

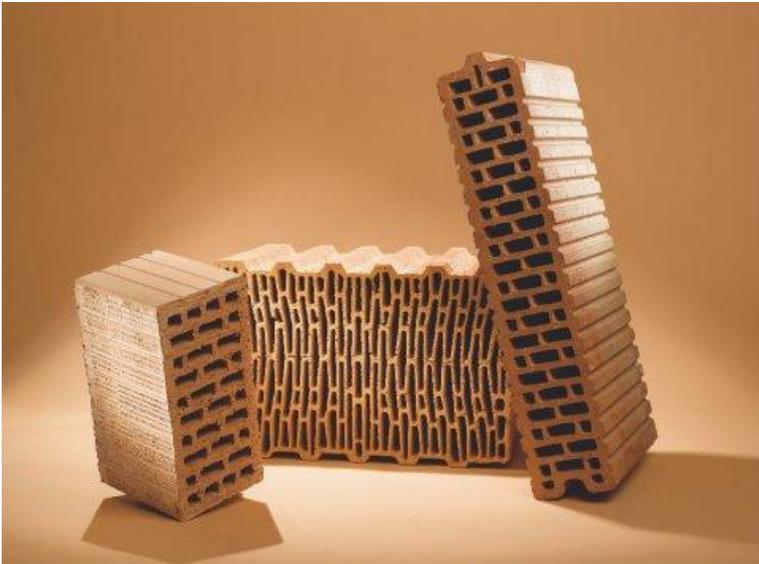


Раздел 3.

Звукоизоляция

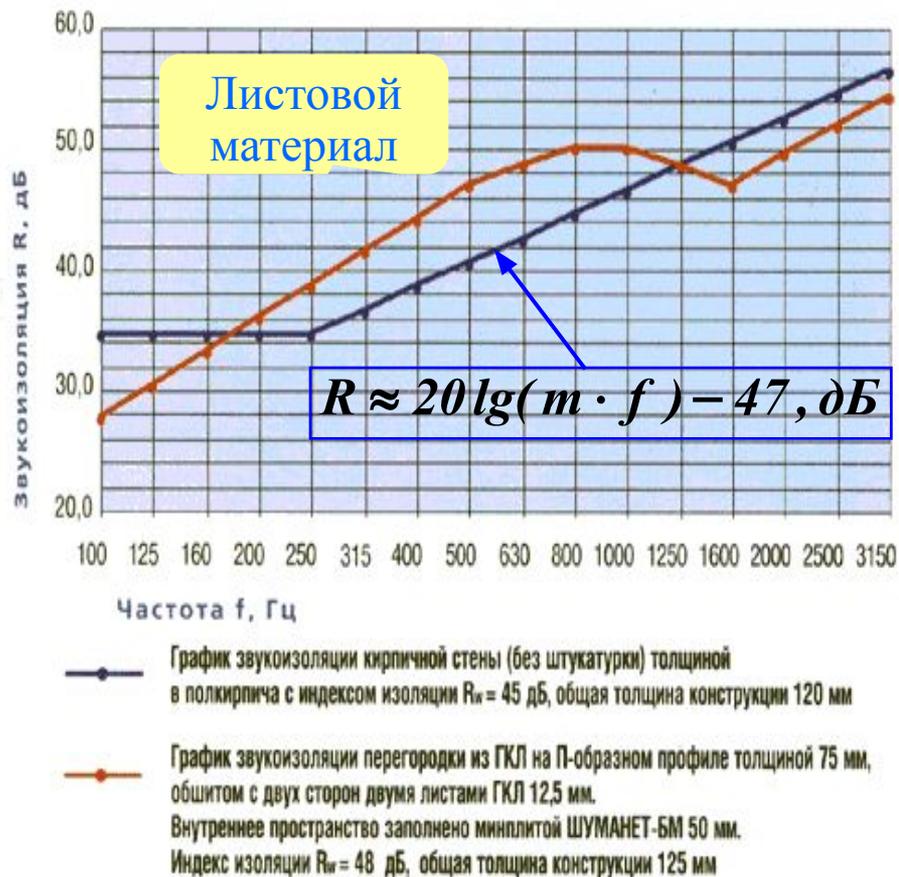
Изоляция воздушного шума

1. Однослойная конструкция



а) конструкция **акустически однослойная**, если все ее точки, лежащие на нормали, при колебаниях не изменяют расстояние между собой (все слои ограждения колеблются как одно целое);

б) можно считать все конструкции акустически однослойными, если их **размер меньше $1/6$ длины звуковой волны**.



Частотная характеристика имеет три диапазона:

1. Звукоизоляция зависит только от жесткости материала и потерь энергии в нем. Обычно ниже 100 Гц - ниже нормируемого диапазона частот.
2. Выше 2...3-кратной низшей резонансной частоты колебаний ограждения - подчиняется **закону масс (закону Бергера)**.

Величина звукоизоляции R увеличивается на 6 дБ при каждом удвоении массы (поверхностной плотности, $\text{кг}/\text{м}^2$) ограждения или частоты звука (подъем на 6 дБ/октаву).

3. Обычно за пределами зоны нормирования (5000...8000 Гц) - R зависит от массы, жесткости, коэффициента потерь α материале.

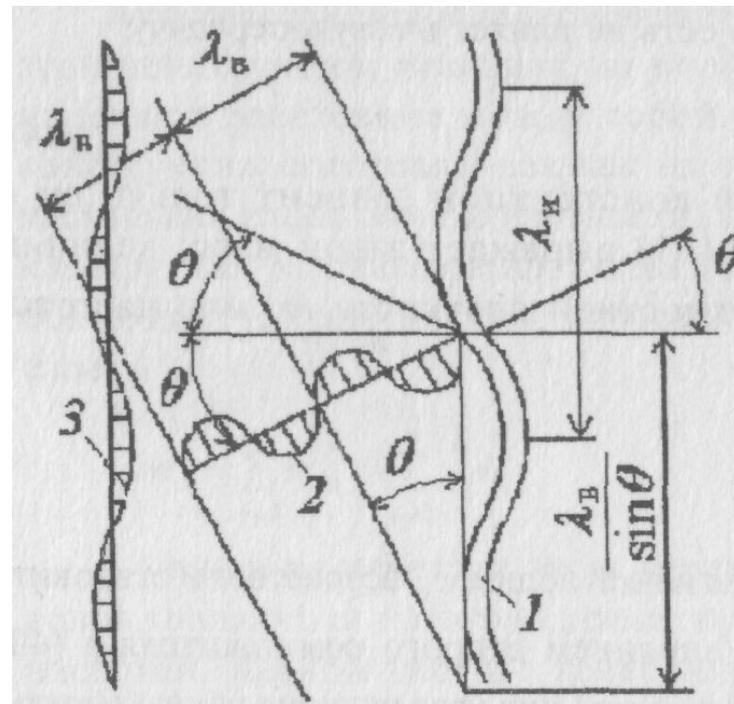
В частотной характеристике листового материала 1 -2 провала:

- резонансная частота f_0 ;
- частота **волнового совпадения** (граничная частота) $f_{зр}$ - совпадение проекции длины звуковой волны с длиной волны изгибных колебаний ограждения.

$$f_{зр} = \frac{c^2}{1,8 \cdot c_1 \cdot h};$$

$$c_1 = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\mu^2)}} = \sqrt{\frac{E_0}{\rho}}$$

E_0 - динамический модуль упругости материала.



1 - колеблющаяся плита ограждения; 2 - давление в падающей звуковой волне; 3 - распределение звукового давления на поверхности плиты

Резонансная частота f_0

$$f_0 = \frac{20000}{h} \sqrt{\rho \frac{(1 - \mu^2)}{E}};$$

$\mu \approx 0,3$ (металлы);

$\mu \approx 0,4$ (неметаллы)

μ - коэффициент Пуассона

Величина провала
(ухудшение звукоизоляции) - до 20 дБ при ширине 2...3 октавы.

Упрощенный расчет по СНиП 23-03-2003:



Звукоизоляция акустически однослойной конструкцией относительно малоэффективна, обычно используется только для изоляции воздушного шума при условии **хорошей заделки сквозных отверстий.**

Здесь действует закон масс - величина звукоизоляции увеличивается на 6 дБ при каждом удвоении массы ограждения или частоты звука .

При изоляции ударного шума однослойной конструкцией нормы звукоизоляции обычно не обеспечиваются.

Причины :

- повышение толщины плиты в 2 раза - уменьшает приведенный уровень ударного шума только на 9 дБ;
- увеличение плотности материала в 2 раза - на 4,5 дБ;
- увеличение модуля упругости материала E в 2 раза - на 1,5 дБ;
- увеличение коэффициента потерь в 2 раза - на 3 дБ.

Акустическая рациональность однослойных конструкций [3]:

Индексы звукоизоляции однослойных конструкций

Материал	Толщина	Поверхностная плотность, кг/м ²	Индекс звукоизоляции I _в , дБ
Кирпич, цементный раствор	10+120+10	260	48
	10+250+10	500	52
Железобетон	60	180	39
	120	300	47
	140	336	49
	160	430	50
Керамзитобетон	120	192	46
	140	140	43
Гипсовые плиты	10	20	28
	2×10=20	31	30
	3×10=30	43	34
Гипсовые плиты(8мм), сотопласт (50мм)	8+50+8=66	21	30
Гипсовые плиты(8мм), сотопласт (28мм), ДВП (4мм)	8+64+8=70	22	30
	8+28+4+28+8=80	25	37

Рекомендации по акустическому проектированию однослойного ограждения

1. Стены максимальной массивности : для $R = 52$ дБ - не менее $m > 350...400$ кг/м²;
2. Отсутствие сквозных отверстий и швов;
3. Максимальная поверхностная плотность окон и дверей;
4. Нежелательно падение звука на окна под углом $\approx 75^\circ$;
5. Для тонких конструкций нужно уменьшать цилиндрическую жесткость, ребра ухудшают звукоизоляцию.
6. Листовые конструкции из ДВП и ДСП нежелательно штукатурить.

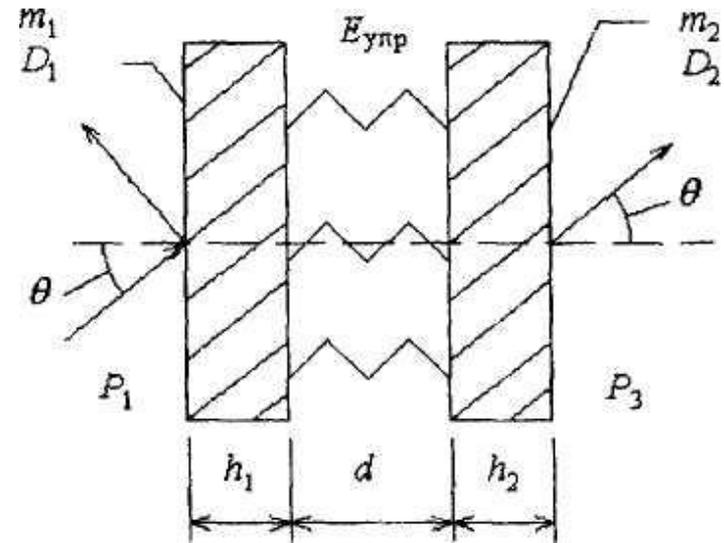
2. Акустически многослойная конструкция

Конструкция акустически двухслойная, если жесткие слои связаны между собой упругими связями и колеблются независимо друг от друга.

К двухслойным можно отнести ограждения с воздушной прослойкой или разделенные материалами с незначительной жесткостью.

В звукоизолирующей способности двухслойных ограждений различают два частотных интервала:

1. Интервал частот до граничных частот $f_{гр1}$ и $f_{гр2}$
2. Интервал частот выше граничных (второй интервал частот).



1. Интервал частот до граничных частот $f_{гр1}$ и $f_{гр2}$

Звукоизоляция в этом интервале подчиняется действию закона масс и имеет 3 области:

- а) В первой области (до резонансных частот) двухслойная конструкция ведет себя как равная ей по массе однослойная и не имеет преимуществ перед однослойной.
- б) Во второй области (резонансных частот) звукоизолирующая способность ограждения понижается вследствие резонанса.

Собственная (ре $f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m_1} + \frac{k}{m_2}}$ га двухслойного ограждения

где $k = E_g / d$ - коэффициент жесткости воздушной прослойки; $E_g = 0,14 \text{ МПа}$ - модуль объемной упругости воздуха; d , м - толщина воздушной прослойки.

На резонансной частоте f_p наибольшее пропускание звука, т.е. ограждение проектируется так, чтобы f_p лежала вне области нормирования, то есть $f_p < 100$ Гц.

Для этого соблюдают условия: $d_{min} = 0.35 \sqrt{1/m_1 + 1/m_2}$;
 $m_1 = m_2$

Ограждение из плит с одинаковой поверхностной плотностью при частотах $f < f_{zp}$ обладает наибольшей звукоизолирующей способностью среди других ограждений с той же поверхностной плотностью.

в) В третьей области (после резонанса до граничной частоты, обычно в диапазоне $(2...3) f_p < f < (0,5...0,33) f_{zp}$) оба слоя колеблются независимо друг от друга и закон масс действует дважды - 12 дБ/октаву .

$$R = R_2 + \Delta R, \quad \Delta R = 40 \ln(f / f_{01})$$

Здесь R_2 - звукоизоляция по закону массы для однослойной основной оболочки (оболочки большей жесткости) с поверхностной плотностью m_2 , f_{01} - собственная частота колебания массы m_1 на упругом основании жесткостью k .

$$f_{01} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m_1}}$$

2. Интервал частот выше граничных $f > f_{cp1}$ и $f > f_{cp2}$ (второй интервал частот)

На звукоизоляцию влияют и поверхностные плотности, и условия волнового совпадения: при одной и той же частоте звука могут существовать два угла совпадения.

При частотах выше граничных звукоизоляция равна

$$R = R_2 + \Delta R, \quad \Delta R = 40 \ln(f / f_1) - 20 \lg \frac{1}{\left(1 - \frac{m_2 \cdot D_1}{m_1 \cdot D_2}\right)};$$

При плитах одинаковой толщины

$$\Delta R = 40 \ln(f / f_0) - 20 \lg \eta + 3$$

Здесь D_1, D_2 - цилиндрическая жесткость плиты;

η - коэффициент потерь.

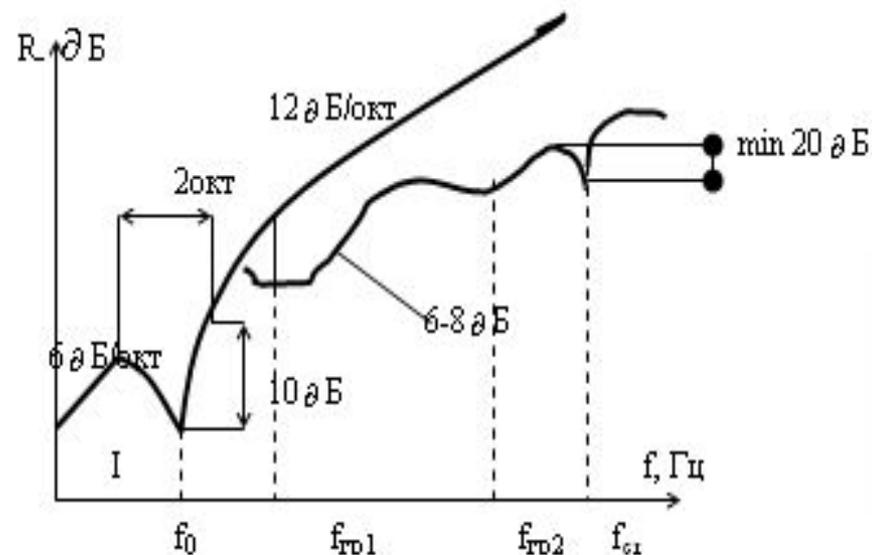
В области частот $f > f_{зр}$ звукоизоляция двухслойного ограждения повышается, если оно состоит из разных плит - разные плиты при одной и той же частоте имеют разные углы совпадения, поэтому волновое совпадение возникает только в одной плите.

Наибольший эффект достигается, если $m_1 = m_2$, а цилиндрические жесткости отличаются в 6-7 раз. Оптимальное соотношение толщин : $h_2 = (2...4) h_1$.

В целом на частотной характеристике многослойной конструкции больше провалов:

- 1-2 резонанса;
- 2 волновых совпадения;
- стоячая волна между оболочками;
- 7-8 дБ - занижение звукоизоляции за счет косвенной передачи звука.

Поэтому двойной эффект от действия закона масс - 12 дБ/октаву в 3 области первого и во втором интервале частот возникает не всегда -

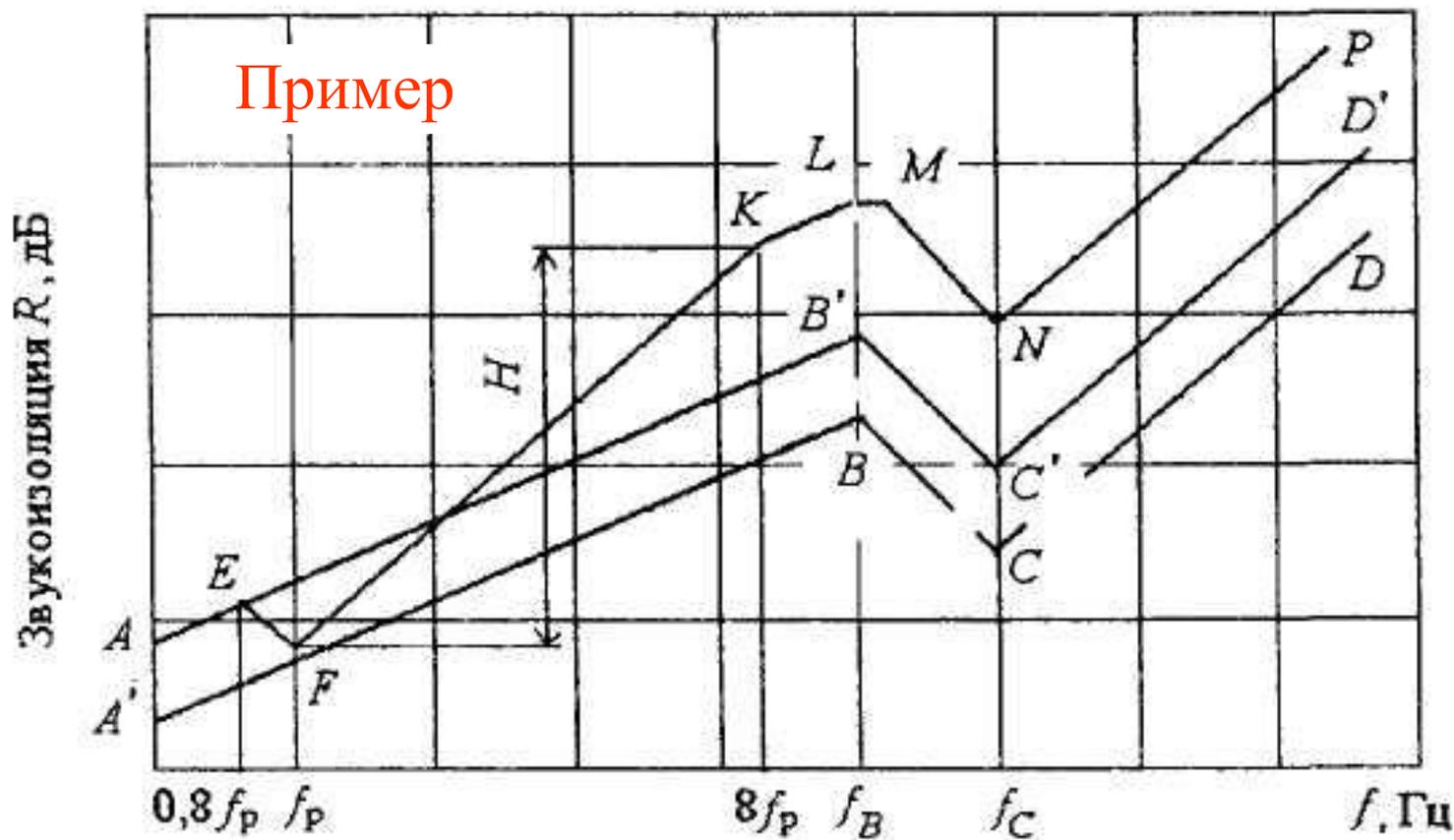


$$f_0 = 500 \sqrt{\frac{E_d}{d_a} \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)};$$

$$f_{cm1} = \frac{c}{2d_a} \approx \frac{1700}{d_a}, \quad \text{Гц}$$

$$c, d_a - [\text{см}, \text{с}]$$

На практике частотную характеристику многослойного ограждения строят по методике СП 23-103-2003 "Проектирование звукоизоляции ограждающих конструкций жилых и общественных зданий".



Акустическая рациональность многослойных конструкций [3]:

Индексы звукоизоляции воздушного шума стенами с воздушной прослойкой (ВП)

Материал первой (П1) и второй (П2) плит	Толщина стены П1+ВП+П2	Поверхностная плотность	Индекс звукоизоляции	Примечание
Железобетон	50+50+50	250	51	
	40+40+40	250	48	
	40+40+40	200	48	
	40+10+40	200	47	
Гипсошлакобетон	80+40+80	200	50	
Керамзитобетон	40+220+40	112	43	
Гипсоопилочные панели	80+50+80	210	47	
	80+40+80	210	48	
Гипсовые плиты	80+10+80			Металлический
	10+65+10	31	37	каркас
	10+65+20	31	40	каркас
	10+65+10	31	39	Деревянный
	10+250+10	31	48	каркас
	18+140+36	65	51	каркас
Гипсовая панель (10мм), изолирующая ДВП	(10+12,5)+60+(10+12,5)	35	48	
(12,5мм)	(10+12,5)+250+(10+12,5)	35	51	

Акустическая рациональность многослойных конструкций [3]:

Индекс звукоизоляции воздушного шума стенами с звукопоглощающим материалом в промежутке

Материал первой (П1) и второй (П2) плит и поглощающего материала (ПМ)	Толщина стены П1+ВП+ПМ+П2	Поверхностная плотность	Индекс звукоизоляции	Примечание
Гипсовые плиты (П1 и П2), минераловатная плита (ПМ)	18+110+10+36	67	50	Каркас
	18+110+30+36	69	52	из гнутых
	18+90+50+36	71	53	профи- лей
	18+40+100+36	76	54	
	18+0+140+36	80	53	
	36+90+50+36	90	54	
	10+15+50+10	33	44	
	10+15+50+20	45	46	
Асбоцементная плита П1, П2), (маты из стекловолокна (ПМ)	10+0+60+10	47	49	Деревян.
	10+0+150+10	48	52	каркас
Железобетон (П1), минераловатная плита (ПМ), цементный раствор (П2)	30+75+35	150	48	

Акустическое проектирование многослойных конструкций

Звукоизоляция повышается с увеличением поверхностной плотности, расстояния между плитами и уменьшением жесткости промежуточного слоя

1. Расстояние между оболочками не менее 50...100 мм.
2. Боковое примыкание к стенам - нежесткое, или жесткие связи только по контуру ограждающей конструкции.
3. Минимум акустических мостиков между оболочками - опорных конструкций, кусков раствора, кирпича и др.;
4. Разная (в 2...3 раза) толщина оболочек или материал плит.
5. Отверстия от углов - минимум 200 мм, не сквозные.
6. Между оболочками - пористый звукопоглощающий материал (> 30 мм) на упругой подвеске или закрепленный на менее гибкой плите.

Окна

Основные факторы, влияющие на звукоизоляцию: толщина и число слоев остекления, способ установки стекол, герметичность оконных переплетов, наличие звукопоглощающих материалов в межстекольном пространстве (по периметру), косвенная передача звука.

1. У одинарных окон со стеклами толщиной до 6 мм звукоизоляция не более 25 дБ.
2. Теплозащитные двойные - звукоизоляция не более 25 дБ при одинаковой поверхностной плотности, не более 30-37 дБ - при одинаковой толщине стекол.
3. Расстояние между стеклами должно быть как можно больше.
4. Для повышения звукоизоляции использовать **тяжелые стекла разной толщины (1:2)** или **стеклопакеты, заполненные инертным газом** - до 45 дБ.

5. Установка третьего стекла в середине промежутка двойного остекления (при той же его толщине) **ухудшает звукоизоляцию**, кроме случая, когда третье стекло установлено между стеклами **с промежутками разной толщины**.
6. Предусмотреть максимальную массу рам, плотные притворы с уплотнениями по периметру, фиксаторы закрытия окон - даже небольшие щели сводят к минимуму звукоизоляцию любой конструкции.
7. Пористый материал в краевых зонах коробчатых окон улучшает звукоизоляцию до 5 дБ.

При проектировании окон недостаточно иметь высокое среднее значение звукоизоляции R_B в нормируемом интервале частот - необходимо знать частотную характеристику R . **Особое внимание частоте 500 Гц - наиболее интенсивные составляющие шума городского транспорта.**

Звукоизолирующая способность остекления R , дБ [2]

(δ_c – толщина стекла, мм; $\delta_{вп}$ – толщина воздушной прослойки, мм)

Остекление	Толщины слоев	Среднегеометрическая частота третьоктавной полосы, Гц					R , дБ
		125	250	500	1000	2000	
Одинарное δ_c	3	17	17	22	28	31	23
	4	18	23	26	31	32	26
	6	22	22	26	30	27	26
	3-10-3	–	–	–	–	–	30,5
Стеклопакет $\delta_c - \delta_{вп} - \delta_c$	4-10-4	–	–	–	–	–	33
	6-10-6	–	–	–	–	–	34,5
	4-10-6	–	–	–	–	–	36
	3-20-3	–	–	–	–	–	33
	4-20-4	–	–	–	–	–	34
	6-20-6	–	–	–	–	–	36
	3-57-3	14	20	32	41	49	33
Двойное остекление $\delta_c - \delta_{вп} - \delta_c$	3-90-3	21	29	38	44	50	37
	4-57-4	21	31	38	46	49	37
	4-90-4	25	33	41	47	48	38
	6-57-3	23	27	35	42	45	35
	6-90-3	27	30	37	43	46	37
	3-27-3-27-3	10	23	33	46	47	31
	3-10-3-27-3	15	25	36	48	51	36
Тройное $\delta_c - \delta_{вп} - \delta_c - \delta_{вп} - \delta_c$	3-44-3-44-3	13	25	33	44	49	34
	3-10-3-77-3	28	31	41	48	51	41
	4-43-4-43-4	18	27	38	46	51	36
	4-10-4-76-4	26	35	41	48	51	41

Звукоизоляция конструкции с проемами

Окна и двери имеют малую массу и малую герметичность → ухудшают общую звукоизоляцию по сравнению с массивной частью конструкции.

Уменьшение тем больше, чем больше относительная площадь ослабленных участков, особенно если размеры проема близки к длине звуковой волны.

Величина звукоизоляции рассчитывается по следующим формулам:

$$R_{\text{общ}} = R - 10 \lg \frac{S / S_1 + 10^{\frac{R-R_1}{10}}}{1 + S / S_1}$$

Здесь S , R - площадь (м^2) и звукоизоляция (дБ) основной конструкции;

S_1 , R_1 - проема (окна или двери). 22

При $V/\lambda \approx 1$ (V - размер проема) прошедшая звуковая энергия пропорциональна площади отверстия

$$R_{\text{общ}} = R - 10 \lg \frac{1 + \frac{S_1}{S} 10^{\frac{R}{10}}}{1 + S_1/S}$$

При $S_1/S \ll 1$

$$R_{\text{общ}} \approx 10 \lg \frac{S}{S_1}$$

Расчет проводят в октавных и третьоктавных полосах частот, но можно использовать и для определения индекса звукоизоляции.

Звукоизоляция ударного шума

Перекрытия должны проектироваться с учетом обеспечения звукоизоляции **от воздушного и ударного шума**.

В отличие от звукоизоляции воздушного шума, звукоизоляция ударного шума зависит от жесткости, а не от поверхностной плотности конструкции.

При удовлетворении требований по звукоизоляции от ударного шума звукоизоляция от воздушного шума, как правило, обеспечивается.

Расчет звукоизоляции перекрытиями ударного шума заключается в определении приведенного ударного шума L_{nw} в помещении под перекрытием и сравнении его с существующими нормами.

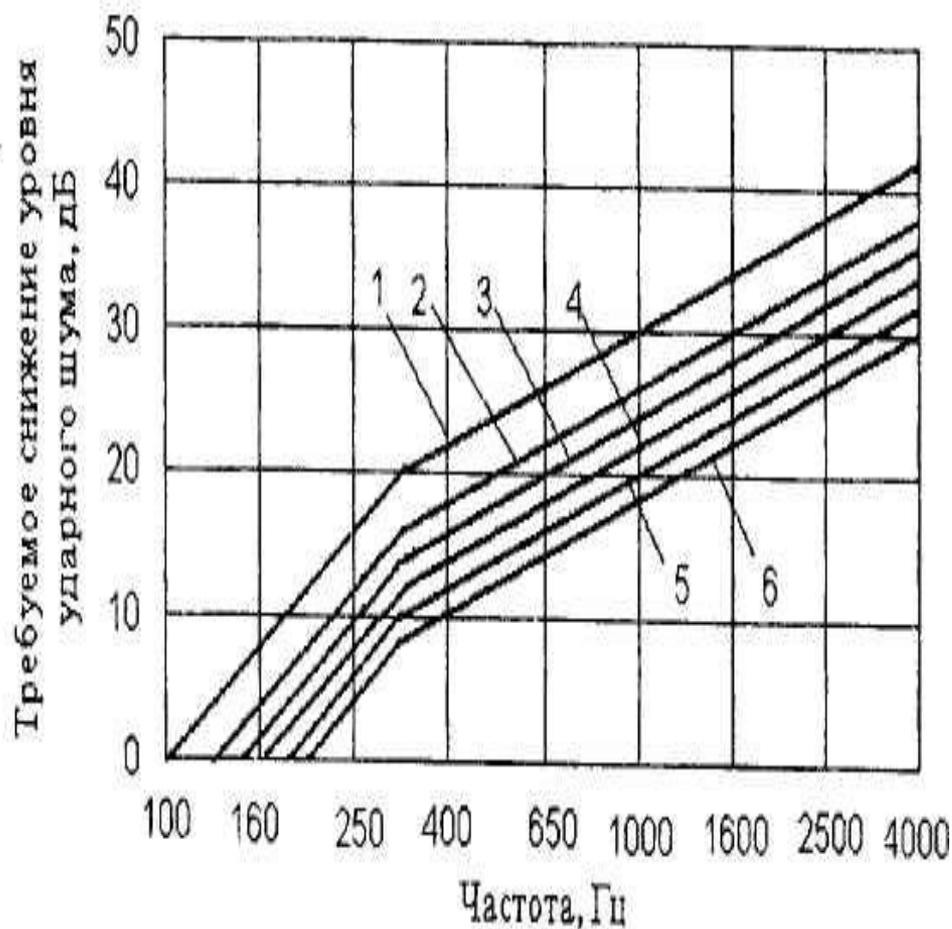
При проектировании перекрытия проходят следующие этапы:

- выбор несущей части перекрытия - определяется в основном из прочностных и конструктивных соображений;
- выбор покрытия пола - основной объект акустического расчета.

Поскольку несущая часть перекрытия (плита перекрытия) может сочетаться с различными покрытиями, то акустические качества этих составных частей конструкции рассматриваются отдельно.

1. Сначала строится частотная характеристика требуемого снижения ударного шума конструкции ΔL_T с выбранным типом перекрытия путем вычитания из характеристики приведенного уровня ударного шума L_{nw} под несущей плитой нормативной характеристики L_H (из СНиП).

Для наиболее используемых конструкций несущих плит такой расчет уже произведен:



Характеристики конструкций несущих частей перекрытия

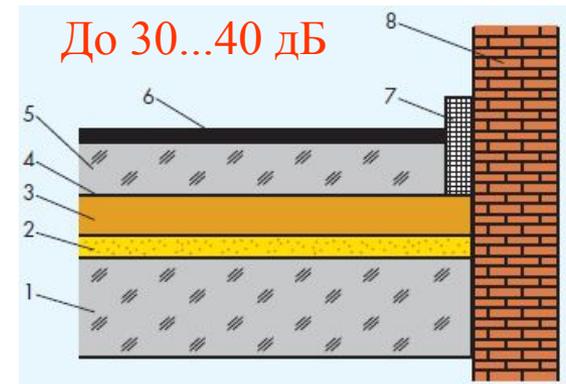
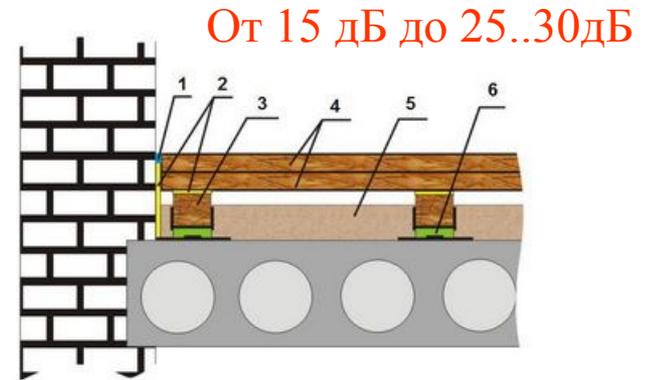
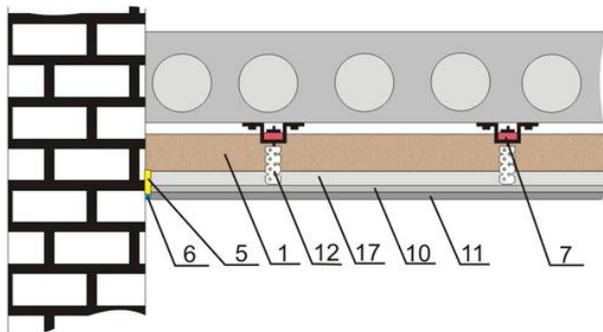
Конструкция	Поверхностная плотность, кг.м ²	Индекс приведенного ударного шума I_{0v}	Номер кривой на рис. 1
Сплошные или многопустотные плиты	150	91	1
	200	88	2
	250	86	3
	300	84	4
	375	82	5
	450	80	6
Перекрытия с гибкими подвесными потолками	150	88	2
	200	84	3
	250	82	4
	300	80	5

Кривая ΔL_T - это значение звукоизоляции, которое должно обеспечивать покрытие пола.

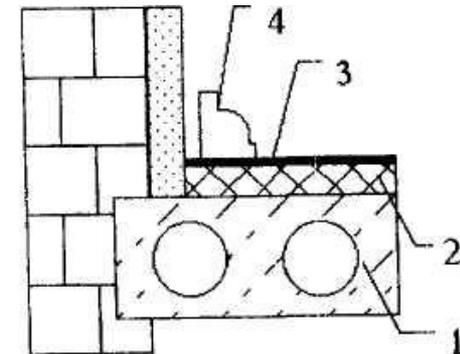
2. По значению ΔL_T выбирают тип покрытия, обеспечивающего требуемое по нормам СНиП снижение уровня ударного шума:

- полы с упругим основанием - на лагах или со сплошным упругим слоем (плавающий пол) - [см. ранее](#);
- полы из рулонных материалов;
- акустические подвесные потолки и др.

До 16...19 дБ по воздушному шуму,
6...12 дБ - по ударному шуму



10 дБ на СЧ, 20...30 дБ на ВЧ



Акустическое проектирование полов

1. Панель основного пола выполняется из материала с поверхностной плотностью $60-90 \text{ кг/м}^2$ и толщиной $30-50 \text{ мм}$ (бетон, шлакобетон, цементно-песчаная стяжка и др.), то есть больше $1/4$ поверхностной плотности несущей плиты.
2. При устройстве монолитного бетонного слоя упругое основание или засыпка должно быть закрыто слоем рубероида (пергамина, гидроизола и т.п.) внахлестку, чтобы не образовались акустические мостики при заливке.
3. Упругий слой доводится только до грани пола (стяжки), чтобы край пола не разрушил упругий материал.
4. Не применять для упругого слоя материалы с плотностью менее 100 кг/м^3 , т.к. он в процессе эксплуатации сжимается, что приводит к снижению эффективности примерно на 3 дБ .

5. При устройстве полов на деревянных лагах количество лаг выбирается по допустимым напряжениям в прокладках - не более 1000 кгс/м^2 .
6. Упругие прокладки могут быть как ленточными - под всей лагой, так и отдельные (штучными) - располагаемые под лагой через 500-700 мм. Ширина прокладки должна быть на 50 мм больше ширины лаг.
7. Полосовые прокладки шириной 10—20 см используют для уменьшения расхода звукоизоляционного материала. Их располагают по контуру и по основанию пола параллельно одной из сторон с шагом 30—70 см. Суммарная площадь прокладок _ - не менее 20 % площади пола.
8. Прокладки необходимо приклеивать мастикой, т.к. гвозди являются жесткими акустическими мостиками.

9. В местах примыкания полов к стенам и перегородкам оставляется зазор 10-20 мм, заполняемый прокладками из упругих материалов или изделиями из пористого полиэтилена и т.п.
10. Плинтус крепится только к чистому полу или только к стене, чтобы уменьшить косвенную передачу шума.
11. Применение линолеума на войлочной (волокнистой) подоснове не обеспечивает требованиям по звукоизоляции как ударного, так и воздушного шума - укладка его непосредственно на несущую плиту недопустима.

Рекомендуется применение линолеумов со вспененной подосновой, которые не влияют на изоляцию воздушного шума, но могут обеспечивать необходимую изоляцию ударного шума.