	39	35	32	30	28	40
7. Рабочие помещения управлений, рабочие помещения конструкторских, проектных организаций и научно-исследовательских институтов	71	61	54	49	45	42	40	38	50
8. Залы кафе, ресторанов, столовых, фойе театров и кинотеатров	75	66	59	54	50	47	45	43	55
9. Торговые залы магазинов, спортивные залы, пассажирские залы аэропортов и вокзалов, приемные пункты предприятий бытового обслуживания	79	70	63	58	55	52	50	49	60

Примечания: 1. Уровни звукового давления в октавных полосах частот в дБ, уровни звука и эквивалентные уровни звука в дБА для шума, создаваемого в помещениях и на территориях, прилегающих к зданиям, системами кондиционирования воздуха, воздушного отопления и вентиляции, следует принимать на 5 дБ ниже (поправка $\Delta_п = -5$ дБ) указанных в табл. 1 или фактических уровней шума в помещениях в рабочее время, если последние не превышают значений, указанных в настоящей таблице (поправку для тонального шума по табл. 2 в этом случае принимать не следует).

2. Эквивалентные уровни звука в дБА для шума, создаваемого средствами транспорта (автомобильного, железнодорожного, воздушного) в 2 м от ограждающих конструкций зданий, обращенных в сторону источников шума, допускается принимать на 10 дБА выше (поправка $\Delta_п = +10$ дБА) уровней звука, указанных в поз. 5 табл. 1.