

В. Н. Бобылев, В. А. Тишков, П. А. Гребнев, Д. В. Монич

**РАСЧЕТ ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ СЭНДВИЧ-ПАНЕЛЕЙ
С УЧЕТОМ АКУСТИЧЕСКОГО РАЗОБЩЕНИЯ СЛОЕВ**

Учебное пособие

Нижний Новгород
2016

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»

В. Н. Бобылев, В. А. Тишков, П. А. Гребнев, Д. В. Монич

Расчет звукоизоляции сэндвич-панелей с учетом акустического разобщения слоев

Утверждено редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия

Нижний Новгород
ННГАСУ
2016

Печатается в авторской редакции

Рецензенты:

- С.Н. Овсянников* – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой архитектуры гражданских и промышленных зданий ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет» (г. Томск)
- А. А. Кочкин* – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой промышленного и гражданского строительства, декан инженерно-строительного факультета ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет» (г. Вологда)

Бобылев В.Н. Расчет звукоизоляции сэндвич-панелей с учетом акустического разобщения слоев [Текст]: учеб. пособие /В. Н. Бобылев, В. А. Тишков, П. А. Гребнев, Д. В. Мониц; Нижегород. гос. архитектур.- строит. ун-т. – Н. Новгород: ННГАСУ, 2016. – 35 с.
ISBN 978-5-528-00171-5

Представлен метод расчета звукоизоляции многослойных сэндвич-панелей конечных размеров при диффузном падении звуковых волн. Метод основан на теории самосогласования волновых полей.

Пособие предназначено для студентов и аспирантов профильных специальностей и направлений подготовки, научных работников, преподавателей вузов.

Подготовлено в рамках выполнения НИР (код проекта 3038) с финансированием из средств Минобрнауки России в рамках базовой части государственного задания на научные исследования.

ББК 38.113

Ил. 6; табл. 14; библиограф. назв. 5

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1 Определение исходных параметров сэндвич-панели	6
2 Расчет скорости распространения изгибных колебаний сэндвич-панели	7
3 Расчет граничных частот прохождения звука через сэндвич-панель	9
4 Определение коэффициентов прохождения звука через сэндвич-панель	10
5 Построение частотной характеристики звукоизоляции сэндвич-панели	13
6 Расчет звукоизоляции сэндвич-панелей с акустическим разобщением слоев	14
Пример расчета звукоизоляции сэндвич-панели без акустического разобщения слоев	16
Пример расчета звукоизоляции сэндвич-панели с акустическим разобщением слоев	25
Литература	34

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в гражданском строительстве особую актуальность приобрели облегченные конструкции стен и перегородок. Низкая масса перегородки позволяет уменьшить нагрузку на несущие конструкции зданий и снизить материалоемкость строительства. При этом необходимо обеспечить выполнение нормативных требований по звукоизоляции ограждающих конструкций. Данную задачу позволяет решить применение многослойных конструкций, в частности сэндвич-панелей, имеющих внешние облицовки и слой жесткого среднего слоя между ними. Применение жесткого среднего слоя обеспечивает выполнение требований по прочности и устойчивости конструкций без устройства внутреннего каркаса, что позволяет повысить скорость монтажа и снизить его трудоемкость.

Сэндвич-панели обладают низкой звукоизоляцией вызванной резонансной частотой системы «масса – упругость – масса», как правило располагающейся для таких конструкций в области средних частот. Этот недостаток является одним из сдерживающих факторов широкого внедрения многослойных сэндвич-панелей в практику строительства.

Проведенные исследования показали, что звукоизоляцию сэндвич-панели с известной поверхностной массой и заданными размерами можно регулировать путем введения акустического разобщения в виде слоев упругого материала вклеиваемых между облицовками и средним слоем (см. рисунок 1б). При этом резонансная частота системы «масса – упругость – масса» смещается в диапазон более низких частот [1], [2].

Для эффективного применения сэндвич-панелей в строительстве необходимо производить предварительный расчет их звукоизоляции и с его помощью подбирать рациональное конструктивное решение ограж-

дения с учетом спектра изолируемого шума и нормативных требований по звукоизоляции, предъявляемых к проектируемому ограждению:

Приведенный метод расчета позволяет проводить расчет звукоизоляции сэндвич-панелей, в которых внешние листовые облицовки изготавливаются из гипсоволокнистых (ГВЛ), гипсокартонных (ГКЛ), гипсофибровых (ГФЛ) листов, гипсо-стружечных (ГСП), ориентировано-стружечных (OSB) плит и других листовых материалов плотностью от 650 кг/м^3 до 1400 кг/м^3 , толщиной от 2 мм до 15 мм. Средний слой рассматриваемых сэндвич-панелей может быть выполнен из пенопласта, пенополиуретана, пенополистирола, и других материалов плотностью до 30 кг/м^3 , толщиной от 50 мм до 100 мм с динамическим модулем упругости $2,5 \cdot 10^6 < E_d < 1,0 \cdot 10^7 \text{ Па}$. Слои акустического разобщения могут изготавливаться из пенополиэтилена, полиэфирного волокна и других упругих материалов толщиной от 1 до 4 мм.

Схемы конструктивных решений рассматриваемых ограждений приведены на рисунке 1.

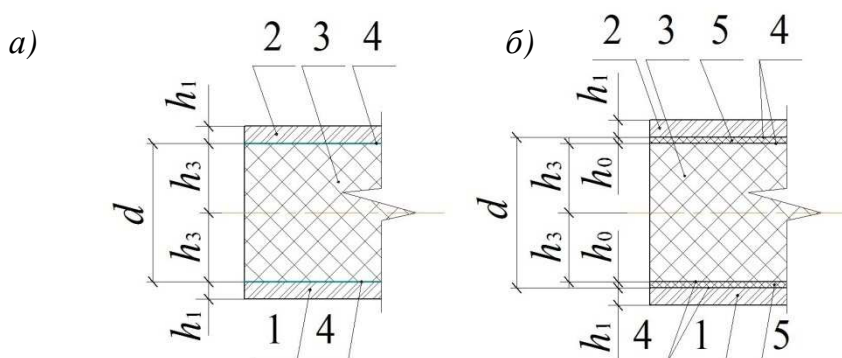


Рис.1 – Схема конструктивного решения сэндвич-панели: а – сэндвич-панель с жестким склеиванием слоев; б – сэндвич-панель с акустическим разобщением слоев: 1, 2 – внешние листовые облицовки; 3 – жесткий легкий средний слой; 4 – клеевой слой; 5 – слои акустического разобщения

1.2 Вычисление физико-механических параметров сэндвич-панели

Поверхностная плотность одной облицовки (в пособии рассматриваются сэндвич-панели с одинаковыми облицовками), кг/м²:

$$\mu_1 = \rho_1 h_1, \quad (1)$$

где ρ_1 – плотность материала облицовки, кг/м²; h_1 – толщина облицовки, м.

Поверхностная плотность сэндвич-панели, кг/м²:

$$\mu = 2\rho_1 h_1 + 2\rho_3 h_3,$$

где ρ_1 , h_1 – то же, что в формуле (1); ρ_3 – плотность материала среднего слоя, кг/м³; $d = 2h_3$ – толщина среднего слоя, м.

Цилиндрическая жесткость облицовки (D), Па·м³:

$$D = \frac{E_d h_1^3}{12(1-\nu_1)}, \quad (2)$$

где E_d – динамический модуль упругости материала облицовки, Па; ν_1 – коэффициент Пуассона материала облицовки, h_1 – то же, что в формуле (1).

2 РАСЧЕТ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИЗГИБНЫХ КОЛЕБАНИЙ СЭНДВИЧ-ПАНЕЛИ

2.1 Определение жесткостных параметров сэндвич-панели

Жесткостные параметры сэндвич-панели определяются по формулам [3]:

$$A_1 = \frac{E_1 h_1}{1-\nu_1^2} \left[\frac{h_1}{2} + h_3 \right], \quad (3)$$

$$B_1 = \frac{E_1 h_1 h_3}{1-\nu_1^2}, \quad (4)$$

$$D_1 = \frac{E_1 h_1}{1-\nu_1^2} \left[\frac{h_1^2}{12} + \left(h_3 + \frac{h_1}{2} \right)^2 \right], \quad D_3 = \frac{E_3}{1-\nu_3^2} \cdot \frac{2h_3^3}{3}, \quad (5)$$

$$F_1 = \frac{E_1 h_1}{1 - \nu_1^2} \left(\frac{h_3 h_1}{2} + h_3^2 \right), \quad (6)$$

$$N = D_3 + 2h_3 B_1, \quad (7)$$

$$S = 2Gh_3, \quad (8)$$

$$F = 2D_1 - 2F_1, \quad (9)$$

$$T = 2F_1 + D_3, \quad (10)$$

$$L = 2A_1 - 2B_1, \quad (11)$$

где $h_1, 2h_3$ – то же, что в формуле (1), м; ν_1 – то же, что в формуле (2); ν_3 – коэффициент Пуассона материала среднего слоя; G – модуль сдвига материала среднего слоя, Па; S – жесткость материала среднего слоя при сдвиге, Па·м.

2.2 Расчет скорости распространения изгибных колебаний

Определяем скорости изгибных волн по формулам [3]:

$$c_1 = \sqrt{2\pi f} \sqrt[4]{\frac{F - TLh_3}{\mu}}, \quad c_3 = \sqrt{2\pi f} \sqrt[4]{\frac{N}{\mu}}, \quad c_s = \sqrt{\frac{S}{\mu}}, \quad (12)$$

где h_3 – половина толщины среднего слоя сэндвич-панели, м; μ – поверхностная плотность сэндвич-панели, кг/м²; f – текущая частота звука, Гц; $(F - TLh_3/N), N, S$ – изгибные жесткости условных однослойных пластин.

Определяем частоты, на которых происходит изменение характера скорости, вследствие наличия сдвиговых деформаций среднего слоя [3]:

$$f_1 = \frac{S}{2\pi\sqrt{\mu N}}, \quad f_2 = \frac{S}{2\pi\sqrt{\mu \left(F - \frac{TLh_3}{N} \right)}}, \quad (13)$$

где $h_3, \mu, S, N, (F - TLh_3/N)$ – то же, что в формуле (12).

По результатам проведенных расчетов строятся дисперсионные кривые скоростей изгибных колебаний сэндвич-панели ($c_{из}$):

- на частотах $f < \omega_1$ принимаем $c_{из} \approx c_3$;

- на частотах $\omega_1 < f < \omega_2$ принимаем $c_{II} \approx c_S$;
- на частотах $f > \omega_2$ принимаем $c_{II} \approx c_1$.

3 РАСЧЕТ ГРАНИЧНЫХ ЧАСТОТ ПРОХОЖДЕНИЯ ЗВУКА ЧЕРЕЗ СЭНДВИЧ-ПАНЕЛЬ

3.1 Определение резонансной частоты области полных пространственных резонансов (ППР)

Граничная частота $f_{\Gamma mn}$ разделяет области неполных пространственных резонансов (НПР) $f_{\Gamma mn_0} < f < f_{\Gamma mn}$ и ППР ($f > f_{\Gamma mn}$). Граничная частота области ППР определяется по формуле [4]:

$$f_{\Gamma mn} = \frac{c_0^2}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_1}{D}} + \Delta f_{\Gamma mn}, \quad (14)$$

где μ_1 – то же, что в формуле (1); $\Delta f_{\Gamma mn}$ – положительная по знаку поправка до ближайшей большей частоты собственных колебаний облицовки, Гц; c_0 – скорость звука в воздухе, м/с; D – цилиндрическая жесткость облицовки, Па·м³.

3.2 Определение резонансной частоты системы «масса – упругость – масса»

Резонансная частота системы «масса – упругость – масса» разделяет область НПР на две подобласти: НПР1: ($f_{\Gamma mn_0} < f < f_p$) и НПР2: ($f_p < f < f_{\Gamma mn}$).

Резонансная частота системы «масса – упругость – масса» для сэндвич-панели определяется по формуле [5]:

$$f_p = 0,16 \sqrt{\frac{2E_d}{d\mu_1}}, \quad (15)$$

где E_d – динамический модуль упругости материала среднего слоя, Па; d – толщина среднего слоя, м; μ_1 – то же, что в формуле (1).

4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПРОХОЖДЕНИЯ ЗВУКА ЧЕРЕЗ СЭНДВИЧ-ПАНЕЛЬ

4.1 Расчет коэффициентов резонансного прохождения звука через сэндвич-панель

При резонансном прохождении звука через сэндвич-панель, как конструктивную систему в целом, коэффициент прохождения звука определяется по формуле [1]:

$$\tau_{\text{ПС}} = \frac{1}{\frac{6,8}{c_{\text{И}}^2} \frac{\mu^2 f^2}{A^2} \left(\frac{f^2}{f_p^2} - 1 \right)^2 + 1}, \quad (16)$$

где f_p – резонансная частота системы «масса – упругость – масса» сэндвич-панели, Гц; $c_{\text{И}}$ – скорость распространения бегущей волны, м/с; A – характеристика самосогласования волновых полей; μ, f – то же, что в формуле (12).

Характеристику самосогласования A_0 , определяем по формуле [4]:

$$A_0^2 = \frac{m_{0\text{max}} n^2}{(n^2 - n_{0\text{ср}}^2)^2} + \frac{n_{0\text{max}} n m^2}{(m^2 - m_{0\text{ср}}^2)^2}, \quad (17)$$

где

$$n_{0\text{ср}}^2 = \frac{n_{0\text{max}}}{2}, \quad (18)$$

$$m_{0\text{ср}}^2 = \frac{m_{0\text{max}}}{2}, \quad (19)$$

$$m_{0\text{max}} = a \sqrt{\frac{4f^2}{c_{\text{И}}^2} - \frac{1}{b^2}}, \quad (20)$$

$$n_{0\text{max}} = b \sqrt{\frac{4f^2}{c_{\text{И}}^2} - \frac{1}{a^2}}, \quad (21)$$

$$m^2 = a^2 \left(\frac{4f^2}{c_{\text{И}}^2} - \frac{n_{0\text{ср}}^2}{b^2} \right), \quad (22)$$

$$n^2 = b^2 \left(\frac{4f^2}{c_{\text{И}}^2} - \frac{m_{0\text{ср}}^2}{a^2} \right), \quad (23)$$

где f – то же, что в формуле (12); $c_{\text{И}}$ – то же, что в формуле (16); a – длина сэндвич-панели, м; b – ширина сэндвич-панели, м.

В выражениях (17) ÷ (23) величины $m_{0\text{ср}}$, $n_{0\text{ср}}$, $m_{0\text{мах}}$, $n_{0\text{мах}}$, являются характеристиками звуковых полей в плоскости ограждающей конструкции, а величины m , n относятся к собственному волновому полю ограждения.

При резонансном прохождении звука в частотной области НПР ($f_{\Gamma mn_0} < f < f_{\Gamma mn}$) коэффициенты прохождения определяются по следующим формулам [1]:

- для первой облицовки:

$$\tau_{1\text{С}} = \frac{1}{\frac{10^{-5}}{A_0^4} \mu_1^2 f^2 \eta_1 + 1}, \quad (24)$$

- для второй облицовки:

$$\tau_{2\text{С}} = \frac{1}{\frac{3,1}{c_{\text{И}}^2 A_0^4} \mu_1^2 f^2 \eta_1 \cos^2 \theta_2 + 1}, \quad (25)$$

где η_1 – коэффициент потерь материала облицовок; μ_1 – то же, что в формуле (1); f – то же, что в формуле (12); $f_{\Gamma mn}$ – граничная частота области ППР, Гц; A_0 , $c_{\text{И}}$ – то же, что в формуле (16); θ_2 – угол падения звуковых волн на вторую облицовку, град., определяющийся по формуле [1]:

$$\cos \theta_2 = \frac{d}{\sqrt{b^2 + d^2}} + \frac{d}{\sqrt{a^2 + d^2}}, \quad (26)$$

где a , b – то же, что в формулах (17) ÷ (23), м; d – то же, что в формуле (15).

При резонансном прохождении звука в области частот выше граничной частоты ППР ($f > f_{\Gamma mn}$) [1]:

- для первой облицовки:

$$\tau_{1c} = \frac{1}{9,1 \cdot 10^{-5} \cdot \mu_1^2 \frac{f^3}{f_{\Gamma mn}} \eta_1 \sqrt{1 - \frac{f_{\Gamma mn}}{f}} + 1}, \quad (27)$$

- для второй облицовки:

$$\tau_{2c} = \frac{1}{\frac{10,7}{c_{И}^2} \mu_1^2 \frac{f^3}{f_{\Gamma mn}} \eta_1 \cos \theta_2 \sqrt{1 - \frac{f_{\Gamma mn}}{f}} + 1}, \quad (28)$$

где μ_1 – то же, что в формуле (1); f – то же, что в формуле (12); $c_{И}$ – то же, что в формуле (16); $\eta_1, \theta_2, f_{\Gamma mn}$ – то же, что в формуле (25).

4.2 Расчет коэффициентов инерционного прохождения звука через сэндвич-панель

Коэффициент инерционного прохождения звука через наружные облицовки с упругой связью между собой определяем по формуле [1]:

$$\tau_{ИИ} = \frac{1}{\frac{6,8 \mu^2 f^2}{c_{И} F_{ИИ}^2} \left(\frac{f^2}{f_p^2} - 1 \right)^2 + 1}, \quad (29)$$

где $F_{ИИ}$ – функция отклика первой облицовки, на которую падет звук; f, μ – то же, что в формуле (12); $c_{И}, f_p$ – то же, что в формуле (16).

Выражение для определения коэффициента инерционного прохождения звука через облицовки [1]:

- для первой облицовки:

$$\tau_{1И} = \frac{1}{2 \cdot 10^{-5} \mu_1^2 f^2 \frac{1}{F_{1И}^2} + 1}, \quad (30)$$

- для второй облицовки:

$$\tau_{2И} = \frac{1}{\frac{6,8 \mu_1^2 f^2 \cos^2 \theta_2}{c_{И} F_{2И}^2} + 1}, \quad (31)$$

где μ_1 – то же, что в формуле (1); f – то же, что в формуле (12); $c_{и}$ – то же, что в формуле (16); θ_2 – то же, что в формуле (25); $F_{1и}$ – то же, что в формуле (29); $F_{2и}$ – функция отклика второй облицовки.

Значения функции отклика облицовок сэндвич-панели ($F_{1и}$ и $F_{2и}$) зависят от геометрических размеров ограждения и от частоты звука. Значения функции отклика в нормируемом диапазоне частот для различных размеров ограждений можно определить по таблице 2.

Таблица 2

Значения функции отклика ограждения

Третьоктавные полосы со средне- геометрическими частотами, Гц	Значения функции отклика при размерах ограждения, $a \times b$, м									
	1,0×2,5		2,0×2,5		3,0×2,5		4,0×2,5		6,0×2,5	
	$F_{1и}$	$F_{2и}$	$F_{1и}$	$F_{2и}$	$F_{1и}$	$F_{2и}$	$F_{1и}$	$F_{2и}$	$F_{1и}$	$F_{2и}$
100	0,38	0,15	0,46	0,86	0,84	1,02	0,98	0,94	1,02	0,84
125	0,30	0,24	0,87	1,01	1,01	0,76	0,94	0,67	0,86	0,72
160	0,40	0,75	0,99	0,71	0,78	0,80	0,72	0,99	0,78	1,01
200	0,79	1,04	0,76	0,84	0,82	0,96	0,97	0,82	1,00	0,83
250	1,02	0,84	0,85	0,94	0,97	0,88	0,86	1,01	0,85	0,92
315	0,85	0,73	0,95	0,93	0,89	0,85	1,01	0,96	0,94	0,98
400	0,79	1,01	0,94	0,85	0,88	0,89	0,97	0,99	0,98	0,95
500	1,00	0,83	0,87	0,88	0,93	0,90	0,97	1,00	0,97	0,94
630	0,86	0,91	0,90	0,92	0,92	1,00	1,00	0,95	0,94	0,95
800	0,91	0,96	0,94	0,98	1,00	0,99	0,96	0,98	0,96	0,96
1000	0,98	0,94	1,00	1,00	0,97	1,00	0,96	0,98	0,96	0,97
1250	0,97	0,94	0,99	0,97	1,00	1,00	1,00	0,97	1,00	0,98
1600	0,97	0,94	0,97	0,96	1,00	0,99	0,97	0,98	0,99	0,98
2000	0,95	0,97	0,99	1,00	0,97	0,98	0,98	0,98	1,00	0,99
2500	0,96	0,97	0,99	0,98	1,00	1,00	1,00	0,99	0,99	0,98
3150	0,98	1,00	0,98	0,98	0,99	1,00	0,99	1,00	1,00	0,99

5 ПОСТРОЕНИЕ ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ СЭНДВИЧ-ПАНЕЛИ

Коэффициент прохождения звука через сэндвич-панель вычисляется по формуле [1]:

$$\tau = \tau_{\text{ПИ}} + \tau_{1\text{И}}\tau_{2\text{И}} + \tau_{1\text{С}}\tau_{2\text{С}} + \tau_{\text{ПС}}, \quad (32)$$

где $\tau_{\text{ПИ}}$ – коэффициент инерционного прохождения звука через внешние облицовки с упругой связью между собой; $\tau_{1\text{И}}$, $\tau_{2\text{И}}$ – коэффициенты инерционного прохождения звука через первую и вторую облицовки, соответственно; $\tau_{\text{ПС}}$ – коэффициент резонансного прохождения звука через облицовки с упругой связью между собой; $\tau_{1\text{С}}$, $\tau_{2\text{С}}$ – коэффициенты резонансного прохождения звука через первую и вторую облицовки, соответственно.

Звукоизоляция сэндвич-панели определяется по формуле [4]:

$$R = 10 \log \left(\frac{1}{\tau} \right). \quad (33)$$

Используя значения коэффициентов прохождения звука, полученные для области НПР по формулам (16), (24), (25), (29) ÷ (31), и для области ППР по формулам (16), (27), (28), (29) ÷ (31), вычисляются значения звукоизоляции сэндвич-панели в нормируемом диапазоне частот и строится частотная характеристика звукоизоляции сэндвич-панели.

6 РАСЧЕТ ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ СЭНДВИЧ-ПАНЕЛЕЙ С АКУСТИЧЕСКИМ РАЗОБЩЕНИЕМ СЛОЕВ

Расчет звукоизоляции сэндвич-панелей с акустическим разобщением слоев проводится в соответствии с методом, описанном в п. 1 ÷ 5, при этом резонансная частота системы «масса – упругость – масса» в пункте 3.2 вычисляется по формуле [1]:

$$f_p = 0,16 \sqrt{\frac{2E_0}{d\mu_1}}, \quad (34)$$

где μ_1 – то же, что в формуле (1); $d = 2h_0 + 2h_3$ – расстояние между облицовками, м; h_0 – толщина разобщающего слоя, м; E_0 – величина, характеризующая акустическое разобщение слоев сэндвич-панели, Па.

Величина E_0 характеризует степень акустического разобщения слоев сэндвич-панели [1]:

$$E_0 = kE_d, \quad (35)$$

где E_d – динамический модуль упругости материала среднего слоя сэндвич-панели, Па; k – безразмерный эмпирический коэффициент, учитывающий толщину разобщающего слоя между облицовкам и средним слоем сэндвич-панели ($k \leq 1$).

Значения коэффициента k подбираются по рисунку 2 в зависимости от толщины разобщающих слоев.

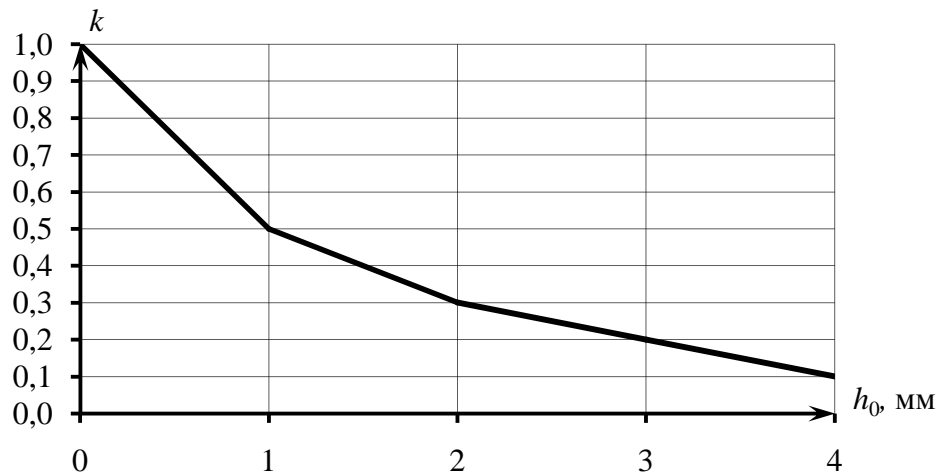


Рис.2 – Значения коэффициента k при различной толщине разобщающих слоев

ПРИМЕР РАСЧЕТА ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ СЭНДВИЧ-ПАНЕЛИ БЕЗ АКУСТИЧЕСКОГО РАЗОБЩЕНИЯ СЛОЕВ

Задание: построить частотную характеристику звукоизоляции перегородки из сэндвич-панелей размером 3,0 м × 2,5 м с облицовками из ЦСП, толщиной по 12,5 мм каждая, средним слоем из пенопласта, толщиной 50 мм.

1.1 Определение физико-механических характеристик облицовок и среднего слоя сэндвич-панели

Таблица 3

Исходные данные для расчета звукоизоляции сэндвич-панели

Геометрические размеры сэндвич-панели		Характеристики облицовок					Характеристики среднего слоя					
Длина, a , м	Ширина, b , м	Толщина, h_1 , м	Плотность материала, ρ_1 , кг/м ³	Модуль упругости материала, E_d , Па	Коэффициент Пуассона материала, ν_1	Коэффициент потерь материала, η_1	Толщина, $d = 2h_3$, м	Плотность материала, ρ_3 , кг/м ³	Модуль упругости материала, E_d , Па	Модуль сдвига материала, G , Па	Коэффициент Пуассона материала, ν	Коэффициент потерь материала, η
3,0	2,5	0,014	1300	$3,8 \times 10^9$	0,4	0,01	50	20	$8,5 \times 10^6$	$2,5 \times 10^7$	0,3	0,025

1.2 Вычисление физико-механических параметров сэндвич-панели

$$\mu_1 = 1300 \cdot 0,014 = 18,2 \text{ кг/м}^2;$$

$$\mu = 2 \cdot 1300 \cdot 0,014 + 2 \cdot 20 \cdot 0,025 = 37,4 \text{ кг/м}^2;$$

$$D = \frac{3,8 \cdot 10^9 \cdot 0,014^3}{12(1-0,4)} = 1034,4 \text{ Па м}^3.$$

2.1 Расчет скорости распространения изгибных колебаний сэндвич-панели

Определяем жесткостные параметры сэндвич-панели:

$$B_1 = \frac{3,8 \cdot 10^9 \cdot 0,014 \cdot 0,025}{1-0,4^2} = 1,58 \cdot 10^6 \text{ Па м}^3$$

$$D_1 = \frac{3,8 \cdot 10^9 \cdot 0,014}{1-0,4^2} \left[\frac{0,014^2}{12} + \left(0,025 + \frac{0,014}{2} \right)^2 \right] = 6,58 \cdot 10^4 \text{ Па м}^3$$

$$D_3 = \frac{8,5 \cdot 10^6}{1-0,3^2} \cdot \frac{2 \cdot 0,025^2}{3} = 1,37 \cdot 10^2 \text{ Па м}^3$$

$$A_1 = \frac{3,8 \cdot 10^9 \cdot 0,014}{1-0,4^2} \left[\frac{0,014}{2} + 0,025 \right] = 2,3 \cdot 10^6 \text{ Па м}^3$$

$$F_1 = \frac{3,8 \cdot 10^9 \cdot 0,014}{1-0,4^2} \left(\frac{0,025 \cdot 0,014}{2} + 0,025^2 \right) = 5,07 \cdot 10^4 \text{ Па м}^3$$

$$N = 1,37 \cdot 10^2 + 2 \cdot 0,025 \cdot 1,58 \cdot 10^6 = 7,93 \cdot 10^4 \text{ Па м}^3$$

$$S = 2 \cdot 2,1 \cdot 10^7 \cdot 0,025 = 1,05 \cdot 10^6 \text{ Па м}^3$$

$$F = 2 \cdot 6,58 \cdot 10^4 - 2 \cdot 5,07 \cdot 10^4 = 3,04 \cdot 10^4 \text{ Па м}^3$$

$$T = 2 \cdot 5,07 \cdot 10^4 + 1,37 \cdot 10^2 = 1,02 \cdot 10^5 \text{ Па м}^3$$

$$L = 2 \cdot 2,3 \cdot 10^6 - 2 \cdot 1,58 \cdot 10^6 = 8,87 \cdot 10^5 \text{ Па м}^3.$$

Определяем частоты, на которых происходит изменение характера скорости:

$$f_1 = \frac{1,05 \cdot 10^6}{2 \cdot 3,14 \sqrt{37,4 \cdot 7,93 \cdot 10^4}} = 97,03 \text{ Гц.}$$

Округляем полученное значение до ближайшей среднегеометрической частоты третьоктавной полосы: $f_1 = 100$ Гц;

$$f_2 = \frac{1,05 \cdot 10^6}{2 \cdot 3,14 \sqrt{37,4 \left(3,04 \cdot 10^4 - \frac{1,02 \cdot 10^5 \cdot 8,87 \cdot 10^5 \cdot 0,025}{7,93 \cdot 10^4} \right)}} = 599,24 \text{ Гц.}$$

Округляем полученное значение до ближайшей среднегеометрической частоты третьоктавной полосы: $f_2 = 630$ Гц.

2.2 Расчет скорости распространения изгибных колебаний

Определяем скорости изгибных волн, результаты расчета представлены в таблице 4.

Таблица 4

Третьоктавные полосы со средне- геометрическими частотами, Гц	c_1 , м/с	c_3 , м/с	c_S , м/с	c_H , м/с
100	68,45	170,09	167,56	167,56
125	76,53	190,17	167,56	167,56
160	86,58	215,15	167,56	167,56
200	96,80	240,55	167,56	167,56
250	108,23	268,94	167,56	167,56
315	121,48	301,89	167,56	167,56
400	136,90	340,19	167,56	167,56
500	153,05	380,34	167,56	167,56
630	171,80	426,93	167,56	171,80
800	193,60	481,10	167,56	193,60
1000	216,45	537,88	167,56	216,45
1250	242,00	601,37	167,56	242,00
1600	273,79	680,37	167,56	273,79
2000	306,11	760,68	167,56	306,11
2500	342,24	850,47	167,56	342,24
3150	384,16	954,65	167,56	384,16

По результатам проведенных расчетов строим дисперсионные кривые скоростей изгибных колебаний сэндвич-панели (рисунок 3). На частотах $100 \text{ Гц} < f < 630 \text{ Гц}$ принимаем $c_{II} \approx c_S$; на частотах $f > 630 \text{ Гц}$ принимаем $c_{II} \approx c_1$.

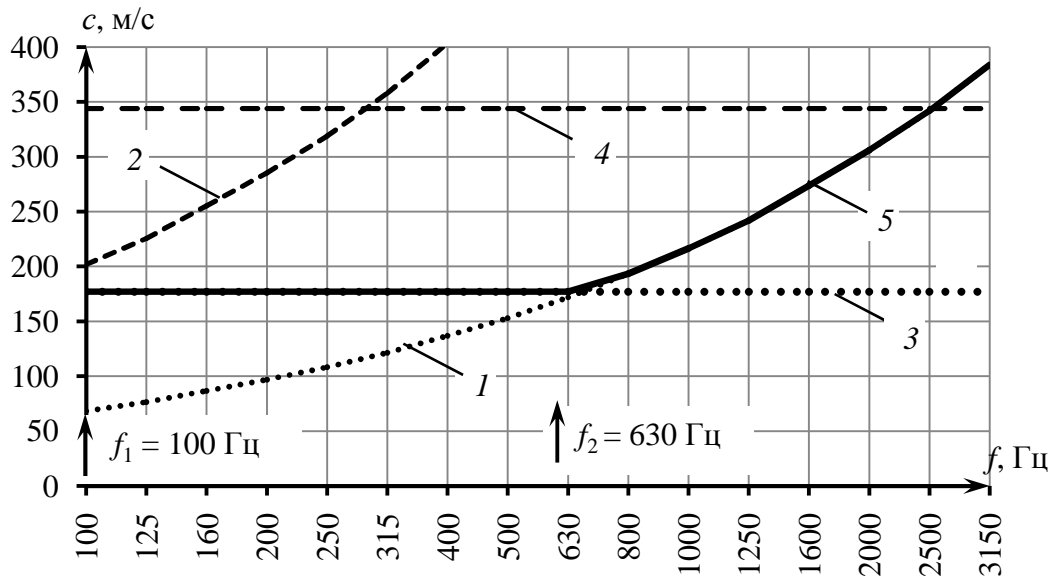


Рис. 3 – Дисперсионные кривые скоростей изгибных колебаний сэндвич-панели (размер $3,0 \text{ м} \times 2,5 \text{ м}$) с внешними листовыми облицовками из ЦСП, толщиной по 14 мм и средним слоем из пенопласта толщиной 50 мм: 1 – c_1 ; 2 – c_3 ; 3 – c_S ; 4 – c_0 ; 5 – c_{II}

3.1 Определение резонансной частоты области полных пространственных резонансов (ППР)

$$f_{\Gamma mn} = \frac{344^2}{2 \cdot 3,14} \sqrt{\frac{18,2}{1034,4}} = 2489,1 \text{ Гц. Округляем полученное значение до}$$

ближайшей среднегеометрической частоты третьоктавной полосы:

$$f_{\Gamma mn} = 2500 \text{ Гц.}$$

3.2 Определение резонансной частоты системы «масса – упругость – масса»

$$f_p = 0,16 \sqrt{\frac{2 \cdot 8,5 \cdot 10^6}{0,05 \cdot 18,2}} = 691,6 \text{ Гц.}$$

Округляем полученное значение до ближайшей среднегеометрической частоты третьоктавной полосы:

$$f_p = 630 \text{ Гц.}$$

4.1 Расчет коэффициентов резонансного прохождения звука через сэндвич-панель

Определяем коэффициент резонансного прохождения звука через сэндвич-панель, как конструктивную систему в целом – $\tau_{ПС}$. При этом значения характеристик самосогласования волновых полей вычисляются по формуле (17). Значения характеристик волновых полей m , n были определены в соответствии с выражениями (18) ÷ (23). Результаты расчета представлены в таблице 5.

Таблица 5

Третьоктавные полосы со среднегеометрическими частотами, Гц	m	n	m_{0max}	n_{0max}	m_{0cp}^2	n_{0cp}^2	A_0	$\tau_{ПС}$
100	50,80	65,02	2,87	3,37	2,05	2,85	0,12	$2,94 \cdot 10^{-6}$
125	62,74	80,21	3,64	4,31	3,30	4,65	0,13	$1,69 \cdot 10^{-6}$
160	78,99	99,52	4,70	5,60	5,53	7,85	0,14	$8,72 \cdot 10^{-7}$
200	96,90	123,38	5,91	7,06	8,73	12,46	0,15	$4,80 \cdot 10^{-7}$
250	118,28	150,15	7,41	8,87	13,74	19,68	0,16	$7,25 \cdot 10^{-6}$
315	144,41	181,71	9,36	11,22	21,92	31,45	0,18	$6,19 \cdot 10^{-6}$

Окончание таблицы 5

Третьоктавные полосы со среднегеометрическими частотами, Гц	m	n	m_{0max}	n_{0max}	m_{0cp}^2	n_{0cp}^2	A_0	$\tau_{ПС}$
400	175,74	218,73	11,91	14,27	35,45	50,93	0,22	$6,42 \cdot 10^{-6}$
500	208,48	259,98	14,90	17,86	55,48	79,78	0,28	$9,68 \cdot 10^{-6}$
630	248,70	305,77	18,32	21,97	83,87	120,66	0,36	$5,11 \cdot 10^{-5}$
800	315,74	386,11	20,64	24,76	106,55	153,32	0,33	$1,7610^{-5}$
1000	394,62	487,90	23,08	27,69	133,23	191,74	0,29	$1,01 \cdot 10^{-6}$
1250	493,21	609,82	25,81	30,97	166,58	239,76	0,26	$1,61 \cdot 10^{-7}$
1600	631,24	767,67	29,21	35,04	213,27	307,00	0,23	$3,02 \cdot 10^{-8}$
2000	788,98	975,56	32,66	39,18	266,63	383,84	0,20	$7,37 \cdot 10^{-9}$
2500	-	-	-	-	-	-	1	$1,07 \cdot 10^{-8}$
3150	-	-	-	-	-	-	1	$3,16 \cdot 10^{-9}$

Вычисляем угол падения звуковых волн на вторую облицовку сэндвич-панели:

$$\cos\theta_2 = \frac{0,05}{\sqrt{2,5^2 + 0,05^2}} + \frac{0,05}{\sqrt{3,0^2 + 0,05^2}} = 0,018,$$

$$\theta_2 = 88,9^\circ.$$

Вычисляем коэффициенты прохождения звука $\tau_{1С}$ и $\tau_{2С}$, результаты расчета представлены в таблице 6.

Таблица 6

Третьоктавные полосы со средне- геометрическими частотами, Гц	Область НПП		Область ППП	
	τ_{1C}	τ_{2C}	τ_{1C}	τ_{2C}
100	$1,11 \cdot 10^{-3}$	$5,97 \cdot 10^{-1}$	-	-
125	$7,99 \cdot 10^{-4}$	$5,16 \cdot 10^{-1}$	-	-
160	$5,67 \cdot 10^{-4}$	$4,31 \cdot 10^{-1}$	-	-
200	$4,15 \cdot 10^{-4}$	$3,57 \cdot 10^{-1}$	-	-
250	$3,19 \cdot 10^{-4}$	$2,99 \cdot 10^{-1}$	-	-
315	$2,59 \cdot 10^{-4}$	$2,57 \cdot 10^{-1}$	-	-
400	$2,32 \cdot 10^{-4}$	$2,36 \cdot 10^{-1}$	-	-
500	$2,37 \cdot 10^{-4}$	$2,41 \cdot 10^{-1}$	-	-
630	$2,57 \cdot 10^{-4}$	$2,55 \cdot 10^{-1}$	-	-
800	$1,27 \cdot 10^{-4}$	$1,45 \cdot 10^{-1}$	-	-
1000	$6,37 \cdot 10^{-5}$	$7,84 \cdot 10^{-2}$	-	-
1250	$3,27 \cdot 10^{-5}$	$4,18 \cdot 10^{-2}$	-	-
1600	$1,61 \cdot 10^{-5}$	$2,11 \cdot 10^{-2}$	-	-
2000	$8,00 \cdot 10^{-6}$	$1,06 \cdot 10^{-2}$	-	-
2500	-	-	$1,23 \cdot 10^{-4}$	$1,41 \cdot 10^{-1}$
3150	-	-	$7,72 \cdot 10^{-5}$	$9,35 \cdot 10^{-2}$

4.2 Расчет коэффициентов инерционного прохождения звука через сэндвич-панель

Определяем коэффициент инерционного прохождения звука через наружные облицовки с упругой связью между собой $\tau_{\text{ПИ}}$ и коэффициенты инерционного прохождения звука через облицовки $\tau_{1И}, \tau_{2И}$. Результаты расчета представлены в таблице 7.

Значения функции отклика $F_{1И}$ и $F_{2И}$ в нормируемом диапазоне частот для сэндвич-панели размером 3,0 м × 2,5 м определяем по таблице 2.

Таблица 7

Третьоктавные полосы со средне- геометрическими частотами, Гц	$F_{1и}$	$F_{2и}$	$\tau_{пн}$	$\tau_{ин}$	$\tau_{2и}$
100	0,84	1,02	$1,59 \cdot 10^{-4}$	$9,63 \cdot 10^{-3}$	$9,50 \cdot 10^{-1}$
125	1,01	0,76	$1,50 \cdot 10^{-4}$	$8,84 \cdot 10^{-3}$	$8,69 \cdot 10^{-1}$
160	0,78	0,80	$5,64 \cdot 10^{-5}$	$3,20 \cdot 10^{-3}$	$8,21 \cdot 10^{-1}$
200	0,82	0,96	$4,28 \cdot 10^{-5}$	$2,28 \cdot 10^{-3}$	$8,07 \cdot 10^{-1}$
250	0,97	0,88	$4,31 \cdot 10^{-5}$	$2,07 \cdot 10^{-3}$	$6,93 \cdot 10^{-1}$
315	0,89	0,85	$2,74 \cdot 10^{-5}$	$1,09 \cdot 10^{-3}$	$5,70 \cdot 10^{-1}$
400	0,88	0,89	$2,32 \cdot 10^{-5}$	$6,53 \cdot 10^{-4}$	$4,75 \cdot 10^{-1}$
500	0,93	0,90	$3,22 \cdot 10^{-5}$	$4,68 \cdot 10^{-4}$	$3,71 \cdot 10^{-1}$
630	0,92	1,00	$1,64 \cdot 10^{-4}$	$2,90 \cdot 10^{-4}$	$3,17 \cdot 10^{-1}$
800	1,00	0,99	$3,97 \cdot 10^{-5}$	$2,14 \cdot 10^{-4}$	$2,19 \cdot 10^{-1}$
1000	0,97	1,00	$2,85 \cdot 10^{-6}$	$1,28 \cdot 10^{-4}$	$1,54 \cdot 10^{-1}$
1250	1,00	1,00	$5,59 \cdot 10^{-7}$	$8,72 \cdot 10^{-5}$	$1,04 \cdot 10^{-1}$
1600	1,00	0,99	$1,19 \cdot 10^{-7}$	$5,35 \cdot 10^{-5}$	$6,55 \cdot 10^{-2}$
2000	0,97	0,98	$3,14 \cdot 10^{-8}$	$3,24 \cdot 10^{-5}$	$4,24 \cdot 10^{-2}$
2500	1,00	1,00	$9,84 \cdot 10^{-9}$	$2,18 \cdot 10^{-5}$	$2,83 \cdot 10^{-2}$
3150	0,99	1,00	$2,84 \cdot 10^{-9}$	$1,34 \cdot 10^{-5}$	$1,80 \cdot 10^{-2}$

5. *Определяем суммарный коэффициент прохождения звука через сэндвич-панель и вычисляем значения звукоизоляции сэндвич-панели в нормируемом диапазоне частот*

Результаты расчета представлены в таблице 8.

Строим частотную характеристику звукоизоляции сэндвич-панели (рис. 4).

Таблица 8

Третьоктавные полосы со средне- геометрическими частотами, Гц	Коэффициент прохождения звука, τ	Звукоизоляция, R , дБ
100	$9,98 \cdot 10^{-3}$	20,0
125	$8,25 \cdot 10^{-3}$	20,8
160	$2,93 \cdot 10^{-3}$	25,3
200	$2,04 \cdot 10^{-3}$	26,9
250	$1,58 \cdot 10^{-3}$	28,0
315	$7,25 \cdot 10^{-4}$	31,4
400	$3,95 \cdot 10^{-4}$	34,0
500	$2,74 \cdot 10^{-4}$	35,6
630	$3,92 \cdot 10^{-4}$	34,1
800	$1,18 \cdot 10^{-4}$	39,3
1000	$2,85 \cdot 10^{-5}$	45,5
1250	$1,12 \cdot 10^{-5}$	49,5
1600	$3,99 \cdot 10^{-6}$	54,0
2000	$1,49 \cdot 10^{-6}$	58,3
2500	$1,79 \cdot 10^{-5}$	47,5
3150	$7,46 \cdot 10^{-5}$	51,3

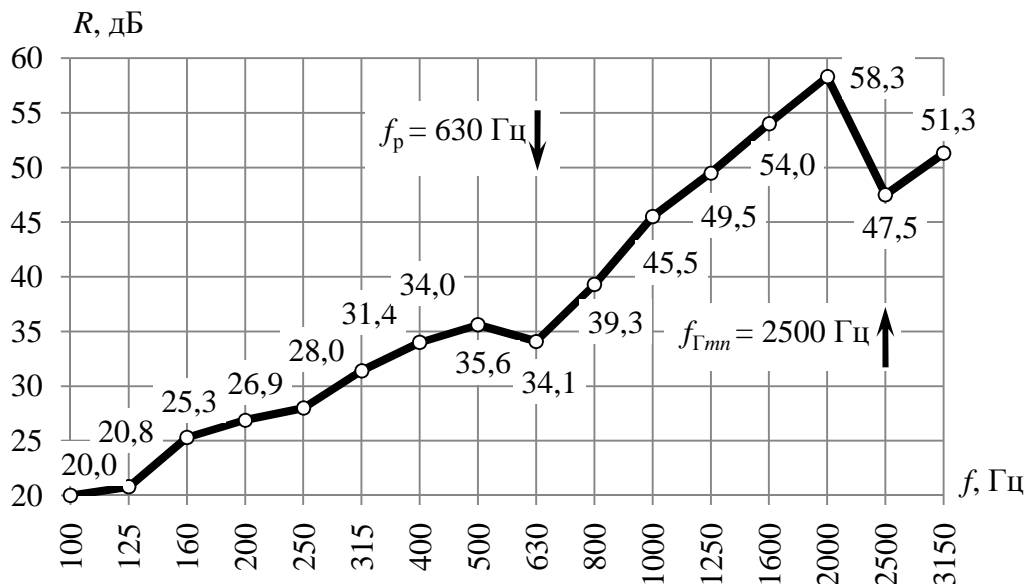


Рис. 4 – Частотная характеристика звукоизоляции сэндвич-панели (размер 3,0 м × 2,5 м) с внешними листовыми облицовками из ЦСП, толщиной по 14 мм и средним слоем из пенопласта толщиной 50 мм

3,0	2,5	0,014	1300	$3,8 \times 10^9$	0,4	0,01	50	20	$8,5 \times 10^6$	$2,5 \times 10^7$	0,3	0,025	0,003	20
-----	-----	-------	------	-------------------	-----	------	----	----	-------------------	-------------------	-----	-------	-------	----

1.2 Вычисление физико-механических параметров сэндвич-панели

$$\mu_1 = 1300 \cdot 0,014 = 18,2 \text{ кг/м}^2;$$

$$\mu = 2 \cdot 1300 \cdot 0,014 + 2 \cdot 20 \cdot 0,028 = 37,5 \text{ кг/м}^2;$$

$$D = \frac{3,8 \cdot 10^9 \cdot 0,014^3}{12(1-0,4)} = 1034,4 \text{ Па м}^3.$$

2.1 Расчет скорости распространения изгибных колебаний сэндвич-панели

Определяем жесткостные параметры сэндвич-панели:

$$B_1 = \frac{3,8 \cdot 10^{-9} \cdot 0,014 \cdot 0,028}{1-0,4^2} = 1,77 \cdot 10^6 \text{ Па м}^3$$

$$D_1 = \frac{3,8 \cdot 10^{-9} \cdot 0,014}{1-0,4^2} \left[\frac{0,014^2}{12} + \left(0,028 + \frac{0,014}{2} \right)^2 \right] = 7,86 \cdot 10^4 \text{ Па м}^3$$

$$D_3 = \frac{8,5 \cdot 10^6}{1-0,3^2} \cdot \frac{2 \cdot 0,028^2}{3} = 1,92 \cdot 10^2 \text{ Па м}^3$$

$$A_1 = \frac{3,8 \cdot 10^{-9} \cdot 0,014}{1-0,4^2} \left[\frac{0,014}{2} + 0,028 \right] = 2,21 \cdot 10^6 \text{ Па м}^3$$

$$F_1 = \frac{3,8 \cdot 10^{-9} \cdot 0,014}{1-0,4^2} \left(\frac{0,025 \cdot 0,014}{2} + 0,028^2 \right) = 6,02 \cdot 10^4 \text{ Па м}^3$$

$$N = 1,37 \cdot 10^2 + 2 \cdot 0,028 \cdot 1,58 \cdot 10^6 = 9,95 \cdot 10^4 \text{ Па м}^3$$

$$S = 2 \cdot 2,1 \cdot 10^7 \cdot 0,028 = 1,18 \cdot 10^6 \text{ Па м}^3$$

$$F = 2 \cdot 6,58 \cdot 10^4 - 2 \cdot 5,07 \cdot 10^4 = 3,31 \cdot 10^4 \text{ Па м}^3$$

$$T = 2 \cdot 5,07 \cdot 10^4 + 1,37 \cdot 10^2 = 1,24 \cdot 10^5 \text{ Па м}^3$$

$$L = 2 \cdot 2,3 \cdot 10^6 - 2 \cdot 1,58 \cdot 10^6 = 8,87 \cdot 10^5 \text{ Па м}^3.$$

Определяем частоты, на которых происходит изменение характера скорости:

$$f_1 = \frac{1,18 \cdot 10^6}{2 \cdot 3,14 \sqrt{37,5 \cdot 9,95 \cdot 10^4}} = 96,87 \text{ Гц.}$$

Округляем полученное значение до ближайшей среднегеометрической частоты третьоктавной полосы: $f_1 = 100 \text{ Гц}$;

$$f_2 = \frac{1,18 \cdot 10^6}{2 \cdot 3,14 \sqrt{37,5 \left(3,31 \cdot 10^4 - \frac{1,24 \cdot 10^5 \cdot 8,87 \cdot 10^5 \cdot 0,028}{9,95 \cdot 10^4} \right)}} = 669,87 \text{ Гц.}$$

Округляем полученное значение до ближайшей среднегеометрической частоты третьоктавной полосы: $f_2 = 630 \text{ Гц}$.

2.2 Расчет скорости распространения изгибных колебаний

Определяем скорости изгибных волн, результаты расчета представлены в таблице 10.

Таблица 10

Третьоктавные полосы со среднегеометрическими частотами, Гц	c_1 , м/с	c_3 , м/с	c_S , м/с	c_H , м/с
100	68,40	179,88	177,04	177,04
125	76,48	201,11	177,04	177,04
160	86,52	227,53	177,04	177,04
200	96,74	254,38	177,04	177,04
250	108,16	284,41	177,04	177,04
315	121,40	319,25	177,04	177,04
400	136,81	359,75	177,04	177,04
500	152,95	402,21	177,04	177,04
630	171,69	451,48	177,04	177,04
800	193,47	508,76	177,04	193,47
1000	216,31	568,82	177,04	216,31

Окончание таблицы 10

Третьоктавные полосы со средне- геометрическими частотами, Гц	c_1 , м/с	c_3 , м/с	c_S , м/с	c_{II} , м/с
1250	241,84	635,96	177,04	241,84
1600	273,61	719,50	177,04	273,61
2000	305,91	804,43	177,04	305,91
2500	342,02	899,38	177,04	342,02
3150	383,91	1009,55	177,04	383,91

По результатам проведенных расчетов строим дисперсионные кривые скоростей изгибных колебаний сэндвич-панели (рисунок 5). На частотах $100 \text{ Гц} < f < 630 \text{ Гц}$ принимаем $c_{II} \approx c_S$; на частотах $f > 630 \text{ Гц}$ принимаем $c_{II} \approx c_1$.

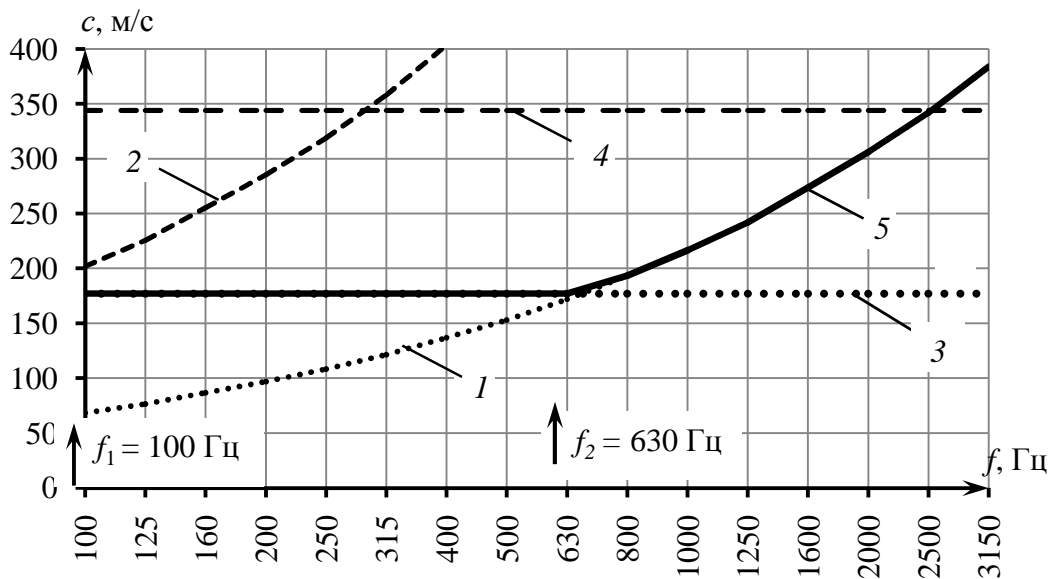


Рис. 5 – Дисперсионные кривые скоростей изгибных колебаний сэндвич-панели (размер $3,0 \text{ м} \times 2,5 \text{ м}$) с внешними листовыми облицов-

ками из ЦСП, толщиной по 14 мм и средним слоем из пенопласта толщиной 50 мм со слоями акустического разобщения из пенополиэтилена толщиной по 3 мм: 1 – c_1 ; 2 – c_3 ; 3 – c_5 ; 4 – c_0 ; 5 – c_{II}

3.1 Определение резонансной частоты области полных пространственных резонансов (ППР)

$$f_{\Gamma_{mn}} = \frac{344^2}{2 \cdot 3,14} \sqrt{\frac{18,2}{1034,4}} = 2489,1 \text{ Гц.}$$

Округляем полученное значение до

ближайшей среднегеометрической частоты третьоктавной полосы:

$$f_{\Gamma_{mn}} = 2500 \text{ Гц.}$$

3.2 Определение резонансной частоты системы «масса – упругость – масса»

По рисунку 2 определяем значение коэффициента k для рассматриваемого акустического разобщения слоев сэндвич-панели. Для разобщающих слоев толщиной по 3 мм – $k = 0,2$.

Определяем величину E_0 :

$$E_0 = 0,2 \cdot 8,5 \cdot 10^6 = 1,7 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

$$f_p = 0,16 \sqrt{\frac{2 \cdot 1,7 \cdot 10^6}{0,05 \cdot 18,2}} = 292,2 \text{ Гц.}$$

Округляем полученное значение до

ближайшей среднегеометрической частоты третьоктавной полосы:

$$f_p = 315 \text{ Гц.}$$

4.1 Расчет коэффициентов резонансного прохождения звука через сэндвич-панель

Определяем коэффициент резонансного прохождения звука через сэндвич-панель, как конструктивную систему в целом – $\tau_{ПС}$. При этом значения характеристик самосогласования волновых полей вычисляются по формуле (17). Значения характеристик волновых полей m , n были определены в соответствии с выражениями (18) ÷ (23). Результаты расчета представлены в таблице 11.

Таблица 11

Третьоктавные полосы со среднегеометрическими частотами, Гц	m	n	m_{0max}	n_{0max}	m_{0cp}^2	n_{0cp}^2	A_0	$\tau_{ПС}$
100	51,03	65,35	2,70	3,17	1,82	2,51	0,11	$3,93 \cdot 10^{-6}$
125	63,11	80,73	3,43	4,06	2,94	4,13	0,12	$2,53 \cdot 10^{-6}$
160	79,59	100,38	4,44	5,29	4,93	6,99	0,13	$1,63 \cdot 10^{-6}$
200	97,83	124,71	5,59	6,67	7,80	11,13	0,13	$1,34 \cdot 10^{-6}$
250	119,73	152,24	7,01	8,39	12,29	17,59	0,15	$4,69 \cdot 10^{-5}$
315	146,71	185,03	8,86	10,61	19,61	28,13	0,16	$2,55 \cdot 10^{-3}$
400	179,45	224,08	11,27	13,50	31,73	45,58	0,19	$6,24 \cdot 10^{-6}$
500	214,28	268,34	14,10	16,90	49,68	71,43	0,23	$8,46 \cdot 10^{-7}$
630	253,60	312,82	17,77	21,32	78,97	113,61	0,32	$1,92 \cdot 10^{-7}$
800	315,60	385,91	20,66	24,78	106,69	153,52	0,33	$4,49 \cdot 10^{-8}$
1000	394,44	487,65	23,10	27,71	133,40	191,99	0,29	$1,15 \cdot 10^{-8}$
1250	492,99	609,50	25,83	30,99	166,79	240,07	0,26	$3,14 \cdot 10^{-9}$
1600	630,96	767,28	29,23	35,07	213,55	307,40	0,23	$7,8 \cdot 10^{-10}$
2000	788,64	975,06	32,68	39,21	266,98	384,33	0,20	$2,2 \cdot 10^{-10}$
2500	-	-	-	-	-	-	1	$3,4 \cdot 10^{-10}$
3150	-	-	-	-	-	-	1	$1,1 \cdot 10^{-10}$

Вычисляем угол падения звуковых волн на вторую облицовку сэндвич-панели:

$$\cos\theta_2 = \frac{0,056}{\sqrt{2,5^2 + 0,056^2}} + \frac{0,056}{\sqrt{3,0^2 + 0,056^2}} = 0,02,$$

$$\theta_2 = 88,8^\circ.$$

Вычисляем коэффициенты прохождения звука $\tau_{1С}$ и $\tau_{2С}$, результаты расчета представлены в таблице 12.

Таблица 12

Третьоктавные полосы со средне- геометрическими частотами, Гц	Область НПР		Область ППР	
	τ_{1C}	τ_{2C}	τ_{1C}	τ_{2C}
100	$9,51 \cdot 10^{-4}$	$5,03 \cdot 10^{-1}$	-	-
125	$6,83 \cdot 10^{-4}$	$4,21 \cdot 10^{-1}$	-	-
160	$4,80 \cdot 10^{-4}$	$3,38 \cdot 10^{-1}$	-	-
200	$3,47 \cdot 10^{-4}$	$2,70 \cdot 10^{-1}$	-	-
250	$2,61 \cdot 10^{-4}$	$2,17 \cdot 10^{-1}$	-	-
315	$2,05 \cdot 10^{-4}$	$1,79 \cdot 10^{-1}$	-	-
400	$1,73 \cdot 10^{-4}$	$1,56 \cdot 10^{-1}$	-	-
500	$1,64 \cdot 10^{-4}$	$1,49 \cdot 10^{-1}$	-	-
630	$1,94 \cdot 10^{-4}$	$1,71 \cdot 10^{-1}$	-	-
800	$1,28 \cdot 10^{-4}$	$1,20 \cdot 10^{-1}$	-	-
1000	$6,41 \cdot 10^{-5}$	$6,39 \cdot 10^{-2}$	-	-
1250	$3,29 \cdot 10^{-5}$	$3,38 \cdot 10^{-2}$	-	-
1600	$1,63 \cdot 10^{-5}$	$1,70 \cdot 10^{-2}$	-	-
2000	$8,05 \cdot 10^{-6}$	$8,49 \cdot 10^{-3}$	-	-
2500	-	-	$1,23 \cdot 10^{-4}$	$1,15 \cdot 10^{-1}$
3150	-	-	$7,72 \cdot 10^{-5}$	$7,60 \cdot 10^{-2}$

4.2 Расчет коэффициентов инерционного прохождения звука через сэндвич-панель

Определяем коэффициент инерционного прохождения звука через наружные облицовки с упругой связью между собой $\tau_{ПН}$ и коэффициенты инерционного прохождения звука через облицовки – $\tau_{1И}$, $\tau_{2И}$. Результаты расчета представлены в таблице 13.

Значения функции отклика $F_{1и}$ и $F_{2и}$ в нормируемом диапазоне частот для сэндвич-панели размером 3,0 м × 2,5 м определяем по таблице 2.

Таблица 13

Третьоктавные полосы со средне-геометрическими частотами, Гц	$F_{1и}$	$F_{2и}$	$\tau_{пн}$	$\tau_{1и}$	$\tau_{2и}$
100	0,84	1,02	$2,13 \cdot 10^{-4}$	$9,63 \cdot 10^{-3}$	$9,38 \cdot 10^{-1}$
125	1,01	0,76	$2,24 \cdot 10^{-4}$	$8,84 \cdot 10^{-3}$	$8,42 \cdot 10^{-1}$
160	0,78	0,80	$1,05 \cdot 10^{-4}$	$3,20 \cdot 10^{-3}$	$7,86 \cdot 10^{-1}$
200	0,82	0,96	$1,19 \cdot 10^{-4}$	$2,28 \cdot 10^{-3}$	$7,70 \cdot 10^{-1}$
250	0,97	0,88	$3,05 \cdot 10^{-4}$	$2,07 \cdot 10^{-3}$	$6,43 \cdot 10^{-1}$
315	0,89	0,85	$1,24 \cdot 10^{-2}$	$1,09 \cdot 10^{-3}$	$5,14 \cdot 10^{-1}$
400	0,88	0,89	$2,51 \cdot 10^{-5}$	$6,53 \cdot 10^{-4}$	$4,19 \cdot 10^{-1}$
500	0,93	0,90	$3,14 \cdot 10^{-6}$	$4,68 \cdot 10^{-4}$	$3,20 \cdot 10^{-1}$
630	0,92	1,00	$5,11 \cdot 10^{-7}$	$2,90 \cdot 10^{-4}$	$2,70 \cdot 10^{-1}$
800	1,00	0,99	$1,38 \cdot 10^{-7}$	$2,14 \cdot 10^{-4}$	$1,83 \cdot 10^{-1}$
1000	0,97	1,00	$3,75 \cdot 10^{-8}$	$1,28 \cdot 10^{-4}$	$1,26 \cdot 10^{-1}$
1250	1,00	1,00	$1,21 \cdot 10^{-8}$	$8,72 \cdot 10^{-5}$	$8,49 \cdot 10^{-2}$
1600	1,00	0,99	$3,37 \cdot 10^{-9}$	$5,35 \cdot 10^{-5}$	$5,29 \cdot 10^{-2}$
2000	0,97	0,98	$1,01 \cdot 10^{-9}$	$3,24 \cdot 10^{-5}$	$3,41 \cdot 10^{-2}$
2500	1,00	1,00	$3,44 \cdot 10^{-10}$	$2,18 \cdot 10^{-5}$	$2,27 \cdot 10^{-2}$
3150	0,99	1,00	$1,04 \cdot 10^{-10}$	$1,34 \cdot 10^{-5}$	$1,44 \cdot 10^{-2}$

5 Определяем суммарный коэффициент прохождения звука через сэндвич-панель и вычисляем значения звукоизоляции сэндвич-панели в нормируемом диапазоне частот

Результаты расчета представлены в таблице 14.

Строим частотную характеристику звукоизоляции сэндвич-панели (рис. 6).

Таблица 14

Третьоктавные полосы со средне- геометрическими частотами, Гц	Коэффициент прохождения звука, τ	Звукоизоляция, R, дБ
100	$9,73 \cdot 10^{-3}$	20,1
125	$7,96 \cdot 10^{-3}$	21,0
160	$2,79 \cdot 10^{-3}$	25,5
200	$1,97 \cdot 10^{-3}$	27,1
250	$1,74 \cdot 10^{-3}$	27,6
315	$1,55 \cdot 10^{-2}$	18,1
400	$3,32 \cdot 10^{-4}$	34,8
500	$1,78 \cdot 10^{-4}$	37,5
630	$1,12 \cdot 10^{-4}$	39,5
800	$5,47 \cdot 10^{-5}$	42,6
1000	$2,04 \cdot 10^{-5}$	46,9
1250	$8,54 \cdot 10^{-6}$	50,7
1600	$3,11 \cdot 10^{-6}$	55,1
2000	$1,17 \cdot 10^{-6}$	59,3
2500	$1,46 \cdot 10^{-5}$	48,3
3150	$6,06 \cdot 10^{-6}$	52,2

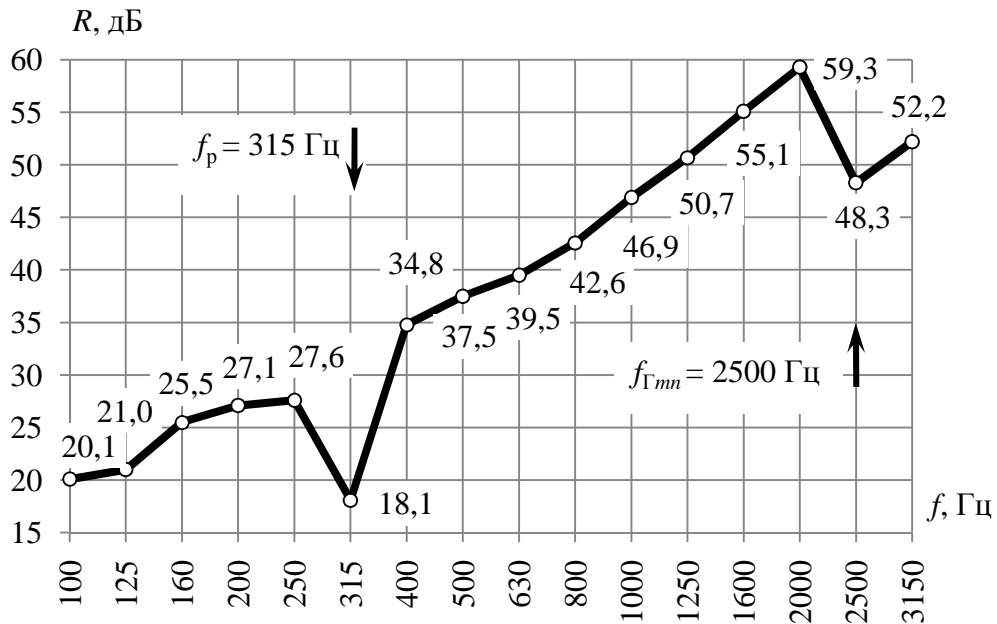


Рис. 6 – Частотная характеристика звукоизоляции сэндвич-панели (размер 3,0 м × 2,5 м) с внешними листовыми облицовками из ЦСП, толщиной по 14 мм и средним слоем из пенопласта толщиной 50 мм со слоями акустического разобщения толщиной по 3 мм

ЛИТЕРАТУРА

1. Гребнев, П. А. Звукоизоляция ограждающих конструкций зданий из сэндвич-панелей: автореф. дис. канд. техн. наук / П. А. Гребнев – Н. Новгород, 2016 – 21 с.
2. Бобылев, В. Н. Инженерный метод расчёта звукоизоляции сэндвич-панелей с учётом двойственной природы прохождения звука // Academia. Архитектура и строительство / В.Н. Бобылев, В.А. Тишков, П.А. Гребнев, Д.В. Монич. – М., РААСН. №1, 2016. – С. 134-138
3. Кочкин, А. А. Звукоизоляция слоистых пластин ограниченных размеров с промежуточным вибродемпфирующим слоем: автореф. дис. канд. техн. наук / А. А. Кочкин; Московский институт инженеров ж/д транспорта. – М., 1984 – 24 с.

4. Балишанская, Л. Г. Техническая акустика транспортных машин: Справочник / Л.Г. Балишанская, Л. Ф. Дроздова, Н. И. Иванов, М. С. Седов. – СПб: Политехника, 1992 – 365 с.

5. СП 51.13330.2011 Защита от шума, актуализированная версия СНиП 23-03-2003: Госстрой России. – М.: ФГУП ЦПП, 2011.

Бобылев Владимир Николаевич
Тишков Владимир Александрович
Гребнев Павел Алексеевич
Монич Дмитрий Викторович

Расчет звукоизоляции сэндвич-панелей с учетом акустического разобщения слоев

Учебное пособие

Подписано в печать _____ Формат 60x90 1/16
Бумага газетная. Печать трафаретная.
Уч. изд. л. 1,9. Усл. печ. л. 2,1. Тираж 300 экз. Заказ № _____

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет» 603950, Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65.
Полиграфический центр ННГАСУ, 603950, Н.Новгород, Ильинская, 65
<http://www.nngasu.ru>, srec@nngasu.ru